

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE**

Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Thème

**Modélisation de la propriété TBP des pétroles bruts de classes
Légère, Moyenne et Lourde**

Dirigé par :

Mme S.HADDOUM

Mme K.IBELAIDENE

Présenté par:

Ammar CHETTIBI

Abdellah BENDELLALI

Soutenu le 13 juin 2015, devant le jury composé de :

Mme F. SOUABI	Professeur (E.N.P)	Présidente
Mme A.MEFTI	Maître de conférences (E.N.P)	Examinatrice
Mlle F.KIES	Maître de conférences (E.N.P)	Examinatrice
Mme S. HADDOUM	Maître Assistante (E.N.P)	Promotrice
Mme K.IBELAIDENE	SH/DTD	Promotrice

Promotion Juin 2015

10, Avenue Hassen Badi BP 182 El-Harrach- Alger

Tél: 213 21 52 53 01 _ Fax: 213 21 52 29 73.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو إيجاد طريقة جديدة لتصنيف أنواع البترول الخام عن طريق نمذجة خاصية تقطير البترول الخام للأصناف الخفيفة، العادية والثقيلة. من أجل ذلك سنستعمل طريقة غاما للتوزيع. في البداية سنقوم بتقديم عرض شامل عن معطيات الكثافة وخاصية التقطير لـ 26 نوع من النفط. أول تصنيف قمنا به باستعمال الطرائق العادية التي تعتمد على مختلف الخصائص مثل الكثافة حيث اتضح أن هذه التصنيفات لا تزال غير مؤكدة ومتناقضة في بعض الأحيان. طريقة غاما للتوزيع سمحت لنا بوضع رسم بياني بيئا بدلالة ألفا هذا الثنائي يتحدد من تقطير النفط، وأيضا بنمذجة معطيات التقطير نستطيع تصنيف أي نوع من الأنواع الثلاثة للنفط (المتوسط، الخفيف، الثقيل) مع هامش خطأ مقبول. **كلمات مفتاحية:** النفط، التصنيف، تقطير، توزيع غاما، والمصادقة.

Résumé

Ce travail de recherche a pour objectif de trouver une nouvelle méthode de classification des pétroles bruts à travers la Modélisation de la propriété TBP des pétroles bruts de classes légère, moyenne et lourde. Pour ce faire nous avons utilisé la méthode de la loi Gamma distribution. Tout d'abord une synthèse bibliographique assez minutieuse pour récolter des données de densité et de distillations TBP de différents pétroles bruts de différentes origines. Le critère principal de choix était la densité. A l'issue de cette étape une banque de données de 26 pétroles bruts a été mise en place.

Une première classification a été réalisée en utilisant les méthodes classiques de classification basées sur le °API, le Kuop et le CI. Il s'avère que ces classements restent très aléatoires et contradictoires parfois.

La méthode de distribution GAMMA nous a permis de faire un un diagramme de $\beta = f(\alpha)$. Ce couple (α, β) est déterminé à partir de la distillation TBP du pétrole, modélisant ainsi les données TBP et qui nous permet de classer n'importe quel pétrole brut dans tris zones distinctes : pétrole léger moyen et lourd avec une marge d'erreur acceptable.

Mots clés : Pétrole, classification, TBP, loi Gamma, validation.

Abstract

The primary goal of this study is to find a new method of crude oils classification through the modeling of light, medium and heavy oils TBP curves. For this purpose we used the law of Gamma distribution. First, a bibliographical research was conducted to collect various specifications of crude such us specific gravity and TBP distillation data from different countries. At the end of this review 26 crude oils database was elaborated.

First classification was performed using the commonly used methods based on API, K_{uop} , and CI. The results were not coherent and deficient.

The GAMMA distribution method allowed us to made a diagram using parameters $\beta = f(\alpha)$.

The pair (α, β) is determined from crude oil TBP distillation, thus modeling the TBP data which allows us to classify any crude oil in three distinct areas: light, medium and heavy oil with a margin of acceptable error.

Keywords: Oil, classification, TBP, gamma distribution, validation.

REMERCIEMENTS

Nous rendons à Dieu le grand merci de nous avoir donné le courage et la volonté pour pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous remercions infiniment nos chers parents de nous avoir offert tout ce dont nous avons besoin pour être toujours à la hauteur et réussir dans notre vie.

Au terme de ce projet tenons à remercier en premier lieu nos promotrices ; Mmes S. HADDOUM et K. IBELAI DENE pour leur disponibilité, leur expertise technique et scientifique, leur conseil avisé, ainsi que leur soutien permanent qui nous ont permis de mener à bien notre étude.

NOS remerciements s'adressent également à Mme F. SOUABI, professeur au département de Génie Chimique, qui nous fait l'honneur de présider ce jury, Mme A. MEFTI et Mlle F. KIES, Maîtres de Conférences au Département du Génie Chimique d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce modeste travail.

Nous voudrions exprimer notre profond respect à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Enfin, nous remercions nos familles et nos amis qui nous ont soutenu et encouragé durant nos cursus, ainsi que tous ceux qui nous ont aidés et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, les êtres les plus chers dans ma vie, pour
leurs encouragements et leurs sacrifices ;

A mes très chers frères que j'aime plus que tout au monde ;

A mes deux sœurs de cœur que j'aime ;

A mes amis ;

A tous ceux qui sont proches de mon cœur et dont je n'ai pas cité le
nom.

Ammar

DEDICACES

À ma chère maman, qui est toujours là pour moi

À ma chère maman, qui est mon exemple et mon repère

À ma chère maman, qui m'a aidé dans mon parcours scolaire

À mon cher père

À toute ma famille

À mes professeurs

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite

Abdellah

SOMMAIRE

Introduction	1
--------------------	---

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LE PETROLE

I.1. Introduction	2
I.2. Historique	2
I.3. Définition	2
I.4. Origine du pétrole.....	2
I.5. Composition du pétrole brut.....	4
I.6. Le pétrole dans le monde	7
I.7. Raffinage	9

CHAPITRE II

PROPRIETES PHYSIQUES ET THERMODYNMIQUES DU PETROLE ET DES FRACTIONS PETROLIERES

II. Propriétés physiques et thermodynamiques du pétrole et des fractions pétroliers.....	11
II.1. Masse volumique, densité et degré °API	11
II.2. Viscosité	11
II.2.1. La viscosité dynamique absolue	11
II.2.2. Viscosité relative	12
II.2.3. Viscosité cinématique absolue ν	12
II.3. Tension de vapeur	12
II.4. Teneur en soufre	13
II.5. Point d'écoulement	14
II.6. Point de congélation	14
II.7. Points critiques (T_c , P_c , V_c , Z_c).....	14
II.8. Point d'éclair et point de feu	15
II.9. Teneur en sel	15
II.10. Volume molaire	15
II.11. Point d'aniline	16
II.12. Facteur de caractérisation K_{uop}	16

CHAPITRE III
LA DISTILLATION TBP
(True Boiling Point)

III.1.	La distillation	17
III.2.	Introduction à la distillation TBP (True Boiling Point).....	17
III.3.	Principe	17
III.4.	Application de la distillation TBP	19
III.5.	Corrélations utilisées pour la prédiction de la température d'ébullition des fractions pétrolières	20

CHAPITRE IV
CLASSIFICATION DES PETROLES BRUTS

IV.1.	Introduction	22
IV.2.	Méthodes de classification.....	22
IV.2.1.	Classification industrielle (selon la densité du pétrole brut).....	22
IV.2.2.	Classification chimique.....	23
a)	Le facteur K_{top}	23
b)	Classification à partir des corrélations	24
1.	Classification selon CI	24
2.	Classification selon la densité des fractions pétrolières.....	25
3.	Classification selon la distribution du carbone	25
IV.2.3.	Classification économique (selon la teneur en soufre)	26

CHAPITRE V
GENERALITES SUR LES LOIS DE PROBABILITE

V.1.	Généralités sur les lois de probabilité	27
V.2.	Lois de probabilité continues	27
a)	Loi uniforme	27
b)	Loi normale ou loi de Gauss	27
c)	Loi normale centrée réduite	27
d)	Loi Log-normale	28
e)	Loi exponentielle	28
f)	Loi béta	28
g)	Loi de Weibull	28
h)	Loi de khi-deux	28

i) Loi Gamma	29
--------------------	----

PARTIE EXPERIMENTALE

I. Présentation des propriétés des pétroles étudiés	32
I.1. Les densités des pétroles étudiés	32
I.2. Distillation TBP des pétroles bruts.....	32
II. Classification des pétroles bruts par des méthodes classiques	38
II.1. Classification industrielle (selon °API du pétrole brut)	38
II.2. Classification chimique	39
II.2.1. Classification selon le facteur K_{oup}	39
II.2.2. Classification Selon le °API des fractions	40
II.2.3. Classification selon l'indice de corrélation CI	42
III. Modélisation de la propriété TBP des pétroles bruts : Application de la loi de distribution « Gamma ».....	45
III.1. Evolution de la fonction gamma en fonction des différents paramètres	45
a) Influence du paramètre « Cumulative ».....	45
b) Influence du paramètre alpha α	46
1. Sur la fonction de répartition	46
2. Sur la densité de probabilité.....	47
c) Influence du paramètre béta β	48
1. Sur la fonction de répartition	48
2. Sur la densité de probabilité.....	49
III.2. Relation entre la fonction distribution Gamma et la TBP	50
III.3. Classification selon la TBP.....	51
III.4. Modélisation des TBP	55
IV. Validation des résultats par la méthode GAMMA.....	62
Conclusion.....	64
Références bibliographiques	65

ANNEXES

Annexe I : Modélisation des courbes TBP.....	68
Annexe II : Abaque pour la détermination de la température moyenne d'ébullition d'un pétrole brut	92

Liste des abréviations

API	: American petroleum industry.
ASTM	: American Society for Testing Materials
d_4^T	: Densité du corps à T °C par rapport à la densité de l'eau à 4°C.
dv	: La vitesse de l'élément.
dx	: Un élément de distance dx.
F	: La force résistante.
K_{uop}	: Le facteur de caractérisation.
M	: La masse molaire.
RSV	: Le résidu sous vide.
S	: Un élément de surface.
TBP	: True boiling point.
T_c, P_c, V_c	: Pression, volume, température critique.
T_{eb}	: Température d'ébullition (°R).
$t_{i\%}$: Température correspondant au pourcentage %i distillé
t_i, t_f, t_{mav}	: Température initiale, finale, moyenne d'ébullition.
t_v, t_p, t_m	: Température volumétrique, pondérale et molaire.
TVR	: Tension de vapeur Reid.
ν	: Viscosité cinématique absolue.
V_M	: Le volume molaire.
μ	: la viscosité dynamique absolue.
ρ	: La masse volumique.

Les unités

CGS	: Centimètre, Gramme, Seconde
cSt	: centiStokes.

Liste des figures

Figure 1	: Méthane, Ethane, Propane.....	4
Figure 2	: Iso-Butane, Iso-pentane.....	5
Figure 3	: Les pays producteurs de pétrole.....	7
Figure 4	: Les réserves prouvées du pétrole dans le monde.....	8
Figure 5	: Schéma général d'un raffinage du pétrole.....	10
Figure 6	: Dispositif de mesure de pression de vapeur REID.....	13
Figure 7	: Dispositif de mesure du point d'éclair.....	15
Figure 8	: Schéma d'un appareil de distillation de type TBP.....	19
Figure 9	: Fractionnement du pétrole brut : Exemple de découpage de pétrole brut Algérien.....	20
Figure 10	: Détermination des températures moyennes d'ébullition à partir de la TBP.....	21
Figure 11	: Intervalle permettant la détermination de la nature d'un pétrole brut.....	22
Figure 12	: Courbes TBP des bruts de A à F.....	33
Figure 13	: Courbes TBP des bruts de G à L.....	34
Figure 14	: Courbes TBP des bruts de M à R.....	35
Figure 15	: Courbes TBP des bruts de S à X.....	36
Figure 16	: Courbes TBP des bruts Y et Z.....	37
Figure 17	: Variation de la fonction de répartition en fonction du paramètre alpha avec bêta constant.....	47
Figure 18	: Variation de la densité de probabilité en fonction du paramètre alpha avec bêta constant.....	48
Figure 19	: Variation de la fonction de répartition en fonction du paramètre bêta avec alpha constant.....	49
Figure 20	: Variation de la densité de probabilité en fonction du paramètre bêta avec alpha constant.....	50
Figure 21	: TBP de tous les pétroles bruts.....	51
Figure 22	: Courbes de la catégorie des légers.....	52
Figure 23	: Courbes de la catégorie des moyens.....	53
Figure 24	: Courbes de la zone des lourds.....	53
Figure 25	: Diagramme de la classification selon la méthode gamma.....	60
Figure 26	: Représentation des caractéristiques des bruts sur le diagramme gamma.....	62
Figure 27	: Zoom sur la zone de tendance.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1	:	Composition du pétrole Brut.....	6
Tableau 2	:	Production baril jour des plus grands pays producteurs.....	7
Tableau 3	:	Consommation en baril jour.....	8
Tableau 4	:	Composition du pétrole à partir de la classification CI.....	25
Tableau 5	:	Classification du brut selon les °API des fractions.....	25
Tableau 6	:	Classification du brut d'après la méthode n.d.M.....	26
Tableau 7	:	Densités des pétroles étudiés.....	32
Tableau 8	:	Classification selon le °API du pétrole.....	38
Tableau 9	:	Classification des pétroles selon le K_{uop}	40
Tableau 10	:	Classification des pétroles selon le °API des fractions.....	41
Tableau 11	:	Classification selon le facteur CI.....	42
Tableau 12	:	Tableau récapitulatif de la classification du pétrole selon les quatre méthodes.....	43
Tableau 13	:	Influence du quatrième paramètre sur la distribution gamma.....	45
Tableau 14	:	Influence du paramètre alpha α sur la distribution gamma.....	46
Tableau 15	:	Calcul des températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$	54
Tableau 16	:	Classification selon les températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$	54
Tableau 17	:	Exemple de calcul appliqué au pétrole brut B.....	56
Tableau 18	:	Tableau récapitulatif des résultats obtenus par la méthode gamma..	57
Tableau 19	:	Influence du changement d'un pas de 0,1 sur l'erreur.....	59
Tableau 20	:	les valeurs des paramètres de la borne supérieure.....	59
Tableau 21	:	les valeurs des paramètres de la borne inférieure.....	60
Tableau 22	:	Classification des pétroles bruts selon la méthode gamma.....	63

Introduction

Les pétroles (qu'il s'agisse des bruts conventionnels, de condensats, ou de syncrude) ne sont pas tous de la même qualité. Différentes échelles permettent de comparer les pétroles entre eux. Les plus importantes sont la densité et la teneur en soufre.

- La « *densité API* » (conçue par l'American Petroleum Institute) est utilisée dans le système anglo-saxon pour exprimer la densité du pétrole. Un liquide dont le degré API est de 10°API à une température de 15 °C, a une densité de 1,00 (soit celle de l'eau, 1 kg/litre) à la même température. Une densité de 22°API à 15 °C équivaut à 0,9218 de densité à 15 °C et 35°API à 15 °C équivaut à 0,8498 de densité à 15 °C. La limite inférieure du pétrole conventionnel est généralement placée à 15°API. On parle généralement de brut lourd pour moins de 20°API, moyen dans les 20 à 30°API et léger au-delà, mais ces bornes varient selon les pays. Les pétroles les plus légers sont les plus convoités par les raffineurs, car ils donnent directement beaucoup de coupes légères de grande valeur (diesel, essence, naphtha). À l'inverse, les pétroles lourds donnent plus de produits, tels que des bitumes et du fioul résiduel, qu'il faut soit vendre tels quels à bas prix, soit convertir en coupes plus légères, notamment par hydrocraquage (ajout d'hydrogène).

- La **teneur en soufre** varie considérablement d'un gisement à l'autre et donc d'un mélange commercial à l'autre, de 0,03 % à quelque 5 %. Le soufre est un polluant que les raffineurs doivent retirer (du moins dans les pays ayant des lois contre les pluies acides), il diminue donc de la valeur commerciale du brut. On place en général à 1,5 % de soufre la limite entre pétrole « doux » ((**en**) *sweet*) et « acide » ((**en**) *sour*). Un brut peut être :

- TBTS (très basse teneur en soufre),
- BTS (basse teneur en soufre),
- MTS (moyenne teneur en soufre),
- HTS (haute teneur en soufre)
- THTS (très haute teneur en soufre)

Outre ces deux échelles principales, il y a nombres d'autres critères de qualité, parmi lesquels on peut citer la viscosité, l'acidité, les ratios entre types d'hydrocarbures (cycliques ou non, saturés ou non), et les teneurs en azote, en métaux lourds, en sels, etc.

Ces multiples catégories rendent difficile l'évaluation de la production et des réserves, car beaucoup de sources donnent des quantités sans indiquer clairement quelles catégories sont prises ou pas en compte. Il est souvent difficile de faire des comparaisons entre deux pays en étant certain d'avoir des chiffres incluant exactement la même chose. De plus, les limites entre catégories sont parfois floues.

De ce fait notre étude va s'inscrire dans une nouvelle démarche de classification basée sur une propriété importante d'un pétrole brut qui est plus précise et caractéristique pour chaque brut étant donné qu'elle traite des température d'ébullition vraies de chaque fraction pétrolière composant le brut, elle est d'autant plus précise quand l'intervalle de distillation est restreint.

Une modélisation de cette propriété a été réalisée sur une banque de donnée de 26 bruts de différentes origines. Cette modélisation est réalisée en utilisant un outil mathématique appliquant la méthode de distribution GAMMA.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE PETROLE

I.1. Introduction

L'énergie a accompagné l'avènement de la civilisation humaine. Les sciences et les progrès techniques ont permis à l'homme de découvrir des nouvelles ressources énergétiques.

En effet, après la découverte du feu, et son impact sur les populations primitives et plus tard l'utilisation du charbon et la découverte du pétrole, progressivement le pétrole commença à détrôner le charbon qui a été le moteur de la première révolution industrielle.

Aujourd'hui et malgré la mise en place d'autres sources d'énergie comme le nucléaire, l'éolien et le solaire, le pétrole reste la source d'énergie la plus utilisée dans le monde.

I.2. Historique

Il y'a certainement beaucoup plus de 50 siècles depuis que le pétrole et le gaz naturel sont connus dans le monde, cela n'a rien d'étonnant puisque certains gisements du moyen orient étaient presque à fleur de sol et dégageaient en abondance et en permanence des gaz inflammables.

Initialement, on utilisera son huile et son asphalte pour la construction, pour alimenter les lampes de pétrole et également en pharmacie. En 700 avant Jésus Christ le pétrole est utilisé pour la première fois à des fins militaires.

Après le déclin de la civilisation musulmane qui a introduit quelques utilisations du pétrole, l'Europe commence à découvrir le pétrole, c'est ainsi que dès le 16ème siècle le pétrole ou plus exactement le bitume figure en bonne place dans le célèbre ouvrage d'Agricola « de remétallica » publié en 1556¹.

Il faut arriver à 1859, date du premier sondage entrepris par Drake aux Etats-Unis, pour que les quantités obtenues puissent faire l'objet d'une véritable industrie avec la construction de la première raffinerie en 1860 à Titusville en Pennsylvanie ².

I.3. Définition

Le pétrole est l'une des substances les plus consommées dans la société moderne. Elle nous fournit non seulement de la matière première pour la production des matières plastiques et autres produits finis, mais aussi peut être utilisé dans la production d'énergie, industrie, chauffage et transport.

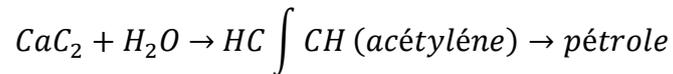
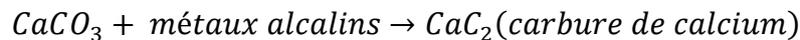
Le mot « pétrole » ou « petroleum » en anglais dérive du latin *petrapierre*) et *oleum*(huile) soit « huile de pierre » qui fait référence à l'hydrocarbure qui se situe dans des roches profondes sous forme gaz, liquides, semi-solides ou solides³.

I.4. Origine du pétrole

Il existe deux théories sur l'origine du pétrole : l'origine minérale et l'origine organique. Les deux théories ont été intensément débattues depuis les Années 1860, peu de temps après la découverte du pétrole³.

Il y'a eu de nombreuses tentatives de postulat décrivant en détail l'origine du pétrole. Ainsi la première formulation a commencé avec l'hypothèse minérale .En effet, Berthelot en

1866 a considéré l'acétylène comme matériau de base des constituants du pétrole brut. Initialement, les carbures inorganiques ont été formés par l'action de métaux alcalins sur des carbonates, après quoi l'acétylène a été produit par la réaction des carbures avec de l'eau.



Il y'a eu aussi plusieurs théories récentes relatives à la formation du pétrole d'origine minérale (Gold et Soter, 1980 et 1982, Szatmari, 1989)³.

Ainsi, Ces théories expliquent que les grandes quantités de carbone existent naturellement dans la planète, certaines sous forme d'hydrocarbures sont moins denses que les fluides aqueux situés dans les pores, et c'est pour cette raison qu'ils migrent vers le haut à travers des réseaux de fractures profondes, les formes de vies microbiennes rupicoles thermophiles sont en partie responsables des bio-marqueurs présent dans le pétrole. Cependant, leur rôle dans la formation, l'altération ou la contamination des différents hydrocarbures n'est pas encore bien comprise.

Du point de vue chimique les théories inorganiques sont intéressantes en raison de leur importance historique, mais elles n'ont pas reçu beaucoup d'attention. Les méthodes géologiques et chimiques ont démontré l'activité optique des constituants du pétrole, la présence de composés organiques et la présence quasi exclusive de l'huile dans les roches sédimentaires. D'autres théories ont tenté d'établir une corrélation entre la présence de couches de charbon et de pétrole dans la croûte terrestre, le charbon étant le précurseur du pétrole brut. Les recherches chimique et géologique ne supportent pas cette idée et donc elle est considérée comme obsolète.

Quant à la théorie organique, elle est considérée aujourd'hui comme la plus vraisemblablement défendue par Engler et Hofer qui ont obtenu en effet en laboratoire des hydrocarbures à partir de poissons et de végétaux.

On peut se demander, cependant, comment d'immenses gisements ont pu s'élaborer à partir de matières organiques animales ou végétales. Or, on connaît de nos jours des exemples d'élaboration de telles accumulations : les deux plus connus sont la « plage des méduses » dans la mer ligure et la 'prairie d'algues' de la mer des Sargasses⁴.

D'après les hypothèses les mieux confirmées, ce serait surtout à partir de la microfaune (plancton) et de la microflore que ce serait formé le pétrole. La matière organique se serait ainsi accumulée au fond de la mer, mélangée à des sédiments fins et formant avec eux le 'sapropel' qui est un limon putréfié. La pression développée au fur et à mesure par l'accumulation des sédiments au cours des temps géologiques, la température, l'action de bactéries en milieu réducteur, c'est-à-dire en absence d'oxygène, auraient petit à petit facilité la transformation de ce 'sapropel' en pétrole.

La présence de bactéries dans certains gisements de pétrole, la présence d'azote, de soufre et parfois de phosphore dans les pétroles naturels, la présence presque générale d'eau

salée en bordure des gisements de pétrole sont autant d'arguments pour la théorie organique de l'origine du pétrole ⁴.

I.5. Composition du pétrole brut

Les composés chimiques sont divisés en deux groupes : minéraux et organiques, en fonction de leur origine⁵.

Actuellement ils peuvent être synthétisés en laboratoire. Ceux qui ne contiennent que du carbone (C) et de l'hydrogène (H) sont appelés hydrocarbure et ils forment le plus grand groupe de composés organiques. Il existe plusieurs milliers de différents composés hydrocarbonés dans le pétrole brut. Les composés d'hydrocarbures ont une formule générale notée C_xH_y , où x et y sont des nombres entiers. L'hydrocarbure le plus léger étant le méthane (CH_4) et représente le principal composant du gaz naturel. En général, les hydrocarbures sont divisés en quatre groupes :

- des paraffines,
- des oléfines,
- des naphènes,
- des aromatiques.

Les paraffines, oléfines, et naphènes sont parfois appelés aliphatiques par rapport aux composés aromatiques. Les paraffines sont divisées en deux groupes : les normales paraffines et les iso paraffines⁵.

Les normales paraffines ou n-paraffines ou n-alcanes, sont des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne droite. C'est la plus grande série d'hydrocarbures dont le plus simple est le méthane (CH_4).

Les normales paraffines sont simplement écrites comme n-paraffines ou des n-alcanes et sont des molécules linéaires d'hydrocarbures saturés à chaîne droite. C'est la plus grande série d'hydrocarbures et qui commence avec le méthane (CH_4)⁵.

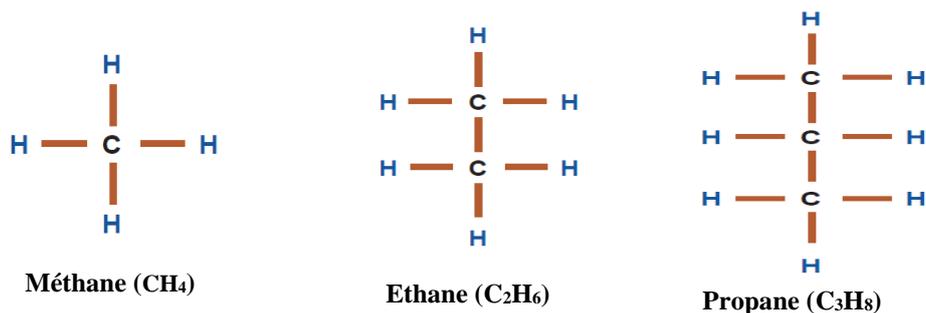


Figure 1 : Méthane, Ethane, Propane⁶

Le deuxième groupe de paraffines est appelé iso paraffines, ce sont des hydrocarbures de type ramifié dont le premier de la série est l'isobutane (méthylpropane), qui a la même formule brute que le n-butane (C_4H_{10}). Les composés ayant des structures différentes mais de même formule brute sont appelés isomères.

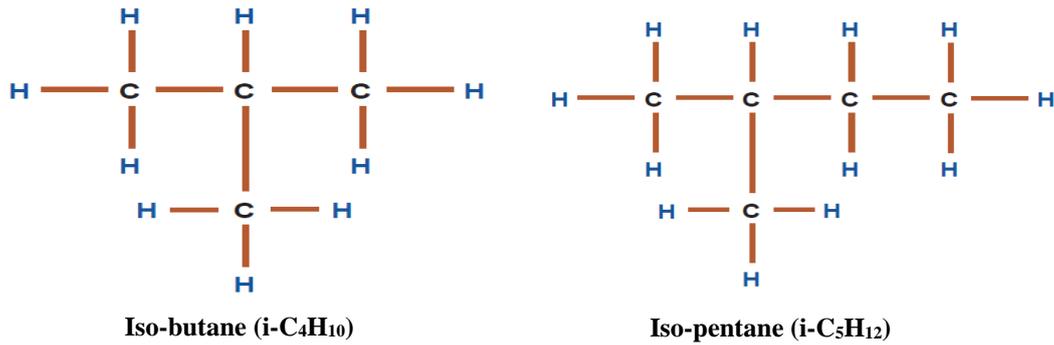


Figure 2 : Iso-Butane, Iso-pentane⁶

Dans les conditions standards de température et de pression, les quatre premiers composés de la série d'alcane (méthane, éthane, propane et butane) sont à l'état gazeux, tandis que de C₅H₁₂ (pentane) à n-hexadécane (C₁₆H₃₆) sont à l'état liquide, et à partir du n-heptadécane (C₁₇H₃₈), les composés existent sous forme solide.

Les paraffines de C₁ à C₄₀ sont présents généralement dans le pétrole brut et représentent jusqu'à 20% en volume⁶.

Les naphènes ou les cyclo-alcane sont des hydrocarbures saturés cycliques ayant la formule générale C_nH_{2n}. Le cyclopentane (C₅H₁₀), le cyclohexane (C₆H₁₂), et leurs dérivés tels que le n-alkyl cyclopentanes se retrouvent également dans les pétroles bruts.

Les hydrocarbures naphéniques avec un seul cycle sont appelés monocycloparaffines ou mononaphènes. Dans les pétroles lourds, les multi cycles saturés attachés les uns aux autres qui sont appelés poly naphènes ou bien poly-cycloparaffines peuvent également être présents. Des études thermodynamiques montrent que les naphènes avec cinq et six atomes de carbone sont les hydrocarbures naphéniques les plus stables. Le pourcentage des cycloparaffines dans le pétrole peut varier et atteindre 60%⁶.

Les hydrocarbures à chaîne ouverte non saturée et qui ont au moins une double liaison carbone-carbone, font partie de la série des oléfines ou alcènes. La double liaison n'est pas plus forte que la liaison simple ; au contraire, elle rend le composés chimiquement instable et donc plus réactif. Dans les chaînes carbonées plus longues, il peut y avoir deux doubles liaisons, ces molécules sont appelées dioléfines (ou diènes), comme par exemple le butadiène CH₂=CH-CH=CH₂.

Les Aromatiques sont des hydrocarbures très importants qu'on retrouve dans la composition de tous les pétroles. Les aromatiques sont des hydrocarbures cycliques insaturés qui commencent avec la molécule de benzène (C₆H₆) et contiennent des doubles liaisons. Le nom aromatique se réfère au fait que ces hydrocarbures ont généralement une odeur parfumées.

Le benzène est toutefois connu pour être un composé cancérigène. Pour cette raison, la quantité de benzène autorisée dans les produits pétroliers tels que l'essence ou le gasoil est en général limitée. Dans les conditions normales, le benzène, le toluène et le xylène existent sous forme liquide par contre que le naphthalène est solide. Les composés aromatiques les plus fréquents dans le pétrole brut sont le benzène et ses dérivés avec un groupement méthyle, éthyle,

propyle et autres composés plus lourds. Cette série d'aromatiques est appelé alkylbenzènes de formule générale C_nH_{2n-6} (où $n > 6$). Le naphthalène et ses dérivés, qui ont seulement deux cycles insaturés, sont parfois appelés diaromatiques. Tous les pétroles bruts contiennent des aromatiques. Cependant, les pétroles lourds contiennent plus de cycles insaturés de benzène et naphène attaché les uns aux autres. Ces cycles sont appelé poly aromatiques. Habituellement, les pétroles bruts lourds contiennent plus d'aromatiques que les bruts légers. La quantité d'aromatiques dans les liquides de charbon est généralement élevée et pourrait atteindre jusqu'à 98% en volume⁵.

Généralement, les poly aromatiques avec une masse molaire élevé contiennent plusieurs hétéroatomes tels que le soufre (S), l'azote (N), ou l'oxygène (O) mais sont toujours considérés comme étant des aromatiques⁵.

Le soufre est l'hétéroatome le plus important dans le pétrole et il peut se retrouver dans les composés cycliques ou non cycliques. La quantité de soufre dans un brut peut varier de 0,05 à 6% en poids. La présence de soufre dans les produits finis est nuisible, par exemple, la présence de soufre dans l'essence peut favoriser la corrosion du moteur. Les quantités d'azote et d'oxygène dans les pétroles bruts sont généralement inférieures à la quantité de soufre. En général, la composition du pétrole brut en éléments varie très peu par rapport à la base suivante :

Tableau 1 : Composition du pétrole Brut⁵

Carbone (C)	83% - 87%
Hydrogène (H)	10% - 14%
Azote (N)	0.1% - 2.0%
Oxygène (O)	0.05% - 1.5%
Soufre (S)	0.05% -6%
Métaux (Nickel, Vanadium, cuivre)	<1000 ppm (0.1%)

Généralement, dans les pétroles lourds à densité élevée, les proportions de carbone, de soufre, d'azote et d'oxygène augmentent, mais la quantité d'hydrogène et la qualité diminuent.

Les concentrations de vanadium au-dessus de 2 ppm dans les produits semi-finis peuvent provoquer une corrosion sévère dans les turbines et une détérioration du réfractaire dans les fours. Ni, Va, et Cu peuvent également gravement affecter les activités des catalyseurs. La teneur en métal peut être réduite par extraction avec des solvants organiques. Les composés organométalliques sont précipités avec les asphaltes et les résidus⁵.

I.6. Le pétrole dans le monde

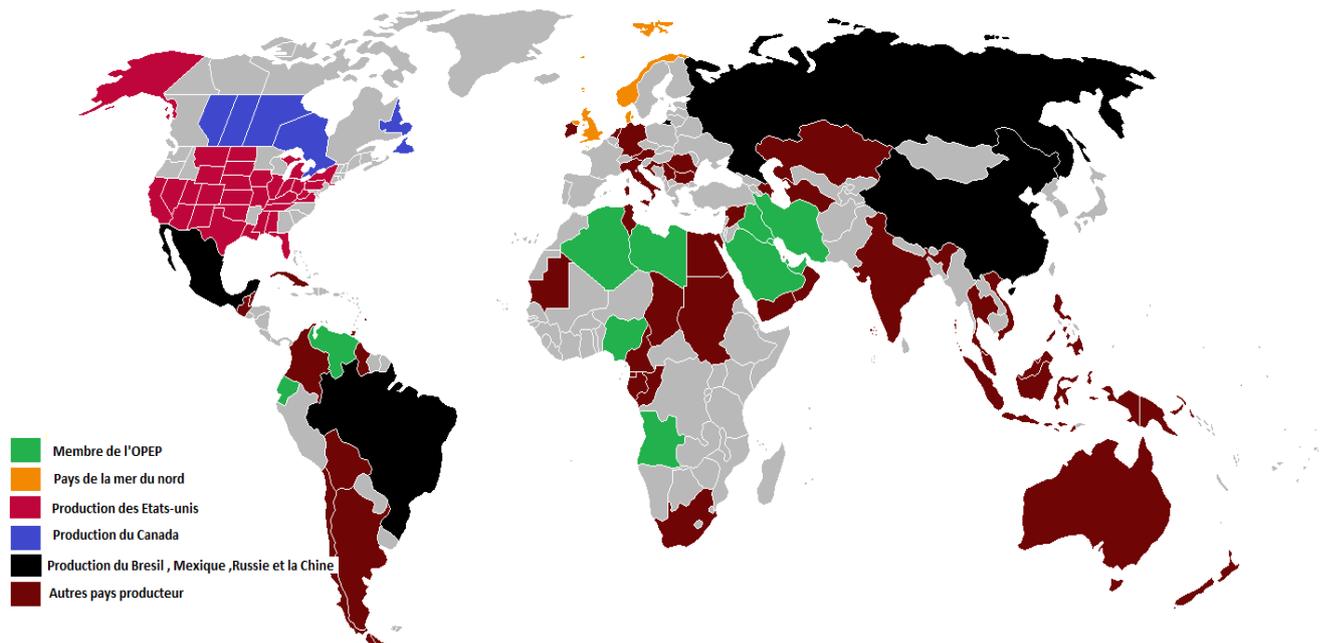


Figure 3 : Pays producteurs de pétrole

Le pétrole est produit dans plus de 200 pays. En 2012, La Russie est classée premier producteur de pétrole Brut au monde dépassant l'Arabie Saoudite⁷.

Nous donnons dans le tableau ci-dessous la production en milliers de barils/ jour des plus grands pays producteurs en 2013 :

Tableau 2 : Production baril jour des plus grand pays producteur⁷

Classement	Pays	Production (milliers barils/jour)
1	Russie	10 054
2	Arabie Saoudite	9 693
3	Etats-Unis	7 442
4	Chine	4 164
5	Canada	3 325
6	Emirat Arabe	2 820
18	Algérie	1 462

Quant aux réserves prouvées, plus de 40% se situent au Venezuela et en Arabie Saoudite, comme le montre la carte suivante⁷ :

World proved crude oil reserves in 2013

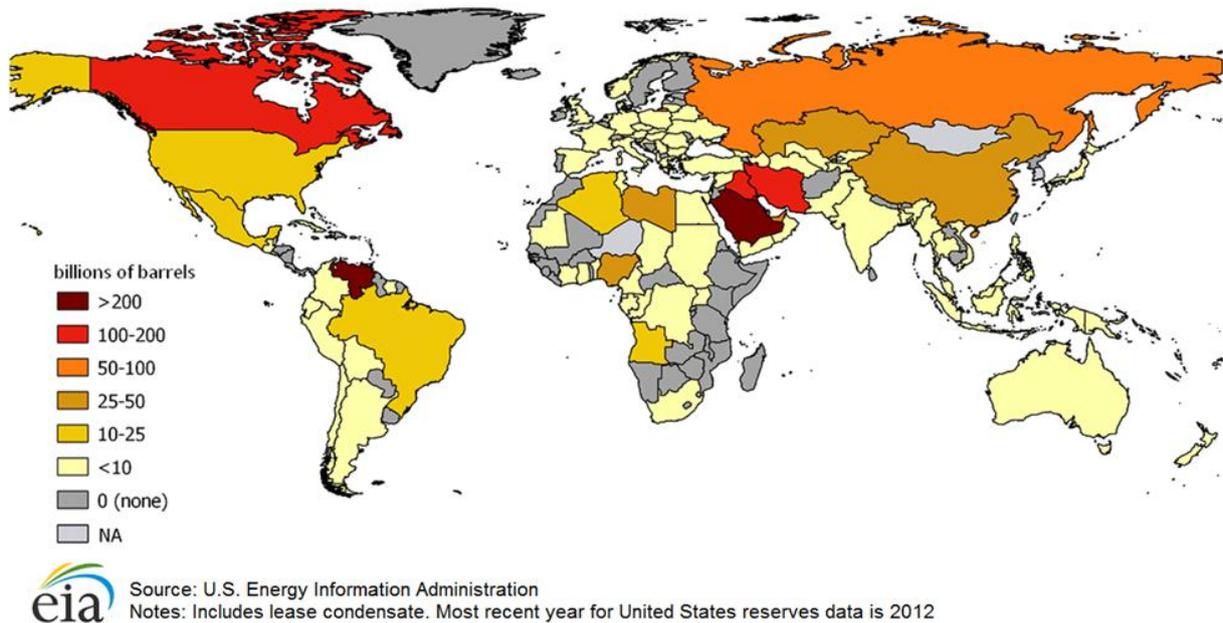


Figure 4 : Réserves prouvées du pétrole dans le monde⁷

En ce qui concerne la consommation, les États-Unis d'Amérique est le pays le plus consommateur de pétrole avec 21% comme part de la consommation mondiale, comme l'indique le tableau suivant⁷ :

Tableau 3 : Consommation en baril jour⁷

Classement	Pays	Consommation (Milliers de barils /jour)
1	Etats-Unis	18 961
2	Chine	10 303
3	Japon	4 531
4	Inde	3 509
5	Russie	3 515
35	Algérie	380

I.7. Raffinage

L'objectif du raffinage du pétrole brut est de fractionner le pétrole brut en fractions légères (C1-C4), naphta / essence, kérosène, diesel, et résidu atmosphérique. Certaines de ces coupes peuvent être commercialisées directement, tandis que d'autres nécessitent un traitement ultérieur dans d'autres unités de raffinage pour les rendre commercialisables⁸.

La première étape de traitement en raffinerie, après le dessalage du pétrole brut, est la séparation du pétrole brut en un certain nombre de fractions par distillation. La distillation est effectuée à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique.

Comme illustré dans la figure 5, l'huile brute est chauffée dans un four avant d'être envoyée dans une tour de distillation atmosphérique, où elle est séparée en butanes et gaz humide plus léger, une charge naphta non stabilisée, une charge naphta lourde, kérosène, gasoil atmosphérique et une charge raffinée de brut. Ce dernier est envoyé à la tour de distillation sous vide et séparé en gasoil et résidu sous-vide. Ce résidu est traité par un procédé appelé « cokéfaction » pour produire des gaz humides, une essence, du gasoil et du coke. Sans une unité de cokéfaction, cette charge serait vendue comme fioul lourd ou asphalte approprié. Historiquement, ces charges sont vendues pour environ 70% du prix du pétrole brut.

Les gasoils des différentes provenances sont envoyés dans une unité de craquage catalytique ou bien une unité d'hydrocraquage. Ces unités transforment les molécules lourdes de poids moléculaire élevé en molécules plus légères avec une température d'ébullition qui correspond à une essence ou un distillat⁹.

Les naphtas légers issus des différentes provenances sont envoyés vers des unités d'isomérisation pour convertir les paraffines à chaîne linéaire en isomères afin d'augmenter leur indice d'octane. Les naphtas lourds de différentes provenances sont introduits dans l'unité de reforming catalytique pour améliorer leur indice d'octane. Les produits du reforming catalytique sont mélangés avec les essences normales et super pour être commercialiser.

Les flux de gaz humide des différentes provenances sont séparés dans la section de récupération de vapeur en gaz combustible, gaz liquéfié (GPL), hydrocarbures insaturés (propylène, butylène et pentènes), n-butane, et isobutane. Le gaz combustible est brûlé comme combustible dans les fours de raffinerie et le butane normal est envoyé vers la section essences ou GPL. Les hydrocarbures insaturés et l'isobutane sont envoyés vers l'unité d'alkylation⁹.

L'unité d'alkylation utilise soit l'acide sulfurique ou l'acide fluorhydrique comme catalyseur pour faire réagir les oléfines avec l'isobutane pour former les iso paraffines qui ont des températures d'ébullition voisines de celles des essences.

Les distillats des différentes provenances sont envoyés vers le pool du kérosène ou du diesel. Dans certaines raffineries, le gasoil lourd sous vide et le brut réduit sont transformés en huiles lubrifiantes avec quelques procédés de désasphaltage, désaromatisation et stabilisation.

Chaque raffinerie a son propre système de traitement qui tient compte des technologies disponibles, des caractéristiques du pétrole brut, des coûts d'exploitation et de la demande en produits finis⁹.

La figure suivante représente le schéma global de raffinage.

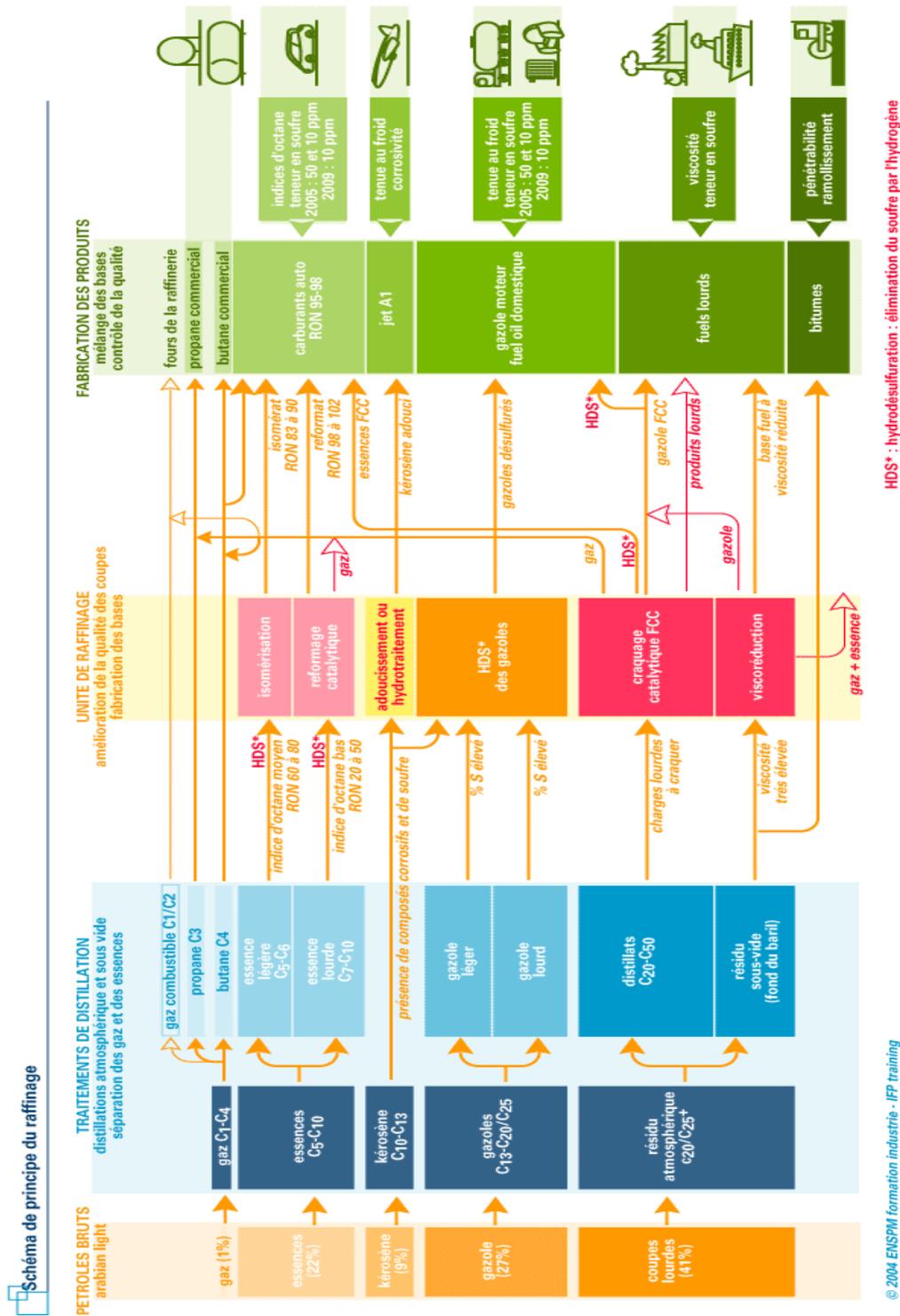


Figure 5 : Schéma général d'un raffinage du pétrole¹⁰

CHAPITRE II
PROPRIETES PHYSIQUES ET THERMODYNMIQUES
DU PETROLE ET DES FRACTIONS PETROLIERES

II. Propriétés physiques et thermodynamiques du pétrole et des fractions pétroliers

Introduction

La base pour la conception et la simulation de beaucoup d'unités de traitement chimique est un ensemble de propriétés physiques et thermodynamiques des composés dans un processus qui subit une certaine forme de transformation.

Tout au long de ce chapitre, nous présentons quelques propriétés physiques et thermodynamiques des hydrocarbures purs, de leurs mélanges ainsi que celles des fractions pétrolières.

II.1. Masse volumique, densité et degré °API

La masse volumique est la spécification principale pour les produits pétroliers. Elle est définie comme étant la masse d'une unité de volume du matériau à une température spécifiée. Elle est donnée par g/cm^3 .

Une autre propriété générale plus large, est la densité. C'est le rapport de la masse volumique du pétrole à la masse volumique de l'eau qui dépend de la température à laquelle ont été mesurées les densités des deux produits (pétrole et eau). Lorsque la température de l'eau est 4°C (39°F), La densité est égale à la masse volumique dans le système CGS, parce que le volume de 1 g d'eau à cette température est, égale par définition 1ml. Elle est définie pour deux températures standards identiques, soit 60°F : ($\text{SpGr}_{60/60^\circ\text{F}}$), c'est-à-dire environ de la densité à 15°C . Un autre concept est utilisé également pour mesurer la densité : le degré API, défini par l'Américain Petroleum Institute comme étant une fonction hyperbolique de la densité^{1,11}.

$$^\circ\text{API} = \frac{141.5}{\text{Sp.Gr}_{60^\circ\text{F}}} - 131.5 \quad (1)$$

II.2. Viscosité

La viscosité est une grandeur physique qui mesure de la résistance interne d'un liquide à l'écoulement¹¹.

Son unité s'exprime en centistokes (cSt) dans le CGS. Habituellement, les mesures de viscosité sont réalisées à 100°F et 210°F ¹².

Nous distinguons trois types de viscosités :

II.2.1. La viscosité dynamique absolue

Si au sein d'un fluide, un élément de surface S glisse à la vitesse dv en opposant la force résistante F, sur une couche de même superficie distante de dx , la **viscosité dynamique absolue** μ (Mû) s'écrit¹³

$$\mu = \frac{F}{S} \left(\frac{dx}{dv} \right) \quad (2)$$

Elle s'exprime en Pascals-secondes ou, plus fréquemment, en milliPascals-secondes, correspondant à l'ancienne unité, la centiPoise¹¹.

II.2.2. Viscosité relative

C'est le rapport de viscosité de produit à celle de l'eau à 20°C¹.

II.2.3. Viscosité cinématique absolue ν

On utilise plus fréquemment la **viscosité cinématique absolue** ν , quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

ν : S'exprime en m²/s ou, mieux, en mm²/s. L'ancienne unité, le centistoke, équivaut à 1mm²/s.

La viscosité cinématique est déterminée par la mesure du temps d'écoulement du produit liquide dans un tube capillaire calibré (selon norme ASTM D 4445 ou NF T 60-100). Elle est évidemment d'autant plus élevée que la température est basse. Elle intervient de façon prépondérante dans la mise en œuvre et la combustion des produits pétroliers moyens et lourds¹³.

II.3. Tension de vapeur

La tension de vapeur mesure la tendance des molécules à s'échapper d'une phase liquide pour engendrer une phase vapeur en équilibre thermodynamique. Il existe de nombreux diagrammes représentant les courbes de tension de vapeur des hydrocarbures purs jusqu'à 8 ou 10 atomes de carbone dans la molécule.

Ces diagrammes seront utilisés pour la détermination des tensions de vapeur des HC légers en occurrence l'essence, exigeant une bonne précision de la TVR (tension de vapeur Reid) qui est une caractéristique essentielle de l'essence.

La TV s'exprime en g/cm² ou en psi.

L'essai de tension de vapeur est très important, car il indique, d'une manière indirecte, la teneur en produits très légers qui conditionnent la sécurité au cours du transport, les pertes au stockage et la volatilité des essences¹⁴.

Le dispositif expérimental est décrit par la figure 6.

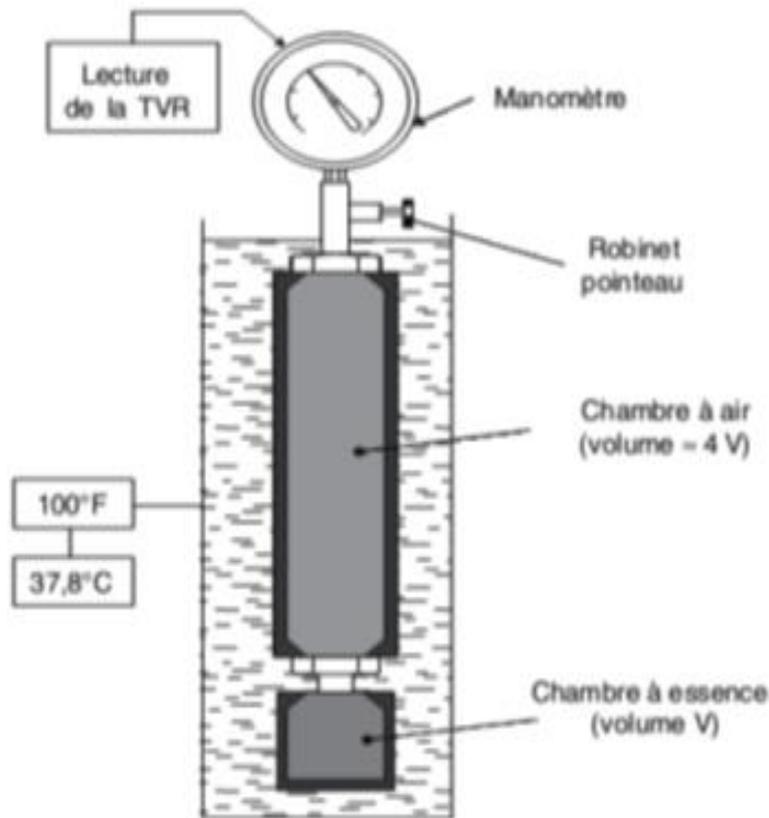


Figure 6 : Dispositif de mesure de pression de vapeur REID¹

La Tension de vapeur Reid (TVR) est une mesure de la tension de vapeur exercée par le pétrole qui caractérise la volatilité des produits à 100 ° F¹¹.

II.4. Teneur en soufre

C'est le pourcentage en poids (ou ppm) de la teneur en soufre total déterminé expérimentalement dans un échantillon de pétrole ou de son produit.

Outre la densité, la teneur en soufre des pétroles bruts est prise en considération, dans la détermination du prix des produits pétroliers¹¹.

Le soufre est présent en quantités très variables (entre 0,5 et 5 %) dans les différents pétroles bruts. Il se trouve toujours en plus forte concentration dans les fractions les plus lourdes (fuels, résidus), où il est combiné dans des structures chimiques très complexes¹³.

Habituellement, le pétrole brut contient à la fois du soufre organique et inorganique dont le soufre minéral est prédominant.

La présence de soufre en quantités importantes dans le pétrole brut va imposer des opérations d'hydrotraitement supplémentaires dans le processus de raffinage¹².

II.5. Point d'écoulement

Il est défini comme la température la plus basse (5 ° F) à laquelle le pétrole s'écoule. Plus la teneur en paraffine est élevée, plus le point d'écoulement est élevé¹¹.

Quand un produit pétrolier est refroidi, un trouble, correspondant à l'apparition des premiers cristaux des paraffines apparaît, à une certaine température appelée point de trouble. A une température encore plus basse, le produit de s'écouler : le point d'écoulement est atteint¹².

II.6. Point de congélation

Le point de congélation est la température à laquelle cesse de couler le produit refroidi lentement à une vitesse déterminée dans un tube à essai normalisé. On apprécie la mobilité du produit en penchant légèrement le tube¹⁵.

II.7. Points critiques (T_c , P_c , V_c , Z_c)

Les propriétés critiques sont des caractéristiques physiques des corps purs. La température et la pression critiques définissent le point limite supérieur de la courbe de tension de vapeur, au-delà duquel le changement de phase n'est plus observé. En ce point, la densité et la composition des deux phases liquide et vapeur sont identiques ; la séparation d'un tel mélange est donc impossible en ce point. La connaissance du point critique permet de prévoir le comportement des substances dans un large domaine de températures et de pressions par le biais de la loi des états correspondants ou des équations d'état.

Dans un domaine de coordonnées pression-température, les équilibres de sublimation, de fusion et de vaporisation d'un corps pur sont représentés par trois courbes qui convergent au point triple et délimitent les domaines relatifs aux états liquide, solide et gaz. Dans le cas d'un mélange, la courbe d'équilibre de vaporisation se décompose en deux courbes :

- ✓ Courbe de bulle.
- ✓ Courbe de rosée.

Cependant, malgré ces différences entre les courbes P-V-T des corps purs et des mélanges de corps purs, dans les deux cas, l'équilibre entre la phase liquide et la phase gazeuse est impossible au-delà d'un point "C" appelé point critique. Ce point, qui a pour coordonnées, T_c , P_c , V_c (température, pression et volume critiques), constitue la limite au-dessus de laquelle la coexistence des deux phases liquide et vapeur n'est plus possible ; il correspond à l'identité parfaite des propriétés du liquide et de la vapeur : densité, indice de réfraction ; en particulier la chaleur de vaporisation devient nulle.

L'isotherme passant par le point critique "C" présente un point d'inflexion, souvenir d'un palier de liquéfaction évanescent. Cette caractéristique de l'isotherme critique se traduit alors par les deux expressions algébriques suivantes :

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T_c} = 0 \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T_c} = 0 \quad (5)$$

Ces deux équations constituent le critère de stabilité thermodynamique auquel doivent obéir toutes les équations d'état¹⁶.

II.8. Point d'éclair et point de feu

Le point d'éclair et le point de feu sont des propriétés importantes pour la sécurité et le transport des produits pétroliers.

Le point d'éclair est la température minimale à laquelle il faut le porter pour que les vapeurs émises s'enflamment en présence d'une flamme dans des conditions normalisées.

Le point de feu est défini par la température minimale à laquelle le brut s'enflamme en présence d'une flamme et continue à brûler pendant un temps d'au moins cinq secondes, lorsque la flamme est retirée¹⁵.

La figure 7 donne un schéma du dispositif expérimental.

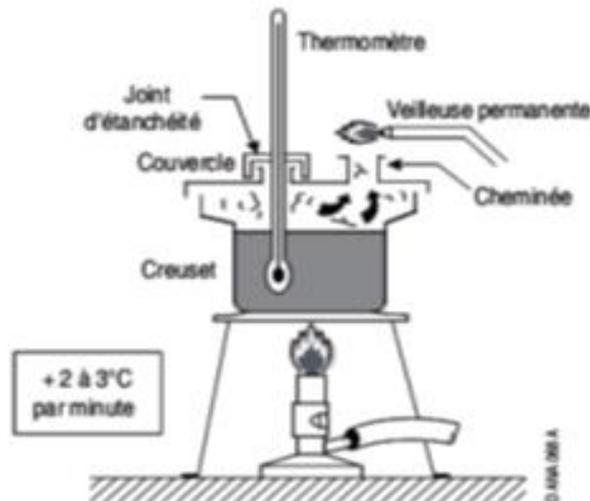


Figure 7: Dispositif de mesure du point d'éclair¹

II.9. Teneur en sel

La teneur en sel, exprimée en milligrammes de chlorure de sodium par litre du brut (ou en pounds/baril) indique la quantité de sel dissous dans l'eau présente dans le brut. Une teneur élevée en sel dans un pétrole brut engendre des problèmes de corrosion au cours du processus de raffinage. Une teneur en sel supérieure à 10 lb / 1000 barils (exprimés en NaCl) nécessite dessalage¹⁷.

II.10. Volume molaire

Le volume molaire d'un corps pur est le volume qu'occupe une mole de ce corps à une température donnée T et une pression donnée P. Il est relié à la masse molaire M et à la densité d par la relation suivante :

$$V_M = \frac{M}{d_T} \quad (6)$$

Le volume molaire des hydrocarbures purs augmente avec le nombre d'atomes de carbone. Pour même nombre de carbone, le volume molaire diminue quand on passe des paraffines aux aromatiques, les naphthéniques possédant des volumes intermédiaires¹⁸.

II.11. Point d'aniline

Le point d'aniline d'un brut ou d'une fraction pétrolière est défini comme la température minimale à laquelle des volumes égaux d'aniline et du produit à examiner sont complètement miscibles. L'aniline est un composé aromatique avec une structure d'une molécule de benzène, où un atome d'hydrogène est remplacé par le groupe -NH₂. Le point d'aniline est également utilisé comme un paramètre de caractérisation de la qualité des carburants diesel. Il est mesuré par la méthode d'essai ASTM D 611. Au sein d'une même famille d'hydrocarbures, le point d'aniline augmente avec le poids moléculaire, mais pour le même nombre de carbone, le point d'aniline augmente quand on passe des composés aromatiques aux hydrocarbures paraffinés⁵.

II.12. Facteur de caractérisation K_{uop}

Nelson, Watson et Murphy de la société U.O.P (UniversalOilProducts) ont proposé en 1937 une formule qui définit le facteur de caractérisation K_{uop} pour pouvoir rendre compte de la tendance de la fraction pétrolière ou du pétrole brut¹.

$$K_{uop} = \frac{(T_{éb})^{\frac{1}{3}}}{SpGr_{60}^{60}} \quad (7)$$

Avec :

$T_{éb}$: température d'ébullition (°R).

$SpGr_{60}^{60}$: Densité à 15°C.

Généralement, Le facteur de caractérisation K_{uop} varie entre 10,5 et 12.5 pour la plupart des bruts ¹².

Pour le pétrole brut ;

$T_{éb}$ représente la température moyenne pondérée du pétrole brut (°R)

$$T_{éb} = \frac{T_{20} + T_{50} + T_{80}}{3} \quad (8)$$

T_{20} , T_{50} , T_{80} sont les températures correspondant aux pourcentages distillés 20, 50,80% respectivement en (°R).

CHAPITRE III
LA DISTILLATION TBP
(True Boiling Point)

III.1. La distillation

La distillation est une analyse primordiale voire la plus importante en raffinage car elle permet de connaître le rendement de chaque coupe pétrolière. Elle consiste à séparer les différents constituants d'un mélange selon leur volatilité de façon à obtenir une distribution des points d'ébullition en fonction du pourcentage poids ou du pourcentage volume du mélange recueilli. Cette distribution est dénommée courbe de distillation. La distillation TBP (*True Boiling Point*) réalisée selon trois normes : ASTM D2892, ASTM D86, ASTM D1160 et ASTM D5236¹⁹.

La distillation D2892 est une technique qui utilise une colonne de 15 à 18 plateaux théoriques avec un taux de reflux de 5:1. Cette distillation peut se faire sous pression atmosphérique et sous pression réduite (jusqu'à 2mmHg). Elle peut s'appliquer au pétrole brut, ainsi qu'à toutes les coupes pétrolières dont les points d'ébullition s'étendent de 0 à 400°C.

La distillation D86 est une distillation à pression atmosphérique qui utilise une colonne avec un seul plateau réel. Elle permet de distiller les coupes pétrolières dont les points d'ébullition se situent entre 0 et 400°C. La courbe distillation est représentée en fonction du pourcentage de volume recueilli.

La distillation sous pression réduite (0.1 à 50 mmHg) est utilisée pour fractionner les coupes lourdes. En effet, à pression atmosphérique et au-delà d'une température 340°C, les molécules commencent à subir des réactions de craquage thermique d'où l'intérêt travailler sous pression réduite ¹⁹.

III.2. Introduction à la distillation TBP (True Boiling Point)

Les propriétés du pétrole et des fractions pétrolières font usage de la TBP, ceci est très utile pour la caractérisation de pétrole, pour la conception et le fonctionnement des unités de raffinage, pour la classification du pétrole, pour le développement des corrélations des propriétés du pétrole.

Cependant, lorsque la TBP est appliquée à des fractions lourdes de pétrole, on rencontre souvent des difficultés. Habituellement, l'évaluation de la courbe de TBP des fractions lourdes pétrolières est effectuée par des méthodes ASTM D2892 et ASTM D5236, mais on ne peut pas aller au-delà de certaines températures. Pour des températures élevées, il n'existe pas une méthode bien établie, permettant d'améliorer le traitement de pétrole brut²⁰.

III.3. Principe

La T.B.P est une opération fondamentale de séparation dans le domaine du raffinage. Elle fait l'objet de la méthode ASTM D2892 correspondant à une technique de laboratoire²⁰.

C'est une distillation discontinue permettant la séparation d'un pétrole brut ou d'une fraction d'hydrocarbures en fonction de la température d'ébullition²¹.

Cette technique est envisagée lorsque nous voulons avoir des informations plus précises sur le brut à analyser ²².

On peut dire aussi que la distillation **TBP** correspond à une technique de laboratoire permettant de donner une image presque exacte de la composition d'un pétrole brut, par la mesure de la température d'ébullition des constituants qui le composent d'où son nom²³.

La distillation TBP est une technique qui utilise une colonne de 10 plateaux théoriques avec un taux de reflux de 5,1 et une charge pouvant varier entre 0.5 et 100 litres²⁶.

Elle comporte trois étapes¹⁶ :

✓ La **TBP** est d'abord effectuée sous une pression atmosphérique jusqu'à ce que la température dans le bouilleur atteigne une limite correspondant au début de cracking du résidu.

✓ Nous avons alors recours à une distillation sous un vide de 40 mmHg puis de 10 mmHg.

✓ Si le résidu obtenu est relativement important, on procède à une autre distillation sous un vide plus poussé.

L'appareillage permet de travailler soit à pression atmosphérique, soit sous pression réduite (jusqu'à 2mmHg=0,2666 kPa).

En effet, au-delà d'une température de 320-340°C dans le bouilleur, on assiste à un début de craquage thermique du résidu. Si l'on arrête alors la distillation, le résidu contenu dans le bouilleur constitue le résidu atmosphérique. Pour pouvoir poursuivre la distillation il faudra travailler sous vide, ce qui permet de réduire la température dans le bouilleur.

A la fin de l'opération de la distillation, on recueille un résidu sous vide(RSV).

Il existe des appareils commerciaux qui passent automatiquement de la distillation atmosphérique à la distillation sous pression réduite, la courbe finale obtenue exprime la température à la pression atmosphérique en fonction du % poids ou % volume recueilli¹⁶.

La figure 8 représente l'appareillage utilisé pour cette distillation

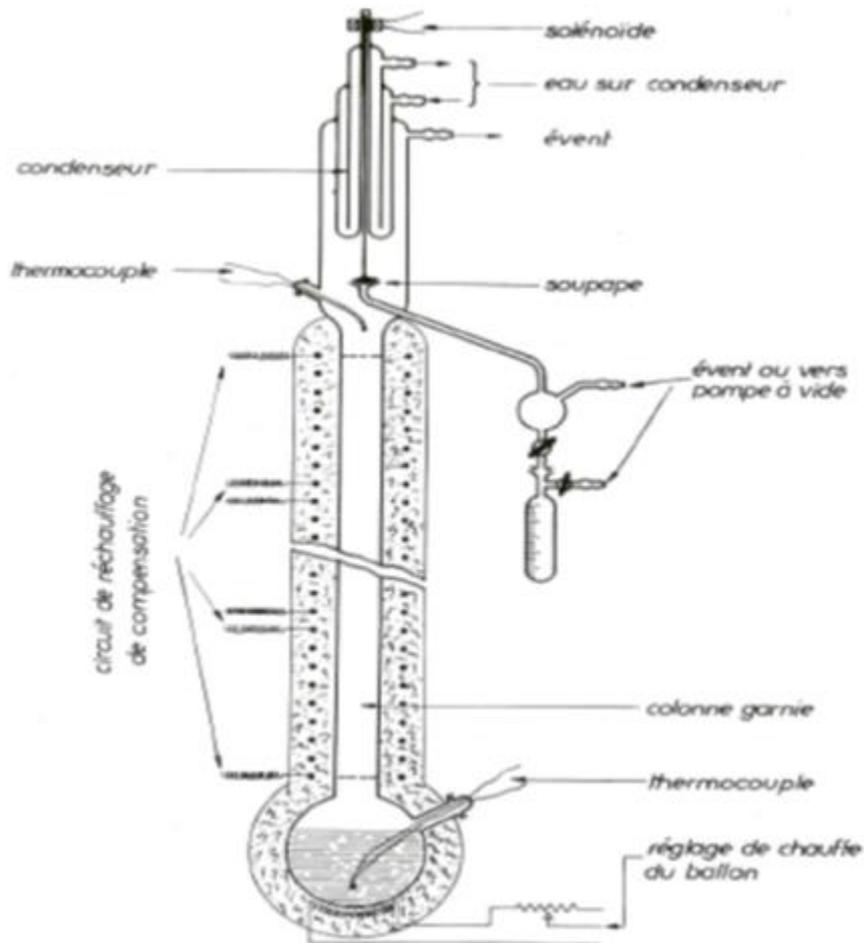


Figure 8 : Schéma d'un appareil de distillation de type TBP²⁶.

III.4. Application de la distillation TBP

Elle s'applique aux pétroles bruts stabilisés (débutanisés) mais peut s'étendre à un mélange pétrolier quelconque sauf les gaz de pétroles liquéfiés, les naphthas très légers et les fractions ayant un point initial d'ébullition au-dessus de 400°C¹⁶.

A l'issue de cette distillation, on peut ¹⁶ :

- recueillir des gaz liquéfiés, des coupes de distillation et un résidu.
- déterminer les rendements des coupes à la fois en poids et en volume.
- tracer une courbe de distillation représentant la température en fonction du %poids ou du % volume recueilli.

La distillation TBP présente une haute sélectivité de séparation, puisqu'elle décompose le pétrole en une multitude de coupes ayant un intervalle de distillation très étroit. Ceci, va nous permettre de les considérer comme des hydrocarbures purs fictifs dont le point d'ébullition sera égal à la moyenne arithmétique des températures initiale et finale de distillation ²³ :

$$t_{éb} = \frac{t_i + t_f}{2} \quad (9)$$

La courbe **TBP** présente la variation des pourcentages volumiques cumulés des fractions pétrolières récupérées en fonction de leurs températures d'ébullition, elle permet d'effectuer le découpage du pétrole brut, dans le but de déterminer les rendements des différents produits connus dans l'industrie pétrolière et les comparer avec les spécifications exigées par des normes.

On donnera un exemple de découpage de pétrole brut, où les différentes coupes sont classées par ordre croissant de poids moléculaires et par intervalle de distillation²³.

	Gaz combustible	C ₁ -C ₂
	Propane	C ₃
0°C	Butane	C ₄
140 – 180°C	Essence légère 2 à 4 coupes lourde	C ₅ -C ₁₀
180 – 250°C	Kérosène	C ₁₀ -C ₁₄
250 – 440°C	Gas-oil léger 2 à 3 coupes moyen lourd	C ₁₄ -C ₂₀
440 – 570°C	Distillats 2 à 4 coupes	C ₂₀ *
	Résidu sous vide	

↓

Température d'ébullition normale

Figure 9 : Exemple de découpage de pétrole brut Algérien²⁶

III.5. Corrélations utilisées pour la prédiction de la température d'ébullition des fractions pétrolières

Comme il a été déjà souligné auparavant, la température d'ébullition n'a pas de sens pour un mélange, puisque celle-ci passe de l'état liquide à l'état vapeur dans un intervalle de températures plus ou moins large, selon la température d'ébullition des constituants. Pour une détermination rapide de la composition ; on réalise au niveau de laboratoire une distillation ASTM. Pour une connaissance plus précise, c'est la distillation TBP qui est mise en œuvre. Les résultats de distillation sont habituellement traduits graphiquement. Selon les différents pourcentages, nous obtenons trois températures moyennes d'ébullition, correspondant au point 50% ; volumétrique (t_v), pondérale (t_p) et molaire (t_m). La valeur moyenne pondérée des trois valeurs définies précédemment est la température moyenne pondérée ou température mean average (t_{mav}). La température mean-average est déterminée par des abaques (figure 10). Pour déterminer cette température (T_{mav}) il est nécessaire de connaître le parcours de la courbe de distillation, c'est- à dire t₀, t₁₀, t₂₀, t₅₀, t₇₀ et t₈₀.

La température volumétrique pour un pétrole brut s'écrit, à partir de la TBP

$$t_v = \frac{t_0 + 4t_{50} + t_{100}}{6} \tag{10}$$

Ou :

$$t_v = \frac{t_{20} + t_{50} + t_{80}}{3} \tag{11}$$

La pente S s'écrit :

$$S = \frac{t_{70} - t_{10}}{60} \tag{12}$$

Il est nécessaire de définir alors les incréments nécessaires pour atteindre les autres températures, la température moléculaire T_m , la température pondérale TP et enfin la température pondérée t_{mav} .

$$t_v = t_p + \beta \tag{13}$$

$$t_v = t_m + \gamma \tag{14}$$

$$t_v = t_{mav} + \alpha \tag{15}$$

α , β et γ sont des incréments lus sur des abaques, on porte l'incrément en fonction de la pente, pour les températures volumétriques considérées²².

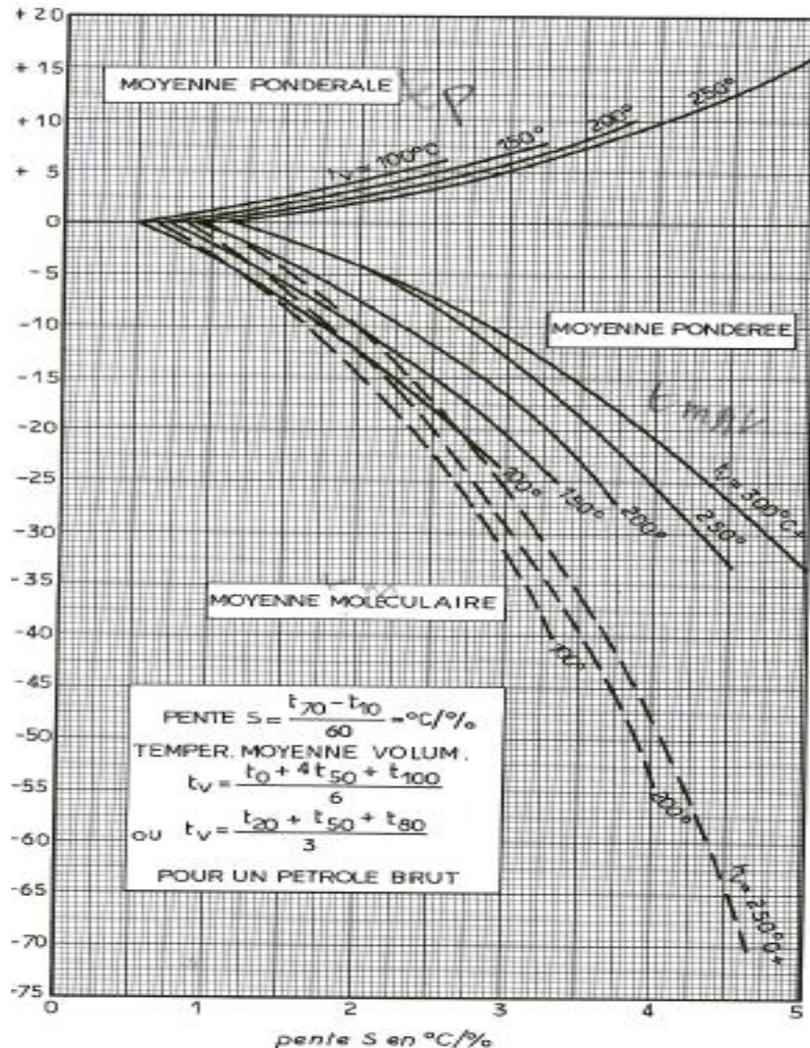


Figure 10 : Détermination des températures moyennes d'ébullition à partir de la TBP²⁶.

CHAPITRE IV
CLASSIFICATION DES PETROLES
BRUTS

IV.1. Introduction

Bien qu'il n'existe pas de méthodes spécifiques pour la classification des pétroles bruts, il serait utile d'établir des critères simples pour quantifier la qualité d'un brut. De nombreuses tentatives ont été faites pour concevoir un système de classification des bruts¹¹.

IV.2. Méthodes de classification

IV.2.1. Classification industrielle (selon la densité du pétrole brut)

Cette classification a été définie en termes de propriété physique, elle est basée sur la connaissance du degré ^{24,25} :

Un premier découpage en fonction du degré °API a été proposé :

- Les pétroles sont considérés légers lorsque le °API > 32,
- Les pétroles sont considérés moyens lorsque $22 < °API < 32$;
- Les pétroles sont considérés lourds lorsque °API < 22 ;

Ce découpage n'est qu'une évaluation approximative pour différencier le lourd et le léger, néanmoins on peut trouver d'autres valeurs de découpage selon les régions.

Par exemple, les États-Unis utilisent ce découpage principalement pour les bruts de l'Utah²⁶:

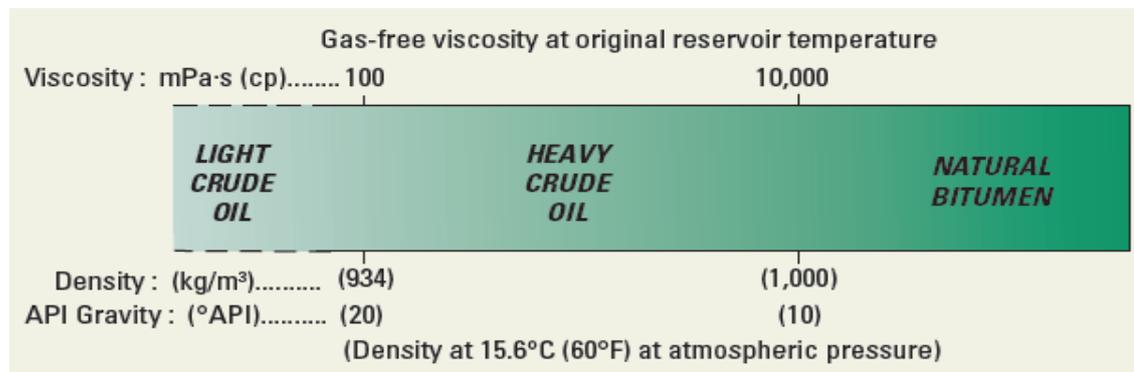


Figure 11 : Intervalle permettant la détermination de la nature d'un pétrole brut²⁶.

Un autre découpage est également utilisé d'après Wauquier¹⁶ :

- ✓ Bruts légers : $d < 0.825 \text{ g/cm}^3$; °API > 40,
- ✓ Bruts moyens : $0.825 < d < 0.875 \text{ g/cm}^3$; $30,2 < °API < 40$,
- ✓ Bruts lourds : $0.875 < d < 1.000 \text{ g/cm}^3$; $30,2 < °API < 10$,
- ✓ Bruts extra lourds : $d > 1.000 \text{ g/cm}^3$; °API < 10.

IV.2.2. Classification chimique

La composition de pétrole obtenue à partir d'un puits est variable et dépend non seulement de la composition initiale in situ, mais aussi du mode de production et de l'état d'avancement ainsi que de la durée de vie du puits ou du réservoir. En général, le pétrole conventionnel est un liquide de couleur qui varie du vert-marron au noir ayant une densité (à 15,6°C) qui varie approximativement entre 0,75 et 1,00 (57° à 10°API), la densité de la plupart des pétroles bruts se situant entre 0,80 et 0,95 (45°-17°API). L'intervalle d'ébullition du pétrole varie à partir de 20°C (68°F) environ à plus de 350°C (660°F) au-dessus de laquelle une décomposition est activée si la distillation est poursuivie. Les hydrocarbures peuvent contenir de 0 à 35% ou plus d'essence, ainsi que des proportions variables de kérosène et autres sous-produits³.

Comme mentionné plus haut les hydrocarbures présents dans le pétrole sont classés en trois familles :

1. Paraffines.
2. Cyclo paraffines (naphtènes).
3. Aromatiques.

En plus des constituants d'hydrocarbures, le pétrole contient des espèces hétéroatomiques mais qui sont présents en minorité par rapport aux hétéroatomes macromoléculaires contenus dans le kérogène (Costantinides et Arich, 1967 ; Tissot et Welte, 1978).

Une classification largement utilisée qui distingue entre les pétroles bruts à base de paraffine ou à base d'asphalte, cela peut être déterminé si la cire de paraffine se sépare de certains pétroles bruts lors du refroidissement, alors que d'autres ne montrent aucune séparation. Les termes à base d'asphalte ou de paraffine ont été introduits et sont toujours utilisés (van Neset van Westen, 1951).

La présence de cire de paraffine se reflète généralement dans la nature paraffinique de ces fractions, et une forte teneur en asphalte est due à des propriétés naphténiques des fractions correspondantes.

Dans la pratique, une distinction est souvent faite entre bruts légers et lourds qui, en combinaison avec la distinction précédente (paraffine, asphalte, etc.), double le nombre de classes possibles³.

a) Le facteur K_{uop}

Ce facteur est peut-être l'un des facteurs le plus largement utilisé dans la classification et est défini par la formule²⁷ :

$$K = \frac{\sqrt[3]{T}}{d} \quad (16)$$

Dans laquelle T est la température moyenne d'ébullition du brut, ou d'une fraction du brut exprimée en degrés absolus Rankine et d est la densité.

Lorsqu'on détermine le K_{uop} d'hydrocarbures purs, on constate qu'il croit dans le sens K_{uop} (aromatiques) $<$ K_{uop} (naphtènes) $<$ K_{uop} (paraffines)²⁷.

Ainsi, Le K_{uop} du benzène est de 9.78, celui du cyclohexane de 11.04 et celui de l'hexane normal de 12,90. On peut alors repérer la nature chimique d'un mélange d'hydrocarbures par la valeur du K_{uop} ²⁷:

- ✓ $K=13$ Paraffinique normaux et iso.
- ✓ $K=12$ Mixte.
- ✓ $K=11$ Naphténique ou aromatique légèrement substitué.
- ✓ $K=10$ Aromatiques.

Les bruts contiennent tous des hydrocarbures aromatiques, mais ceux-ci ne sont jamais dominants. Ce sont la structure paraffinique et naphténiques qui dominant, et, en principe, le K_{uop} des bruts est toujours situé entre 11 et 12,5²⁷.

b) Classification à partir des corrélations

Une première tentative pour donner un système de classification est la suivante : Est qualifié d'asphaltique, un brut dont le résidu de distillation contient moins de 2% de cire et paraffinique s'il contient plus de 5%. Une classification selon la composition chimique de la fraction située entre 250°C-300°C a été utilisée (tableau 5), mais une difficulté réside dans le fait que, les fractions bouillant au-dessus de 200°C peuvent appartenir à plusieurs familles d'hydrocarbures. Des molécules purement naphténiques ou aromatiques sont rares ; les composés cycliques contiennent généralement des chaînes latérales paraffiniques et souvent même des cycles aromatiques et naphténiques côte à côte³.

1. Classification selon CI

L'indice de corrélation, développé par l'US Bureau of Mines, est une fonction de la densité et de la température d'ébullition en degrés Kelvin. Ainsi :

$$CI = 473.7d - 456.8 + \frac{48.640}{T_{eb}} \quad (17)$$

Où :

T_{eb} : La température d'ébullition (°K).

d : la densité (Gruse et Stevens, 1960).

D'après les valeurs de cet indice, le pétrole est de nature :

- ✓ Paraffinique pour des valeurs : $0 < CI < 15^3$.
- ✓ Naphténique ou mixte (mélange des trois familles pour des valeurs : $15 < CI < 50^3$).
- ✓ Aromatiques : $CI > 50^3$.

Une information plus détaillé sur la composition chimique peut être fournie au moyen de l'indice de corrélation (CI)³.

Tableau 4 : La composition du pétrole à partir de la classification CI³

%Paraffine	%Naphténe	%Aromatique	%Cire	%Asphalte	Classification
[46 – 61]	[22 – 32]	[12 – 25]	<10	<6	Paraffinique
[42 – 45]	[38 – 39]	[16 – 20]	<6	<6	Paraffin-naphténe
[15 – 26]	[61 – 76]	[8 – 13]	0	<6	Naphténe
[27 – 35]	[36 – 47]	[26 – 33]	<1	<10	Mélange
<8	[57 – 78]	[20 – 25]	<0.5	<20	Aromatique

2. Classification selon la densité des fractions pétrolières

La densité a été depuis les premières années de l'industrie pétrolière l'un des premiers critères pour apprécier les quantités d'essence ou de kérosène présentes dans le brut. Cette importance a régressé avec l'introduction d'autres propriétés. Néanmoins, quelques pétroles bruts sont toujours évalués par la densité, comme dans le cas des fractions essences et gasoil. L'utilisation des valeurs de densité a été préconisée pour l'application quantitative en utilisant une classification basée sur la densité faite par l'American Petroleum Institute (API) des fractions 250-275°C et le 275-300°C de distillation, comme le montre le tableau 5³.

Tableau 5 : Classification du brut selon le °API des fractions³

250°C-270°C		275°C-300°C		Classification
API Gravité	Type	API Gravité	Type	Classification
>40.0	Paraffinique	>30.0	Paraffinique	Paraffinique
>40.0	Paraffinique	20.1-29.9	Intermédiaire	Paraffinique-Mixte
33.1-9.9	Intermédiaire	20.1-29.9	Paraffinique	Mixte-paraffinique
33.1-39.9	Intermédiaire	20.1-29.9	Intermédiaire	Mixte
33.1-39.9	Intermédiaire	<20.0	Naphténe	Mixte-Naphténe
<33.0	Naphténe	20.1-29.9	Intermédiaire	Naphténe- Mixte
<33.0	Naphténe	<20.0	Naphténe	Naphténe
>44.0	Paraffinique	<20.0	Naphténe	Paraffinique-Naphténe
33.0	Naphténe	>30.0	Paraffinique	Naphténe-Paraffinique

En effet, les études de pétroles bruts provenant de différentes régions à travers le monde ont montré que 85% se retrouve dans l'une des trois catégories : paraffinique, mixtes, ou naphténe.

3. Classification selon la distribution du carbone

Pour la classification des diverses fractions de pétrole, l'utilisation de la méthode n.d.M

(n est indice de réfraction, d est densité, M est masse moléculaire) est suggérée. Cette méthode permet de déterminer la distribution de carbone et indique le pourcentage de carbone dans la structure aromatique (% CA), le pourcentage de carbone dans la structure naphténe (% CN), et le pourcentage de carbone dans la structure paraffine (% CP)³.

Les formules sont données dans le tableau 6²⁸:

Tableau 6 : Classification du brut d'après la méthode n.d.M²⁸

n et d mesurés à 20°C		n et d mesurés à 70°C	
$V = 2,51(n - 1,4750) - (d - 0,8510)$		$V = 2,42(n - 1,4600) - (d - 0,8280)$	
$W = (d - 0,8510) - 1,11(n - 1,4750)$		$W = (d - 0,8280) - 1,11(n - 1,4600)$	
$V > 0$	$\%C_A = 430V + \frac{3660}{M}$	$V > 0$	$\%C_A = 410V + \frac{3660}{M}$
	$R_A = 0,44 + 0,055MV$		$R_A = 0,41 + 0,055MV$
$V < 0$	$\%C_A = 670V + \frac{3660}{M}$	$V < 0$	$\%C_A = 720V + \frac{3660}{M}$
	$R_A = 0,44 + 0,080MV$		$R_A = 0,41 + 0,080MV$
$W > 0$	$\%C_R = 820W - 3S + \frac{10000}{M}$	$W > 0$	$\%C_R = 775W - 3S + \frac{11500}{M}$
	$R_T = 1,33 + 0,146M(W - 0,005S)$		$R_T = 1,55 + 0,146M(W - 0,005S)$
$W < 0$	$\%C_R = 1440W - 3S + \frac{10600}{M}$	$W < 0$	$\%C_R = 1440W + \frac{12100}{M}$
	$R_T = 1,33 + 0,180M(W - 0,005S)$		$R_T = 1,55 + 0,180M(W - 0,005S)$
$\%C_N = \%C_R - \%C_A$			
$\%C_R$ = Pourcent poids de carbone en cycles		R_A = Nombre de cycles aromatiques dans une molécule moyenne	
$\%C_P$ = Pourcent poids de carbone paraffinique		R_N = Nombre de cycles naphténiques dans une molécule moyenne	
$\%C_N$ = Pourcent poids de carbone naphténiq		R_T = Nombre total de cycles dans une molécule moyenne	
$\%C_A$ = Pourcent poids de carbone aromatique		S = Pourcent poids de soufre	

IV.2.3. Classification économique (selon la teneur en soufre)

Une autre classification est faite par rapport à la teneur en soufre²⁹:

- ✓ Les bruts peu soufrés avec moins de 0,5% poids de soufre,
- ✓ Les bruts moyennement soufrés avec une teneur en soufre comprise entre 0,5 et 1,5 %,
- ✓ Les bruts soufrés avec une teneur en soufre supérieure à 1,5%.

Les bruts d'une même zone de production présentent quelques caractéristiques similaires, ainsi³⁰:

- Les bruts du Moyen-Orient sont des bruts moyens ou lourds. Le brut le plus représentatif est l'Arabian light, 34° API et 1,8% de soufre. Mais il existe des bruts plus légers et moins soufrés dans les Emirats Arabes Unis.
- Les bruts d'Afrique de l'Ouest, d'Afrique du Nord (Algérie, Libye) et de mer du Nord sont dans l'ensemble des bruts légers et peu soufrés.
- Les bruts d'Amérique latine (Venezuela et Mexique qui sont les deux exportateurs importants) sont plutôt lourds et riches en soufre.
- En Russie, le brut le plus exporté présente des caractéristiques voisines de celles de l'Arabian light.

CHAPITRE V
GENERALITES SUR LES
LOIS DE PROBABILITE

V.1. Généralités sur les lois de probabilité

Dans des domaines très différents comme le domaine scientifique, sociologique ou médical, on s'intéresse à de nombreux phénomènes dans lesquels apparaît l'effet du hasard. Ces phénomènes sont caractérisés par le fait que les résultats des observations varient d'une expérience à l'autre.

Une expérience est appelée « aléatoire » s'il est impossible de prévoir à l'avance son résultat et si, répétée dans des conditions identiques, elle peut donner des résultats différents³¹.

La simulation informatique de variables aléatoires, aussi complexes soient-elles, repose sur la simulation de variables aléatoires indépendantes très simples, auxquelles sont appliquées des transformations adéquates. La variable aléatoire de base est celle de loi uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$ ³².

V.2. Lois de probabilité continues

Les variables dites « continues » prennent généralement toutes les valeurs d'un intervalle donné, borné ou non, de l'ensemble des nombres réels. L'ensemble des valeurs possibles est dit « domaine de variation »³³.

a) Loi uniforme

Une variable aléatoire X suit une loi uniforme sur $[a, b]$, si X admet pour densité la fonction f définie par³⁴ :

$$f: x \rightarrow \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (18)$$

b) Loi normale ou loi de Gauss

Une variable aléatoire réelle X suit une loi normale d'espérance μ et d'écart type, si cette variable aléatoire réelle X admet pour densité de probabilité la fonction $p(x)$ définie, pour tout nombre réel x , par³⁵ :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (19)$$

Une telle variable aléatoire est alors dite variable gaussienne.

La loi normale est sans doute la plus utile des lois de probabilités théoriques. En effet, elle permet de modéliser beaucoup de distributions statistiques observées et de décrire nombre de phénomènes aléatoires. Elle est aussi très souvent mise à contribution au sein de tests statistiques pour évaluer la fiabilité de certains résultats³³.

c) Loi normale centrée réduite

Une loi normale centrée réduite est une loi normale d'espérance nulle et d'écart-type 1.

d) Loi Log-normale

Une variable aléatoire X suit une loi log-normale de paramètres m (espérances) et σ (écart-type) si la variable $Y=\ln(X)$ suit une loi normale de paramètre m et σ .

La modélisation par la loi log-normale est bien adaptée aux variables strictement positives, suivant une distribution asymétrique avec un allongement vers les valeurs élevées³³.

e) Loi exponentielle

On dit que X suit une loi exponentielle de paramètre $\lambda > 0$; notée $\varepsilon(\lambda)$, si la loi de X a pour densité

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda \exp(-\lambda x) & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (20)$$

La loi exponentielle est utilisée en fiabilité. Le paramètre λ représente le taux moyen de défaillance alors que son inverse, c'est « le temps moyen de bon fonctionnement »³².

f) Loi béta

La loi béta est caractérisée par deux paramètres de forme α et β . Sa fonction de densité de probabilité est comme suit³³

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (21)$$

Tel que $\alpha > 0$ et $\beta > 0$ et $0 \leq x \leq 1$

g) Loi de Weibull

On dit qu'une variable aléatoire X suit la loi de Weibull de paramètres (α, β) (ou $\alpha, \beta \in \mathbb{R}_+^*$) si elle admet pour densité de probabilité la fonction³³ :

$$f(x, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (22)$$

Il n'y a pas « une » loi de Weibull, mais toute une famille de lois, correspondant à diverses valeurs de α et β . Parmi celles-ci, on distingue la loi exponentielle (avec $\alpha = 1$ et $\beta = 1/\lambda$) ou la loi de Rayleigh (avec $\alpha = 2$). Lorsque α est compris entre 1,5 et 2 ou 3 et 3,6, on obtient une loi log-normale³³.

La loi de Weibull est un cas particulier de la loi Gamma.

h) Loi de khi-deux

Une variable aléatoire réelle Y suit une loi du khi-deux à ν degrés de liberté, si elle admet pour densité de probabilité la fonction³³ :

$$f_Y(y) = \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} y^{\frac{\nu}{2}-1} e^{-\frac{y}{2}} \quad (23)$$

Tel que : $\nu \geq 1$ pour tout y positif.

Γ est la fonction gamma d'Euler.

Cette loi est mise à contribution à travers deux tests : le test d'ajustement du Khi-deux (une variable suit ou non une loi normale) et le test d'indépendance (indépendance entre deux variables).

i) Loi Gamma

En 1755, Euler publie un traité de calcul différentiel et intégral où l'on rencontre les fonctions dites aujourd'hui eulériennes. Parmi elles, la plus connue est sans doute l'intégrale eulérienne de seconde espèce, appelée fonction Gamma³³.

La fonction Gamma est définie par l'intégrale suivante³⁶ :

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt \text{ tel que } a > 0 \quad (24)$$

Une variable aléatoire X suit une loi Gamma de paramètres α et β (strictement positifs), si sa fonction de densité de probabilité peut se mettre sous la forme³³ :

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x} \text{ pour tout } x > 0 \quad (25)$$

A partir de cette équation et en attribuant aux paramètres α et β des valeurs particulières, on obtient des formes spécifiques de la fonction³³ :

- En positionnant $\alpha = 1$, la fonction n'est autre que la densité de probabilité d'une distribution exponentielle de paramètre $\lambda = \frac{1}{\beta}$
- Lorsque $\alpha = \frac{n}{2}$ (avec n entier) et $\beta = 2$, la fonction représente la distribution du Khi-deux à n degrés de liberté.

La distribution gamma est populaire en partie grâce à sa flexibilité, en effet elle admet un décalage de forme qui peut prendre une variété de formes, de l'exponentielle à la normale. Cette souplesse est due au fait que la distribution de gamma possède deux paramètres.

La loi Gamma est une loi de probabilité dont la portée est très vaste. En effet, une grande diversité de phénomènes réels peut être approchée par une fonction Gamma. Son domaine de prédilection est une distribution à valeurs positives, fortement asymétrique, et dotée d'une queue de distribution à décroissance rapide³³.

En pratique, elle est souvent utilisée dans le domaine des assurances, pour décrire les phénomènes de durée de vie ou évaluer le temps écoulé entre deux sinistres, ou encore dans les applications phylogénétiques³³.

La fonction Excel GAMMA.DIST renvoie la probabilité d'une variable aléatoire suivant une loi gamma³⁷.

Syntaxe de la fonction gamma sous Excel³⁷.

GAMMA.DIST(x ; α ; β ; cumulative), tel que :

1. X : la variable aléatoire où nous voulons évaluer la distribution
2. α : un paramètre de la distribution

3. Beta : un paramètre de la distribution, si $\beta=1$ la fonction retourne la valeur de la loi gamma standard.
4. Cumulative : Une valeur logique qui détermine la forme de la fonction ; si elle est TRUE elle retourne la distribution cumulative, si elle est FALSE elle retourne une densité de probabilité.

PARTIE EXPERIMENTALE

Le travail expérimental sera axé sur les 26 pétroles bruts sélectionnés. Pour faciliter le travail, ils seront identifiés dans le texte par des lettres alphabétiques allant de A à Z.

Notre étude se compose de quatre parties distinctes :

- 1- Présentation des propriétés des pétroles bruts étudiés : la densité à 15°C et la distillation TBP de chaque pétrole brut.
- 2- Classification des pétroles bruts selon les méthodes classiques existantes citées précédemment dans le chapitre 04.
- 3- Modélisation de la propriété TBP des pétroles légers moyens et lourds par la mise en œuvre d'une nouvelle méthode basée sur la loi de probabilité appelée méthode de distribution *Gamma*. Cette modélisation nous a permis d'établir un diagramme délimitant trois zones de classification des pétroles bruts.
- 4- Validation de la méthode élaborée.

Pour ce faire, une banque de données de 26 pétroles bruts d'origines différentes, a été collectée et analysée. Le critère de base de choix de ces pétroles brut est la densité. La gamme de valeurs de cette propriété varie de 0.7760 à 0.9395.

I. Présentation des propriétés des pétroles étudiés

I.1. Les densités des pétroles étudiés

Les densités des différents bruts étudiés sont données par le tableau suivant :

Tableau 7 : Densités des pétroles étudiés

N°	Brut	d_4^{15}	N°	Brut	d_4^{15}
1	Brut A	0.7760	14	Brut N	0.8756
2	Brut B	0.7806	15	Brut O	0.8827
3	Brut C	0.7807	16	Brut P	0.8845
4	Brut D	0.7840	17	Brut Q	0.8889
5	Brut E	0.7963	18	Brut R	0.8927
6	Brut F	0.8098	19	Brut S	0.8939
7	Brut G	0.8114	20	Brut T	0.9030
8	Brut H	0.8128	21	Brut U	0.9036
9	Brut I	0.8137	22	Brut V	0.9090
10	Brut J	0.8144	23	Brut W	0.9123
11	Brut K	0.8470	24	Brut X	0.9154
12	Brut L	0.8588	25	Brut Y	0.9325
13	Brut M	0.8597	26	Brut Z	0.9395

Selon ce tableau, à partir des valeurs de densité nous pouvons constater que les pétroles classés de A à E ont de faibles densités car elles sont inférieures à $d=0.8000$, les pétroles de T à Z ont des densités très élevées, tandis que les pétroles F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, ont des valeurs de densité moyenne.

I.2. Distillation TBP des pétroles bruts

La distillation TBP est traduite par des courbes appelées courbes TBP. Ces dernières sont tracées en mettant en œuvre les températures en fonction des pourcentages volumiques ou pondéraux distillés pour des intervalles de température bien définis.

Les résultats sont les suivants :

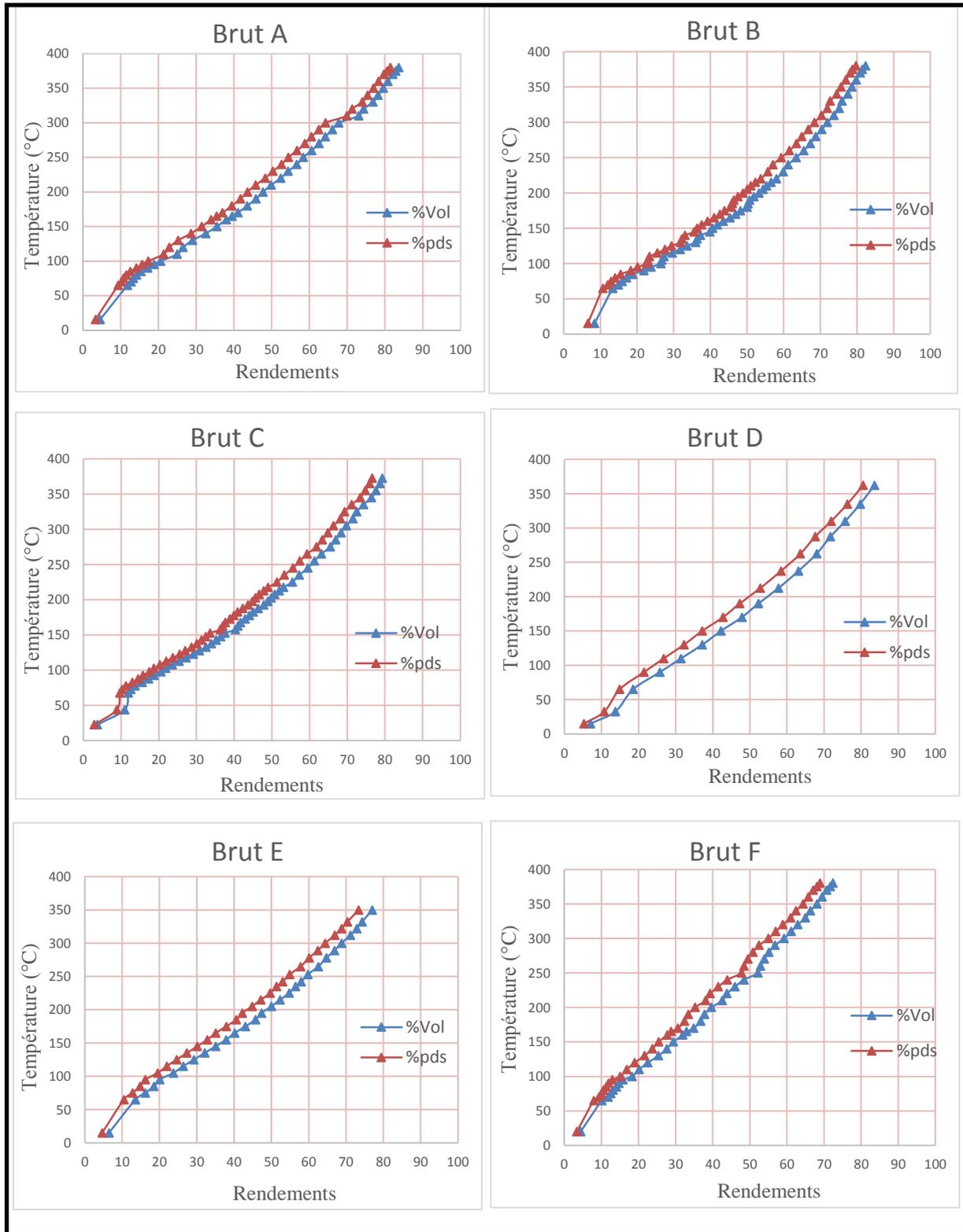


Figure12 : Courbes TBP des bruts de A à F.

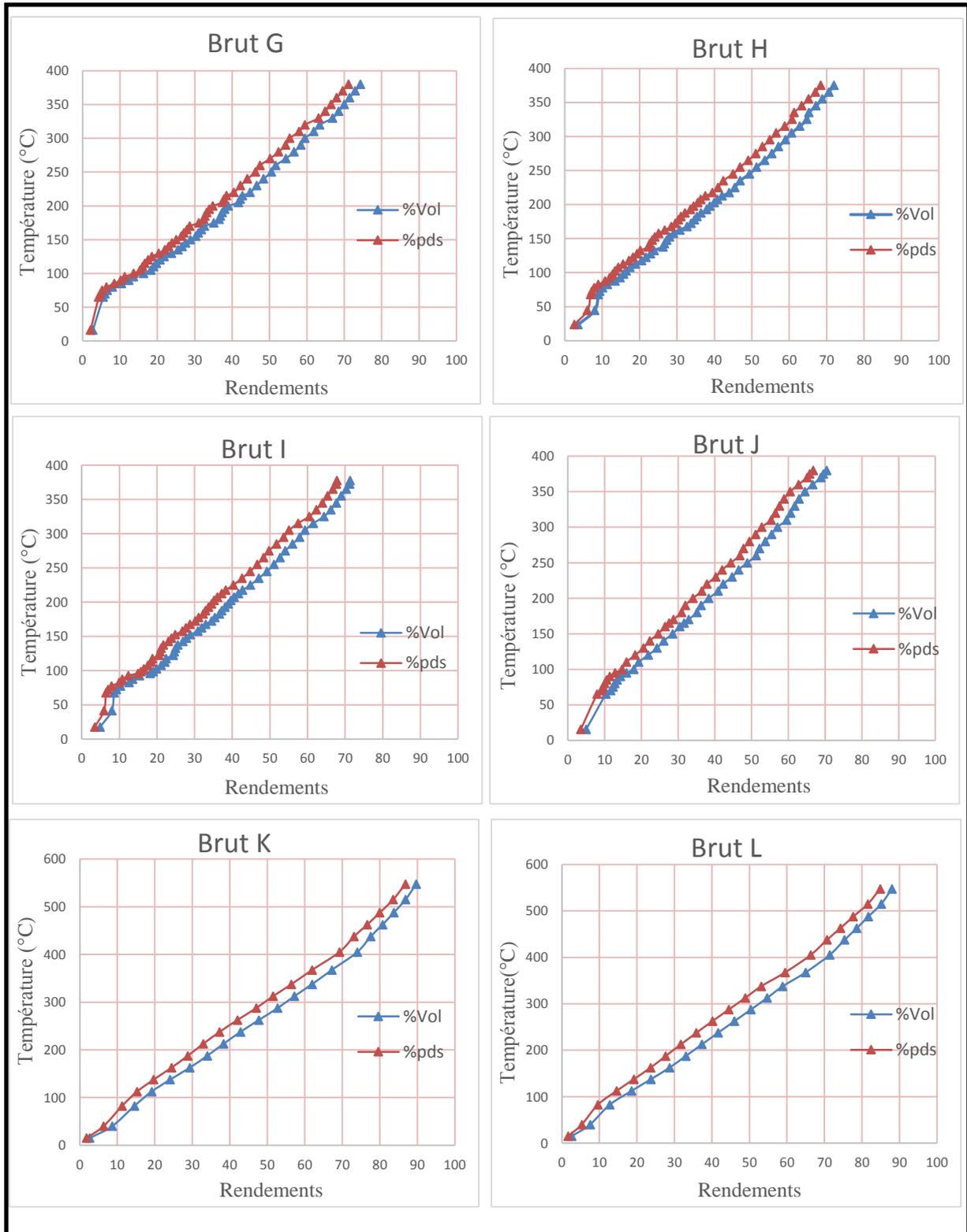


Figure13 : Courbes TBP des bruts de G à L.

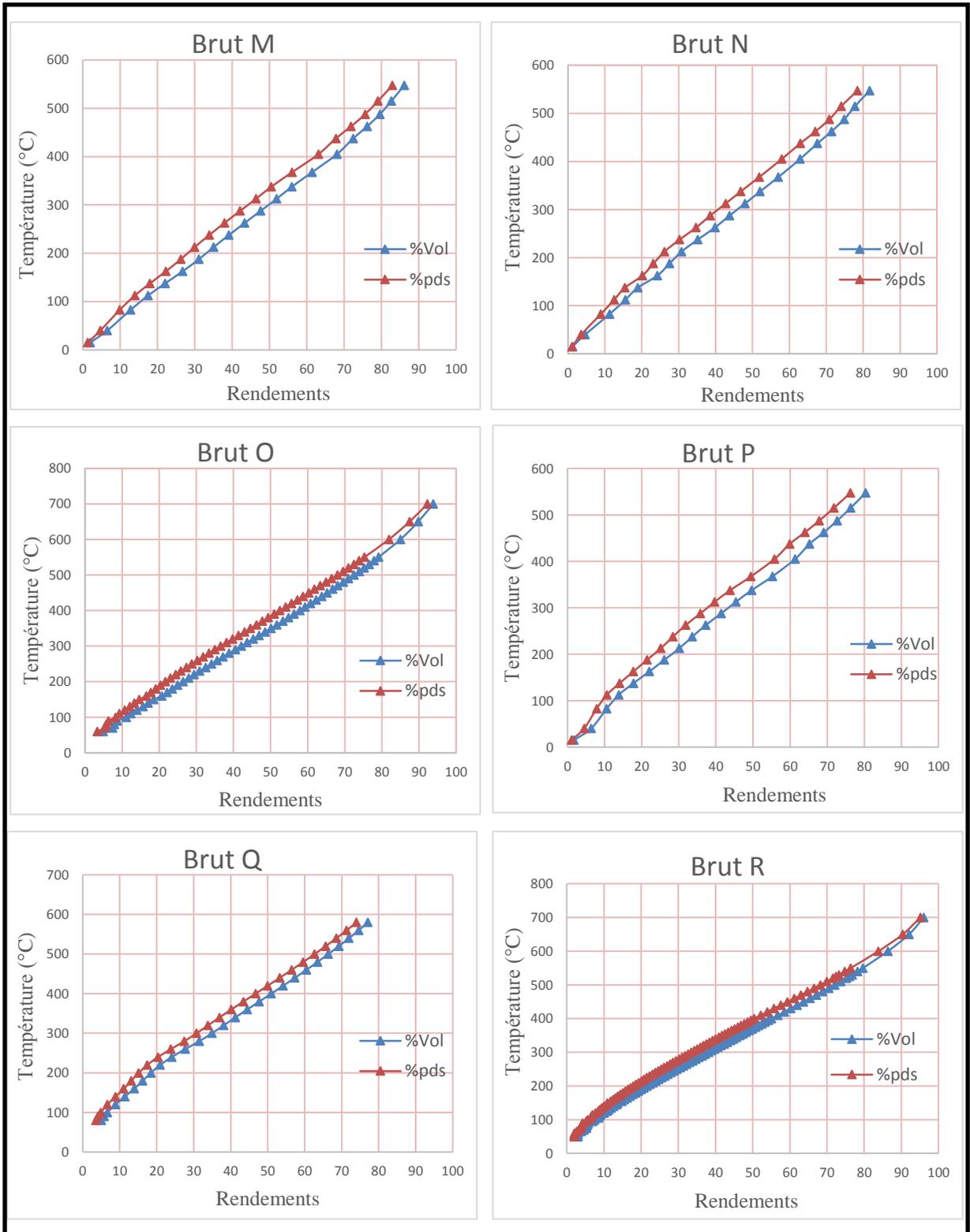


Figure 14 : Courbes TBP des bruts de M à R

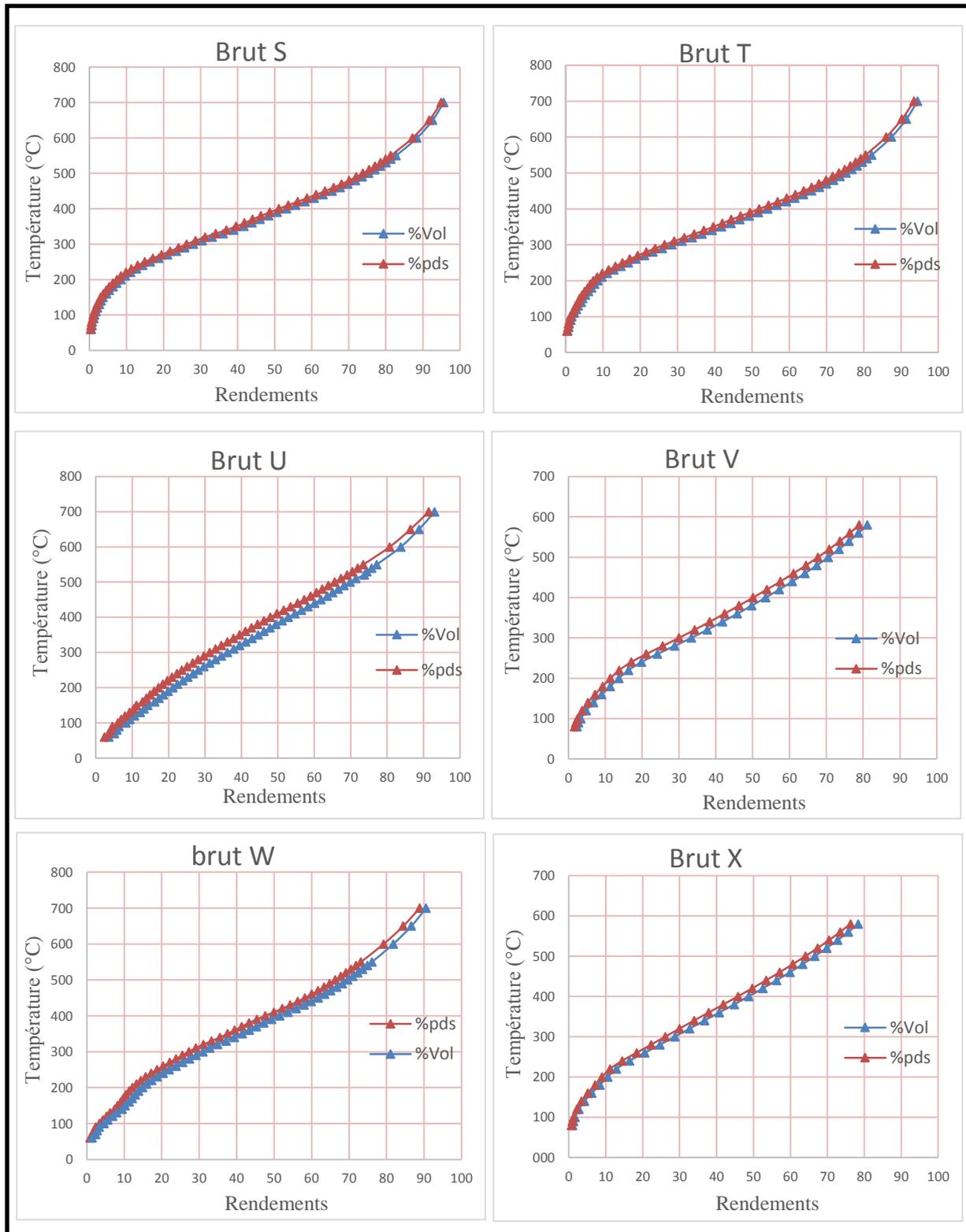


Figure 15 : Courbes TBP des bruts de S à X.

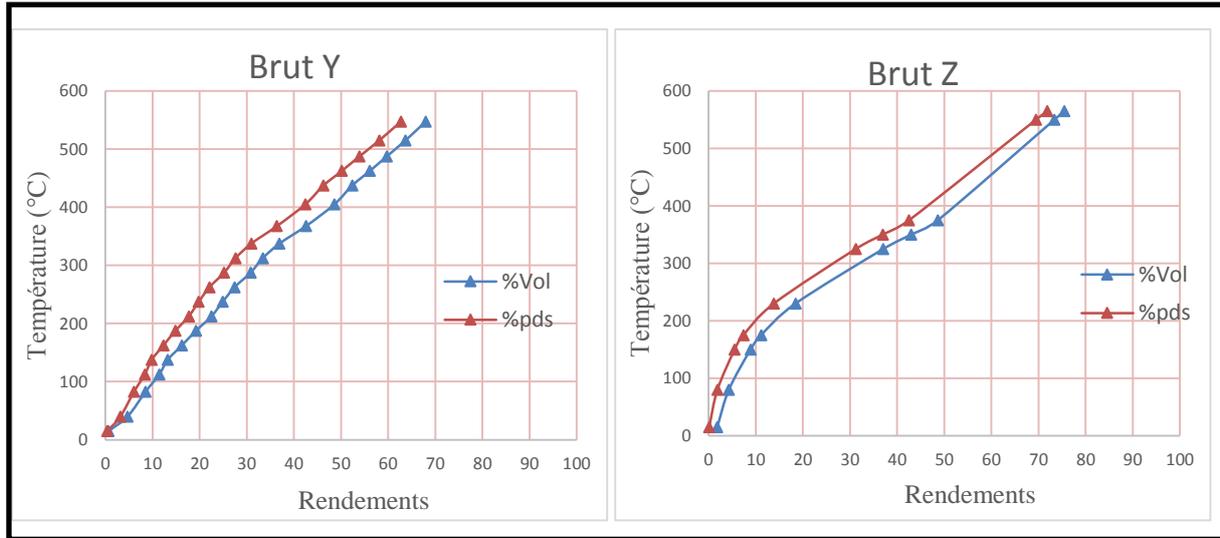


Figure 16 : Courbes TBP des bruts Y et Z.

D'après les graphiques nous pouvons dire que les courbes TBP volumiques et massiques nous donnent des informations caractéristiques pour chaque pétrole brut ceci est démontré par la forme des courbes qui diffèrent d'un pétrole à un autre tout en gardant les mêmes tendances. Les courbes %vol et %pds donnent des allures identiques pour un même pétrole brut

Nous utiliserons pour la suite de ce travail les TBP tracées à partir du % volumique.

Nous remarquons que pour certaines TBP, les températures initiales sont un peu élevées, ceci s'explique par la perte de produits légers pour des raisons des conditions de préparation du brut avant de procéder à sa distillation TBP.

II. Classification des pétroles bruts par des méthodes classiques

Afin de pouvoir comparer les méthodes de classification existantes, nous avons appliqué trois méthodes de classification disponibles dans la littérature pour classer les différents pétroles bruts étudiés :

- Industriel,
- Chimique,
- Et économique.

Ces méthodes sont basées sur le facteur de caractérisation appelé K_{uop} , sur le degré API des fractions, l'indice de corrélation CI et le °API des pétroles.

II.1. Classification industrielle (selon °API du pétrole brut)

Cette méthode nous permet de classer les pétroles en termes de propriétés physiques à partir de leurs °API.

Tableau 8 : Classification selon le °API des pétroles

Pétrole	°API	Classification de pétrole selon le °API	Classifications selon API Utilisée aux États-Unis	Classifications selon API d'après Wauquier
Brut A	50,8	Léger	Léger	Léger
Brut B	49,8	Léger	Léger	Léger
Brut C	49,7	Léger	Léger	Léger
Brut D	49,0	Léger	Léger	Léger
Brut E	46,2	Léger	Léger	Léger
Brut F	43,2	Léger	Léger	Léger
Brut G	42,9	Léger	Léger	Léger
Brut H	42,6	Léger	Léger	Léger
Brut I	42,4	Léger	Léger	Léger
Brut J	42,2	Léger	Léger	Léger
Brut K	35,6	Léger	Léger	Moyen
Brut L	33,3	Léger	Léger	Moyen
Brut M	33,1	Léger	Léger	Moyen
Brut N	30,1	Moyen	Léger	Lourd
Brut O	28,8	Moyen	Léger	Lourd
Brut P	28,5	Moyen	Léger	Lourd
Brut Q	27,7	Moyen	Léger	Lourd
Brut R	27,0	Moyen	Léger	Lourd
Brut S	26,8	Moyen	Léger	Lourd
Brut T	25,2	Moyen	Léger	Lourd
Brut U	25,1	Moyen	Léger	Lourd
Brut V	24,2	Moyen	Léger	Lourd
Brut W	23,6	Moyen	Léger	Lourd
Brut X	23,1	Moyen	Léger	Lourd
Brut Y	20,2	Lourd	Léger	Lourd
Brut Z	19,1	Lourd	Lourd	Lourd

Cette méthode nous conduit à une classification simple basée uniquement sur la connaissance de la densité exprimée en °API. Nous distinguons d'après le tableau 8 que les 26 pétroles bruts présents des °API différents variant entre 19 et 51. Ce qui justifie notre choix ,la gamme des bruts sélectionnée est représentative des pétroles bruts existants.

D'après les résultats de classification selon les trois méthodes, nous pouvons dire que cette classification (selon °API) est régionale d'où la nécessité de trouver une nouvelle classification des pétroles plus générale. Nous avons pour cela testé une nouvelle méthode appelée méthode Gamma (Partie III).

II.2. Classification chimique

Dans cette classification, nous allons utilisé deux méthodes : la première en fonction du facteur K_{uop} et la deuxième selon des corrélations (nous nous limiterons aux classifications selon CI et °API des fractions).

II.2.1. Classification selon le facteur K_{uop}

Cette méthode est basée sur le calcul de K_{uop} de chaque pétrole. Ce facteur a été déterminé par l'équation 7 :

$$K_{uop} = \frac{(T_{éb})^{\frac{1}{3}}}{SpGr_{60}^{60}} \quad (26)$$

T : calculé en appliquant l'équation 8 :

$$T_{éb} = \frac{T_{20} + T_{50} + T_{80}}{3} \quad (°R) \quad (27)$$

En appliquant la formule précédente, une classification par famille d'hydrocarbures composant le brut est déduite et est présentée dans le tableau 9

Tableaux 9 : Classification des pétroles selon le K_{uop}

Brut	K_{uop}	Classification des pétroles selon le facteur K_{uop}
Brut A	12,39	Mixte
Brut B	12,22	Mixte
Brut C	12,36	Mixte
Brut D	12,06	Mixte
Brut E	12,11	Mixte
Brut F	12,21	Mixte
Brut G	12,17	Mixte
Brut H	12,20	Mixte
Brut I	12,15	Mixte
Brut J	12,24	Mixte
Brut K	11,81	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut L	11,72	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut M	11,79	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut N	11,76	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut O	11,80	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut P	11,71	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut Q	12,03	Mixte
Brut R	11,77	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut S	11,89	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut T	11,76	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut U	11,68	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut V	11,71	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut W	11,72	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut X	11,77	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut Y	11,52	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué
Brut Z	11,41	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué

Nous constatons, selon cette méthode, basée sur le facteur K_{uop} , que les pétroles bruts étudiés sont de nature **mixte** (présence des trois familles des HC) ou de nature **naphténiques purs ou aromatiques légèrement substitués**.

II.2.2. Classification Selon le °API des fractions

Cette méthode consiste à classer le pétrole en calculant le °API des deux fractions 250 - 270°C et 275-300°C.

°API de la fraction : calculé à partir de l'équation 1 :

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{Sp.Gr}_{60F}^{60F}} - 131.5 \quad (28)$$

$$\text{Sp.Gr}_{60F}^{60F} \text{ d'une fraction} = \frac{\sum V_i \cdot d_i}{\sum V_i}$$

Où : V_i est le % Volume cumulé de la fraction i .

d_i : densité de la fraction i .

Tableau 10 : Classification des pétroles selon le °API des fractions

Pétrole	Fraction 250°C-270°C			Fraction 275°C-300°C			Classification de pétrole selon le °API des fractions
	$\text{Sp. Gr}_{60F}^{60F}$	°API	Type de la Fraction	$\text{Sp. Gr}_{60F}^{60F}$	°API	Type de la fraction	
Brut A	0,8040	44,5	Paraffinique	0,8150	42,1	Paraffinique	Paraffinique
Brut B	0,8200	41,1	Paraffinique	0,8330	38,4	Paraffinique	Paraffinique
Brut C	0,8120	42,8	Paraffinique	0,8200	41,1	Paraffinique	Paraffinique
Brut D	0,8300	39,0	Mixte	0,8380	37,3	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut E	0,8320	38,6	Mixte	0,8440	36,1	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut F	0,8300	39,0	Mixte	0,8440	36,1	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut G	0,8250	40,0	Paraffinique	0,8360	37,8	Paraffinique	Paraffinique
Brut H	0,8290	39,2	Mixte	0,8360	37,8	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut I	0,8300	39,0	Mixte	0,8370	37,6	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut J	0,8230	40,4	Paraffinique	0,8340	38,2	Paraffinique	Paraffinique
Brut K	0,8310	38,7	Mixte	0,8420	36,6	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut L	0,8410	36,7	Mixte	0,8570	33,5	Paraffinique	Mixte-Paraffinique
Brut M	0,8310	38,7	Mixte	0,8430	36,4	Paraffinique	Mixte - Paraffinique
Brut N	0,8350	38,0	Mixte	0,8510	34,7	Paraffinique	Mixte - Paraffinique
Brut P	0,8350	38,0	Mixte	0,8460	35,8	Paraffinique	Mixte - Paraffinique
Brut Y	0,8410	36,6	Mixte	0,8590	33,2	Paraffinique	Mixte - Paraffinique

Remarque : cette méthode n'a pas pu être appliquée aux pétroles suivants : O, Q, R, S, T, U, V, W, X et Z car nous ne disposons pas des données des densités des fractions étudiées.

Cette méthode révèle une nouvelle classification des pétroles bruts. Il s'agit soit de pétroles paraffiniques soit de pétroles mixtes -paraffiniques.

Cette méthode ne donne pas vraiment de résultats fiables sur la composition d'un pétrole car elle ne tient pas compte des fractions inférieures 250°C et celles supérieures à

300°C, elle se concentre principalement sur les deux fractions, alors que pour le pétrole chaque fraction a son importance.

II.2.3. Classification selon l'indice de corrélation CI

Cette méthode est basée sur le calcul du facteur de corrélation en utilisant la densité « d » et la température $T_{éb}$ du pétrole.

CI est calculé à partir de l'équation 17 :

$$CI = 473.7d - 456.8 + \frac{48.640}{T_{éb}} \quad (29)$$

Avec : $T_{éb}$ en (°R)

Tableau 11 : Classification selon le facteur CI

PETROLE	CI	Classification du pétrole selon CI
Brut A	9,32	Paraffinique
Brut B	13,81	Paraffinique
Brut C	10,43	Paraffinique
Brut D	18,14	Naphténique ou Mixte
Brut E	17,95	Naphténique ou Mixte
Brut F	17,38	Naphténique ou Mixte
Brut G	18,53	Naphténique ou Mixte
Brut H	18,08	Naphténique ou Mixte
Brut I	19,28	Naphténique ou Mixte
Brut J	17,36	Naphténique ou Mixte
Brut K	31,91	Naphténique ou Mixte
Brut L	35,85	Naphténique ou Mixte
Brut M	34,45	Naphténique ou Mixte
Brut N	38,24	Naphténique ou Mixte
Brut O	38,71	Naphténique ou Mixte
Brut P	40,89	Naphténique ou Mixte
Brut Q	35,84	Naphténique ou Mixte
Brut R	41,52	Naphténique ou Mixte
Brut S	39,45	Naphténique ou Mixte
Brut T	43,98	Naphténique ou Mixte
Brut U	45,61	Naphténique ou Mixte
Brut V	46,32	Naphténique ou Mixte
Brut W	46,99	Naphténique ou Mixte
Brut X	46,88	Naphténique ou Mixte
Brut Y	55,59	Aromatique
Brut Z	59,25	Aromatique

Par cette méthode nous distinguons trois types des pétroles : paraffiniques, aromatiques, naphténiques ou mixtes.

Nous allons récapituler dans le tableau ci-dessous la classification chimique par les trois méthodes.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif de la classification du pétrole selon les trois méthodes

Brut	Classification selon		
	K_{uop}	$^{\circ}API$ des fractions	CI
Brut A	Mixte	Paraffinique	Paraffinique
Brut B	Mixte	Paraffinique	Paraffinique
Brut C	Mixte	Paraffinique	Paraffinique
Brut D	Mixte	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut E	Mixte	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut F	Mixte	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut G	Mixte	Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut H	Mixte	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut I	Mixte	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut J	Mixte	Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut K	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut L	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut M	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut N	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut O	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut P	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Naphténique ou Mixte
Brut Q	Mixte	-	Naphténique ou Mixte
Brut R	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut S	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut T	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut U	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut V	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut W	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut X	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Naphténique ou Mixte
Brut Y	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	Mixte -Paraffinique	Aromatique
Brut Z	Naphténique ou Aromatique légèrement substitué	-	Aromatique

La classification chimique de par ses trois méthodes : K_{uop} , CI et $^{\circ}API$ des fractions n'aboutit pas au même résultat.

Remarque : la classification économique (selon la teneur en soufre) n'a pas été faite car nous ne disposons pas de données concernant le pourcentage en soufre.

Conclusion

Le °API n'est qu'un critère de classification régionale, or notre travail a pour but de trouver une classification plus générale, se basant sur une propriété intéressante du pétrole : la distillation TBP, en introduisant une nouvelle méthode appelée méthode Gamma pour sa modélisation.

III. Modélisation de la propriété TBP des pétroles bruts : Application de la loi de distribution « Gamma »

Le but étant de faire une modélisation des TBP, les informations disponibles sont les courbes de distillation TBP de 26 bruts de différents régions et de différentes densités et donc un bon balayage des différentes natures de bruts.

L'outil utilisé est la méthode de distribution gamma. Cette dernière est une distribution de probabilité continue, sur Excel, elle est symbolisé par « GAMMA.DIST (X, alpha, béta, cumulative) ».

Cette fonction Excel peut générer deux types de données, une probabilité ou une fonction de répartition (une somme de probabilité).

Tout d'abord les données TBP sont des données avec un intervalle de température, donc il n'est pas possible d'utiliser la distribution de probabilité pour comparer les TBP (%v) directement.

Gamma → distribution continue et % volume distillé → discret

Par contre, il est facile de comparer le pourcentage cumulé avec la fonction de répartition, puisque le %v cumulé tient compte de toute les valeurs à priori. Toutefois, pour étudier l'influence des paramètres nous utilisons la distribution de probabilité.

III.1. Evolution de la fonction gamma en fonction des différents paramètres

a) Influence du paramètre « Cumulative »

Nous allons prendre un alpha=1,5 et béta=200 et voir l'influence du quatrième paramètre (cumulative)

Tableau 13 : Influence du quatrième paramètre sur la distribution gamma

Température (°C)	Cumulative 1	Cumulative 2	Fonction gamma 1	Fonction gamma 2
10	0.4	0.1	0.022411	0.022411
20	0	0.2	0.002066	0.059758
30	0.2	1000	0.103568	0.103568
40	1000	0.4	0.150533	0.150533

Selon le tableau 13 :

- Pour une même valeur cumulative, la fonction prend deux valeurs différentes si le paramètre température varie.
- pour une même valeur de température la fonction prend des valeurs identiques quelque soit la cumulative, sauf pour une cumulative nulle.

Le quatrième paramètre (Cumulative) n'a pas d'influence sur la fonction gamma, sauf pour la valeur 0.

b) Influence du paramètre alpha α

1. Sur la fonction de répartition

Pour ce faire nous avons fixé la valeur de béta $\beta=100$.

Tableau 14 : Influence du paramètre alpha α sur la fonction de répartition

Température	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$	$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2$	$\alpha = 2.5$	$\alpha = 3$
20	0,4729	0,1813	0,0598	0,0175	0,0047	0,0011
40	0,6289	0,3297	0,1505	0,0616	0,0230	0,0079
60	0,7266	0,4512	0,2470	0,1219	0,0551	0,0231
80	0,7940	0,5507	0,3406	0,1912	0,0988	0,0474
100	0,8427	0,6321	0,4276	0,2642	0,1509	0,0803
120	0,8786	0,6988	0,5064	0,3374	0,2085	0,1205
140	0,9057	0,7534	0,5765	0,4082	0,2692	0,1665
160	0,9264	0,7981	0,6382	0,4751	0,3308	0,2166
180	0,9422	0,8347	0,6920	0,5372	0,3917	0,2694
200	0,9545	0,8647	0,7385	0,5940	0,4506	0,3233
220	0,9641	0,8892	0,7786	0,6454	0,5067	0,3773
240	0,9715	0,9093	0,8130	0,6916	0,5592	0,4303
260	0,9774	0,9257	0,8423	0,7326	0,6080	0,4816
280	0,9820	0,9392	0,8672	0,7689	0,6529	0,5305

Le tableau 14 montre que la fonction de distribution Gamma varie avec la variation de paramètre alpha. Plus alpha prends des valeurs faibles plus la fonction Gamma augmente rapidement.

Sur la figure 17, cette influence est mise en évidence. En effet la fonction de répartition prend des formes différentes en fonction de la valeur attribuée à alpha. Notons que la valeur de Béta reste constante et est égale à 100.

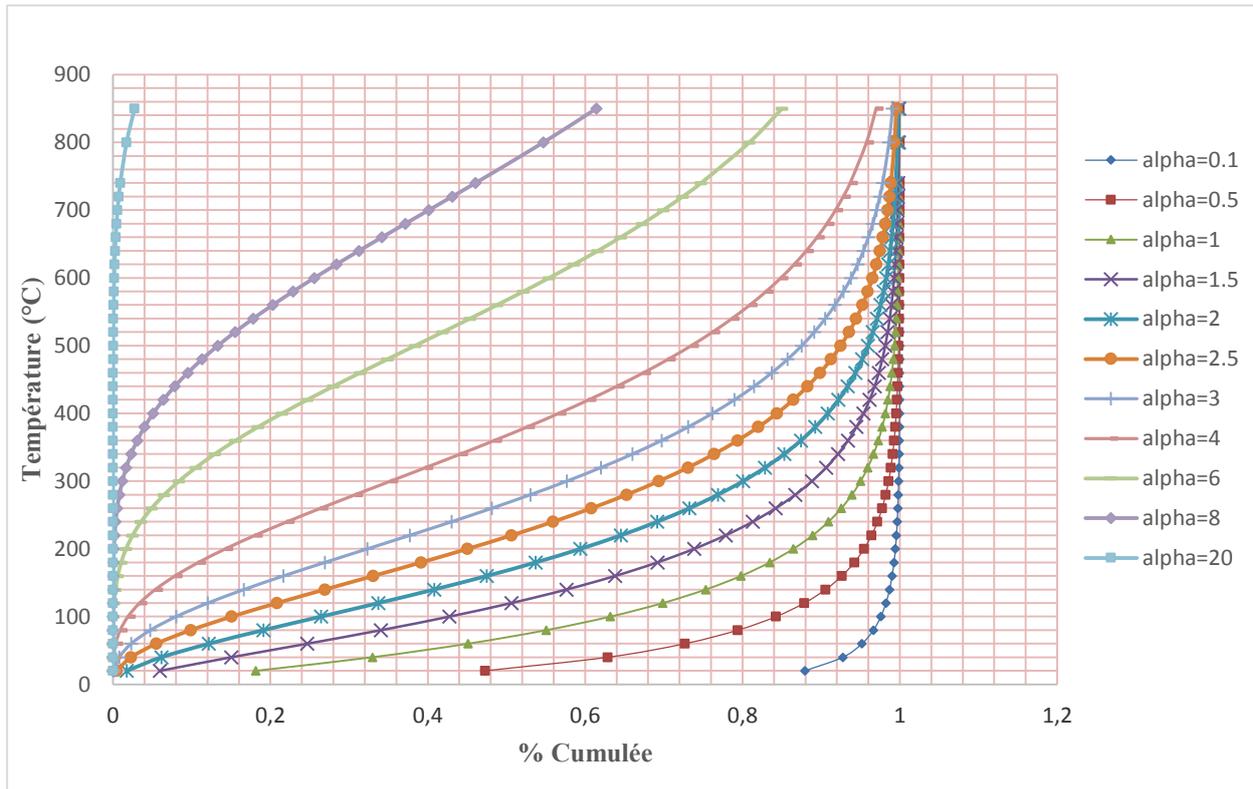


Figure 17 : Variation de la fonction de répartition en fonction du paramètre alpha avec bêta constant (bêta=100)

La figure ci-dessous révèle que :

- Pour un pourcentage de 50%, la température correspondante pour un $\alpha = 0.1$ est de 21°C et pour un $\alpha = 8$ elle augmente jusqu'à atteindre 780°C .
- Plus le paramètre alpha augmente plus la tangente au point zéro augmente, elle est égale 1 pour des valeurs de alpha avoisinant le zéro et elle augmente jusqu'à atteindre l'infini pour des valeurs relativement élevées.
- Le paramètre alpha influe sur la forme de la représentation graphique et est plus accentué pour des valeurs du paramètre alpha plus élevées.

2. Sur la densité de probabilité

Pour étudier cette influence nous avons donné à Beta une valeur constante égale à 10 ($\beta = 10$)

Cette influence est démontrée par la figure ci-dessous. La valeur du paramètre alpha varie de 0.1 à 100.

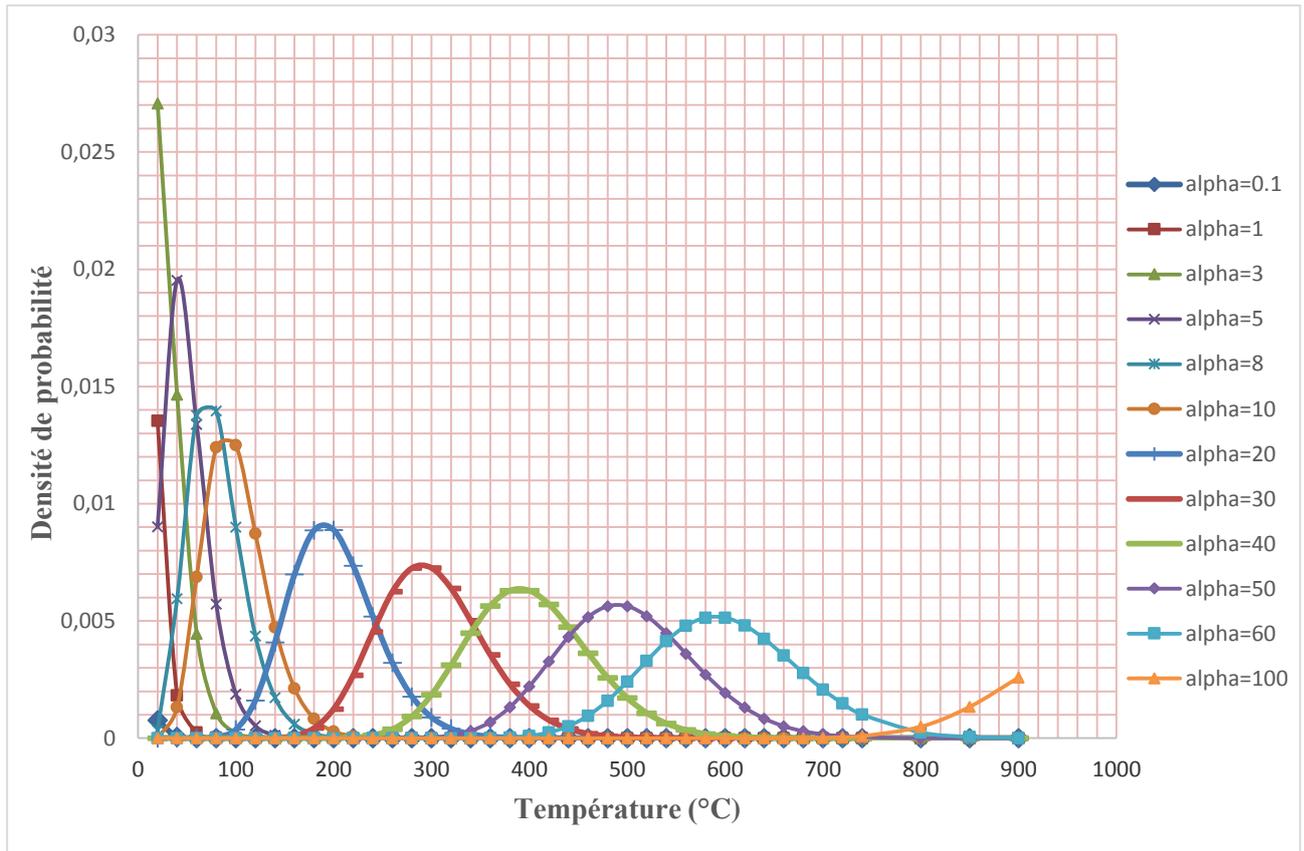


Figure 18 : Variation de la densité de probabilité en fonction du paramètre α .

Selon la figure 18, nous remarquons que le paramètre α influe sur la forme de la courbe de distribution. En effet selon la valeur de α , cette densité décrit trois grandes familles de courbes :

- $\alpha > 3$: la distribution prend une forme de cloche symétrique dans un intervalle de température donné, la distribution globale dans un intervalle large de température est asymétrique ;
- $\alpha \leq 3$: la distribution est monotone décroissante.

Aussi et d'après la figure 18, le maximum de la distribution diminue lorsque le paramètre α augmente, et la distribution en cloche s'étend beaucoup plus le long de la variable aléatoire qui est la température.

c) Influence du paramètre béta β

1. Sur la fonction de répartition

Contrairement à ce qui précède dans cette partie le paramètre Alpha est constant tandis que béta varie

Cette variation est traduite dans le graphe 18 de la fonction de répartition en fonction du paramètre béta avec une valeur de $\alpha = 1,5$.

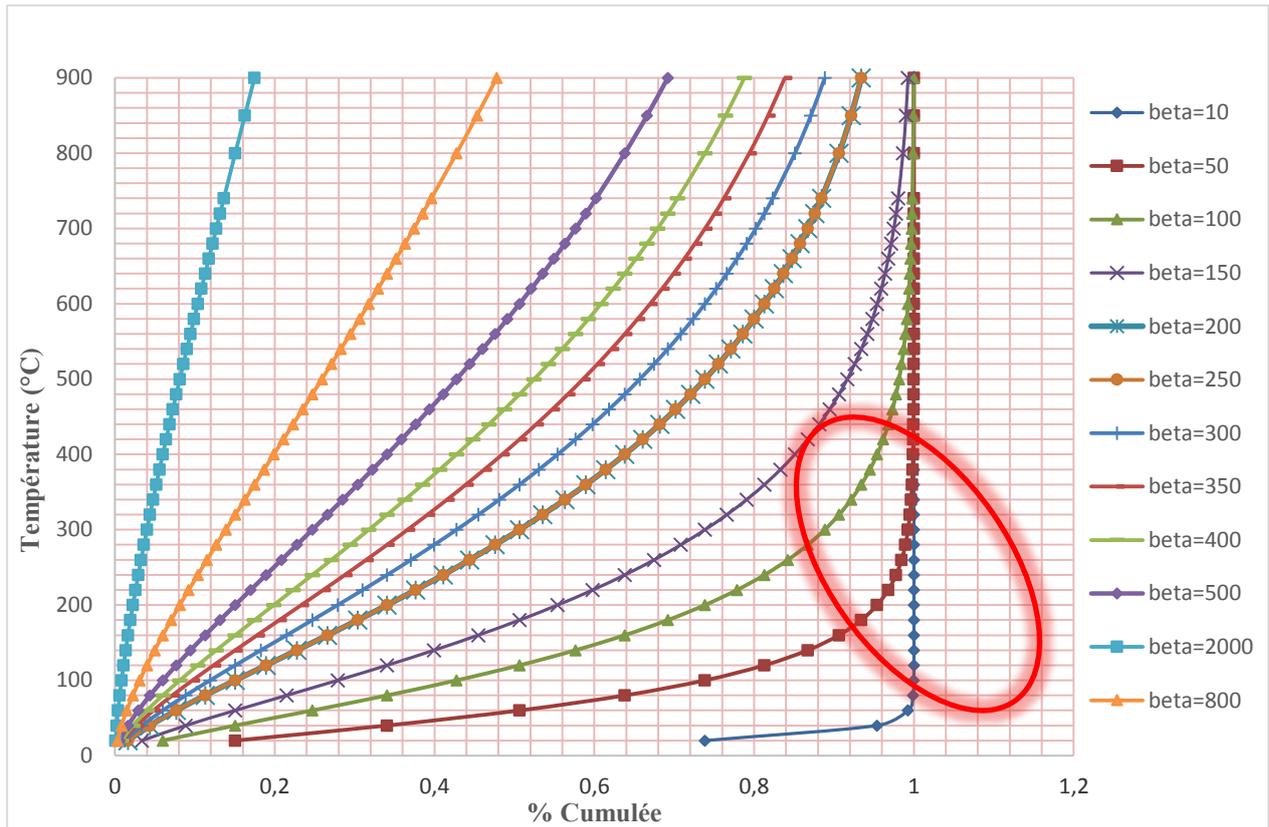


Figure 19 : Variation de la fonction de répartition en fonction du paramètre bêta ($\alpha=1,5$)

Le tracé de la figure 19 montre que :

- Plus le paramètre bêta est important plus la fonction gamma augmente lentement.
- Pour un pourcentage de 50%, la température correspondante pour un $\beta=50$ est 25°C et elle atteint 920°C pour une valeur de $\beta=800$.
- Une influence très importante sur la partie de la cumulative $> 60\%$
- Quand $\beta > 800$ la variation devient linéaire, ceci ne peut être généralisé puisque un changement de α , affectera directement la tangente et indirectement la courbure.

2. Sur la densité de probabilité

Dans ce cas α est maintenu constante et égal à 0.5 et Bêta varie de 10 à 2000.

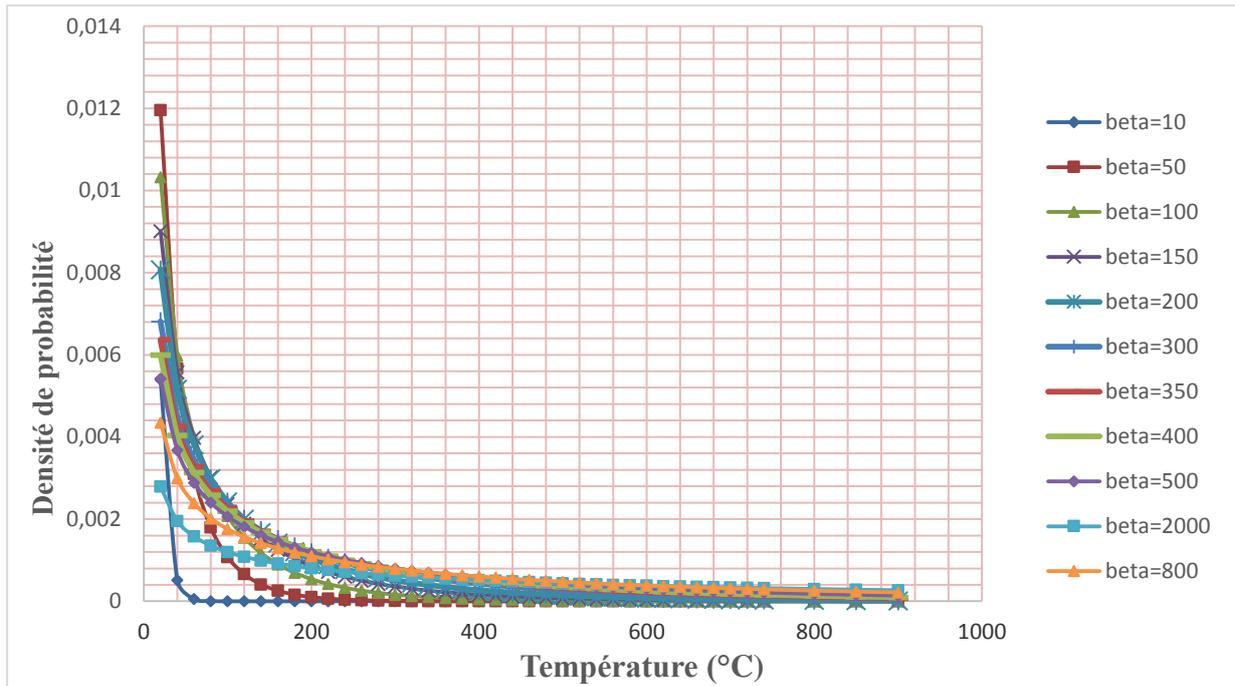


Figure 20 : Variation de la densité de probabilité en fonction du paramètre bêta avec alpha constant (alpha=0,5)

La figure 20, montre que plus le paramètre β augmente, plus la densité de probabilité s'étend sur un intervalle plus large et son maximum diminue.

Le choix des paramètres Alpha et Beta reste très important et constitue la base d'une modélisation correcte. De ce fait un ajustement de ces deux paramètres conditionnera la réussite de la modélisation.

III.2. Relation entre la fonction distribution Gamma et la TBP

Comme nous l'avons vu précédemment, la distribution gamma est une distribution de pourcentage cumulé asymétrique et dont la forme peut être ajustée grâce aux paramètres α et β .

Ainsi, grâce à la flexibilité de cette fonction, un compromis entre alpha et bêta doit être trouvé de telle sorte que l'erreur entre la TBP et la fonction soit minimale.

En manipulant correctement les deux paramètres on pourra avoir une distribution similaire à la TBP et donc l'erreur sera négligeable.

Grace à cet outil nous pourrons caractériser une TBP avec seulement deux paramètres, ce qui est très intéressant et peut être utilisé dans un certain nombre d'applications comme :

1. Une classification des pétroles Légers/Moyens/Lourds selon la TBP.
2. Les corrélations des propriétés physiques.
3. Comparaison des TBP avec une analyse plus précise en ce qui concerne la composition.

III.3. Classification selon la TBP

Avant d'appliquer la méthode gamma, nous avons commencé par tracer toutes les TBP sur un même graphe et essayé d'étudier le comportement de chaque pétrole en se basant sur la température d'ébullition en fonction du pourcentage distillé, afin, de tirer une classification selon cette propriété (distillation TBP).

Les résultats sont donnés par la figure 21 :

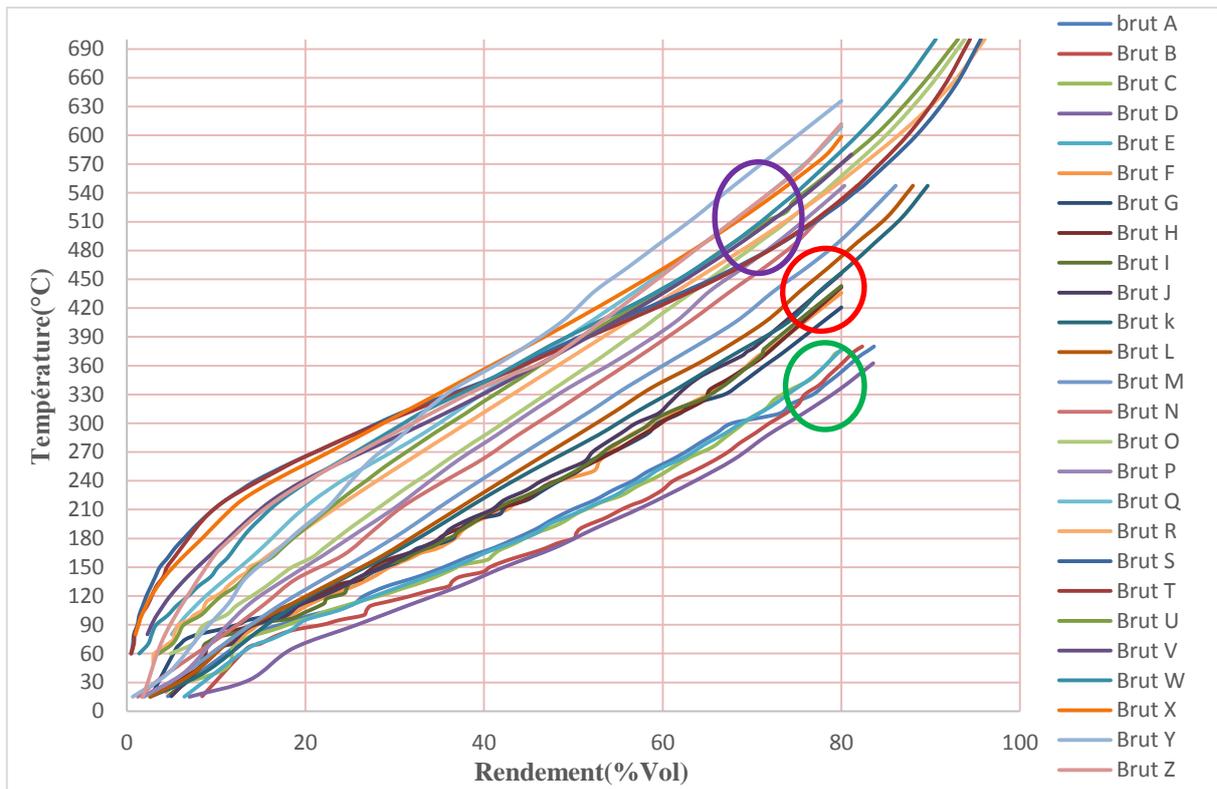


Figure 21 : TBP de tous les pétroles bruts

A partir de ce graphe et en se basant sur les températures correspondant à 20, 50 et 80 % Vol, nous pouvons classer les pétroles étudiés en trois catégories.

Nous ne nous sommes pas intéressés aux premiers points car ces points dépendent des conditions initiales de traitement avant la distillation (possibilité de perte des produits légers). Ce qui explique d'ailleurs que tous les pétroles ont des points initiaux qui se retrouvent autour de la même zone.

Nous citons les trois catégories :

- La première catégorie circulée en vert est la zone des légers.
- La deuxième catégorie circulée en rouge est la zone des moyens.
- La troisième catégorie circulée en mauve est la zone des lourds.

Pour mieux distinguer les trois catégories de classe des pétroles bruts nous les avons illustrées dans des graphes différents et pour chacune de ces catégories ; nous avons sélectionné ses températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$.

Les figures 22, 23, 24 représentant respectivement les zones des courbes TBP des pétroles légers, moyens et lourds respectivement :

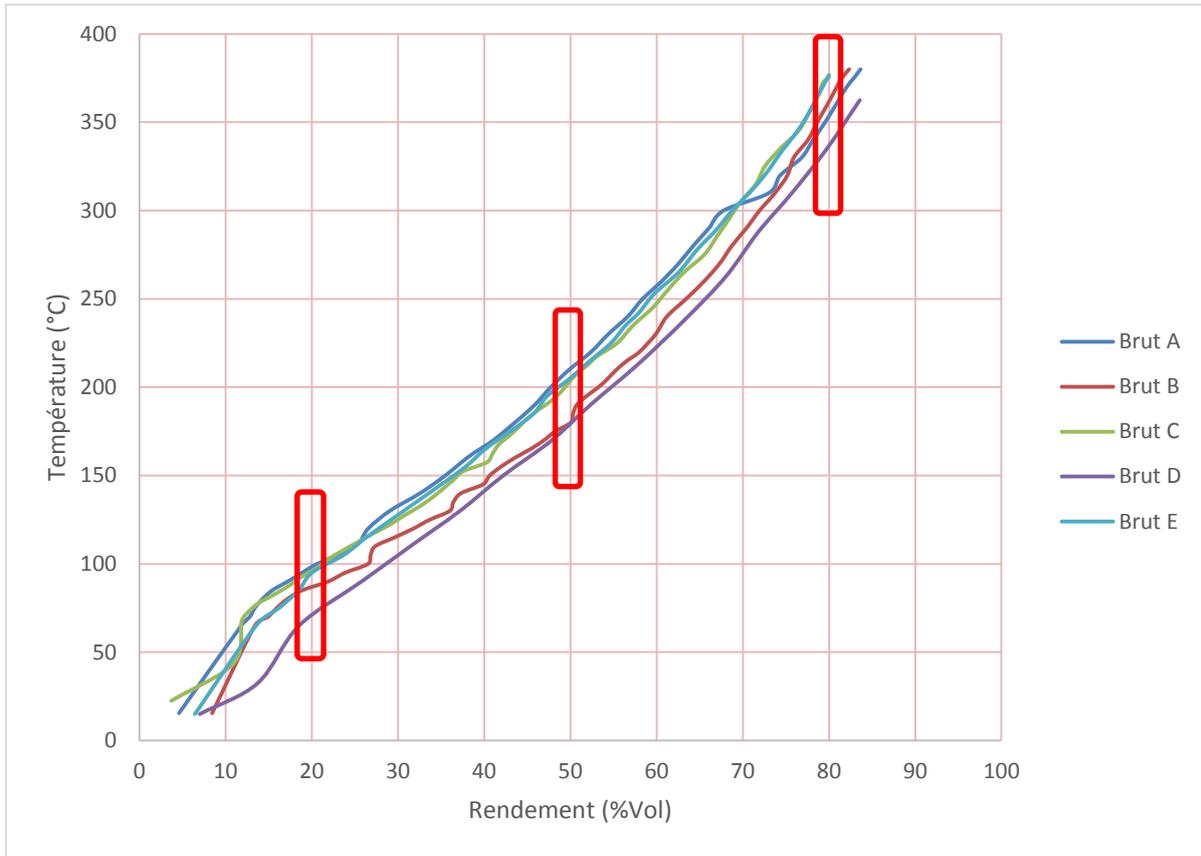


Figure 22 : Courbes de la catégorie des bruts classés légers

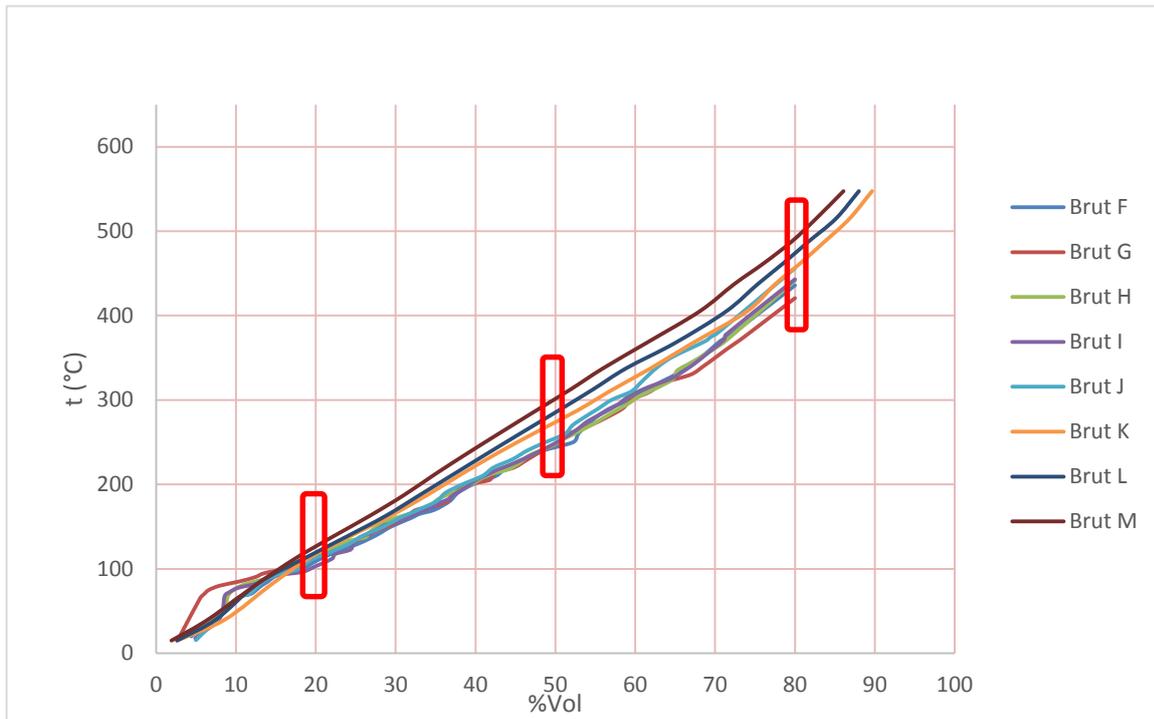


Figure 23 : Courbes de la catégorie des bruts classés moyens

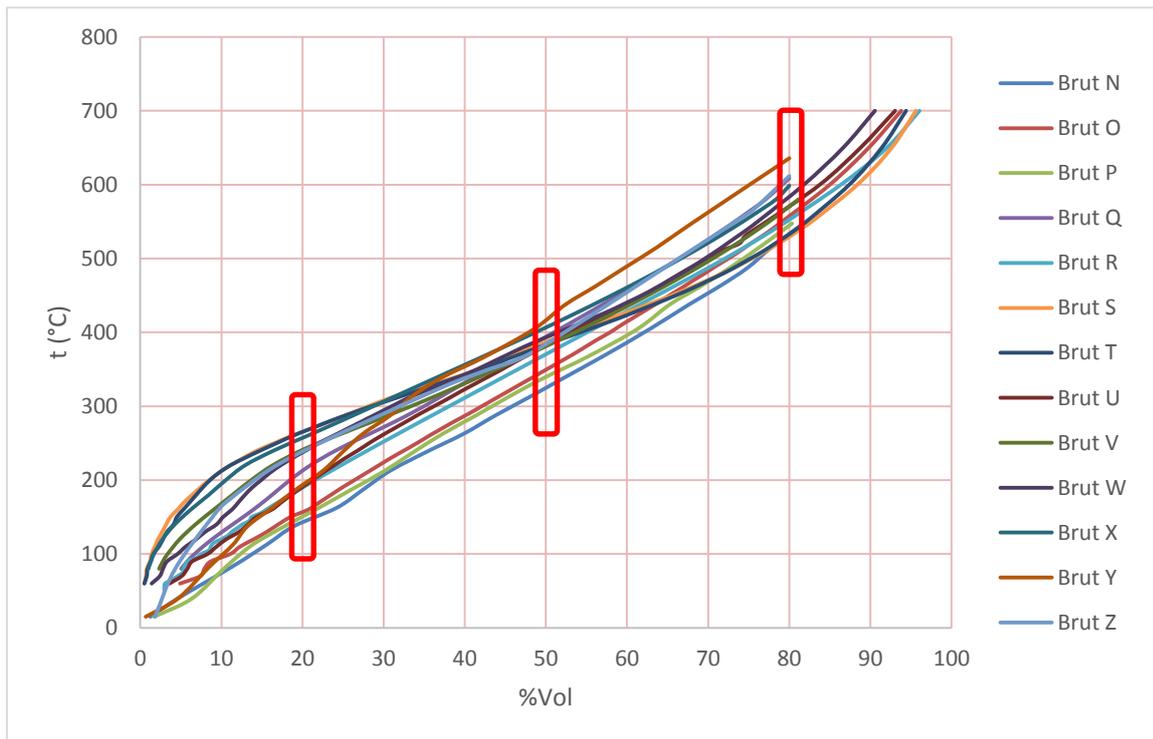


Figure 24 : Courbes de la catégorie des bruts classés lourds

Nous constatons que chaque catégorie est distinguée et possède ses propres température $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$ délimitée par une zone distincte dans le graphique . ces zones sont représentées par le tableau 15, où il est mis en évidence les températures ($t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$) correspondant respectivement à 20, 50 et 80% de volume distillé.

Cette distinction nous a permis de définir des zones de classification de trois catégories de pétroles :

- Légers
- Moyens
- Et lourds

décrites respectivement dans le tableau par les couleurs respectives rouges, vertes et bleu.

Tableau 15 : Calcul des températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$.

	Brut	$t_{20\%}(^{\circ}\text{C})$	$t_{50\%}(^{\circ}\text{C})$	$t_{80\%}(^{\circ}\text{C})$	Classification de pétrole	
Les légers	Brut A	99	210	353	Léger	
	Brut B	88	180	360	Léger	
	Brut C	97	205	377	Léger	
	Brut D	72	180	338	Léger	
	Brut E	95	205	377	Léger	
Les moyennes	Brut F	113	244	435	Moyen	
	Brut G	118	247	420	Moyen	
	Brut H	118	247	440	Moyen	
	Brut I	104	247	440	Moyen	
	Brut J	120	255	457	Moyen	
	Brut K	118	274	457	Moyen	
	Brut L	120	286	475	Moyen	
	Brut M	126	300	492	Moyen	
	Les lourds	Brut N	142	325	532	Lourd
		Brut O	159	350	558	Lourd
Brut P		151	340	544	Lourd	
Brut Q		213	397	610	Lourd	
Brut R		190	371	554	Lourd	
Brut S		265	390	530	Lourd	
Brut T		265	382	532	Lourd	
Brut U		190	383	570	Lourd	
Brut V		241	382	570	Lourd	
Brut W		240	396	582	Lourd	
Brut X		258	407	599	Lourd	
Brut Y		193	417	636	Lourd	
Brut Z		240	384	612	Lourd	

Les températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$ des trois catégories sont bien distinctes et seront représentés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Classification selon les températures $t_{20\%}$, $t_{50\%}$, $t_{80\%}$.

Brut	$t_{20\%}(^{\circ}\text{C})$	$t_{50\%}(^{\circ}\text{C})$	$t_{80\%}(^{\circ}\text{C})$
Les légers	$t_{20\%} < 100$	$t_{50\%} < 210$	$t_{80\%} < 400$
Les moyennes	$100 \leq t_{20\%} < 130$	$210 \leq t_{50\%} < 300$	$400 \leq t_{80\%} < 500$
Les lourds	$t_{20\%} \geq 130$	$t_{50\%} \geq 300$	$t_{80\%} \geq 500$

III.4. Modélisation des TBP

Dans un premier temps, les deux paramètres Alpha et Beta décrits précédemment sont fixés et ensuite modifiés pour obtenir la distribution la plus proche de la courbe TBP.

La fonction GAMMA.DIST de l'Excel est utilisée pour générer les données.

Un calcul du R^2 et du RMSE est fait pour optimiser l'erreur entre les deux courbes³⁸ :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{exp} - y_{pred})^2}{n}} \quad (26)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{exp} - y_{pred})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{exp} - \hat{y}_{exp})^2} \quad (27)$$

Avec :

y_{exp} : Rendement volumique cumulée/100

y_{pred} : Valeur prédite de la distribution gamma

\hat{y}_{exp} : Valeur cumulée moyenne de la TBP

n : Le nombre de points expérimentaux

➤ Exemple de calcul

Vu le nombre important de brut, un exemple de calcul est donné pour expliciter la méthodologie adoptée. Le pétrole choisi pour cet exemple est le pétrole brut B (Voir Tableau 17), les résultats obtenus figurent dans le tableau qui suit, le reste des calculs est donné en annexe I.

Tableau 17 : Exemple de calcul appliqué au pétrole brut B

T (°C)	% vol Cumulé	y_{exp}	$y_{pred}(\alpha = 1,6 \text{ et } \beta = 146)$	$(y_{exp} - y_{pred})^2$	$(y_{exp} - \hat{y}_{exp})^2$
15,5	8,44	0,0844	0,018119	0,004393	0,163043
65	13,4	0,134	0,146676	0,000161	0,125448
70	14,92	0,1492	0,161869	0,000161	0,114912
75	15,94	0,1594	0,177194	0,000317	0,1081
80	17,13	0,1713	0,192607	0,000454	0,100417
85	18,86	0,1886	0,208072	0,000379	0,089752
90	21,89	0,2189	0,223553	2,16E-05	0,072515
95	23,86	0,2386	0,239019	1,76E-07	0,062293
100	26,53	0,2653	0,254445	0,000118	0,049678
105	26,83	0,2683	0,269806	2,27E-06	0,04835
110	27,36	0,2736	0,28508	0,000132	0,046047
115	29,61	0,2961	0,300248	1,72E-05	0,036897
120	31,79	0,3179	0,315293	6,8E-06	0,028997
125	33,68	0,3368	0,3302	4,36E-05	0,022918
130	36,01	0,3601	0,344955	0,000229	0,016406
135	36,43	0,3643	0,359545	2,26E-05	0,015348
140	37,31	0,3731	0,373962	7,43E-07	0,013245
145	39,85	0,3985	0,388195	0,000106	0,008044
150	40,63	0,4063	0,402237	1,65E-05	0,006705
155	41,94	0,4194	0,41608	1,1E-05	0,004732
160	43,55	0,4355	0,429718	3,34E-05	0,002776
165	45,37	0,4537	0,443147	0,000111	0,001189
170	46,94	0,4694	0,456361	0,00017	0,000353
175	48,22	0,4822	0,469359	0,000165	3,58E-05
180	50,06	0,5006	0,482135	0,000341	0,000154
185	50,3	0,503	0,49469	6,91E-05	0,000219
190	50,74	0,5074	0,50702	1,45E-07	0,000369
195	51,87	0,5187	0,519124	1,8E-07	0,000931
200	53,25	0,5325	0,531003	2,24E-06	0,001964
205	54,36	0,5436	0,542654	8,94E-07	0,003071
210	55,36	0,5536	0,55408	2,31E-07	0,004279
215	56,57	0,5657	0,56528	1,76E-07	0,006008
220	58,01	0,5801	0,576255	1,48E-05	0,008448
230	59,89	0,5989	0,597535	1,86E-06	0,012258
240	61,19	0,6119	0,617931	3,64E-05	0,015305
250	63,42	0,6342	0,637459	1,06E-05	0,02132
260	65,51	0,6551	0,656138	1,08E-06	0,02786
270	67,31	0,6731	0,673988	7,88E-07	0,034193
280	68,72	0,6872	0,69103	1,47E-05	0,039607
290	70,41	0,7041	0,70729	1,02E-05	0,046619
300	71,94	0,7194	0,72279	1,15E-05	0,05346
310	73,74	0,7374	0,737557	2,46E-08	0,062108

320	75,18	0,7518	0,751616	3,4E-08	0,069492
330	75,91	0,7591	0,764992	3,47E-05	0,073394
340	77,55	0,7755	0,777713	4,9E-06	0,082549
350	78,62	0,7862	0,789802	1,3E-05	0,088812
360	79,81	0,7981	0,801287	1,02E-05	0,096047
370	80,9	0,809	0,812192	1,02E-05	0,102922
375	81,48	0,8148	0,817434	6,94E-06	0,106677
380	82,34	0,8234	0,822541	7,37E-07	0,112368
Somme				0,007668	2,208634
	α	β	RMSE	R²	
	1,6	146	0,014022	0,996528	
	1,7	140	0,021642	0,99173	
	1,8	130	0,022775	0,990841	
	1,5	157	0,015737	0,995627	

D'après nos calculs une distribution gamma avec $\alpha = 1,6$ et de $\beta = 146$ donne l'erreur la plus faible par rapport à la TBP considérée avec un indice de corrélation R^2 élevé, donc notre brut sera caractériser par ces deux paramètres.

Les autres TBP seront caractérisées en suivant la même procédure que celle appliquée pour le pétrole B. les résultats ainsi obtenus se résumant dans le tableau 18.

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus par la méthode gamma

Brut	Densité	α	β	R ²	RMSE
A	0,7760	1,6	158	0,9892	0,02499
B	0,7806	1,6	146	0,9965	0,01402
C	0,7807	1,6	158	0,9965	0,01230
D	0,7840	1,4	161	0,9919	0,02123
E	0,7963	1,6	159	0,9968	0,01139
F	0,8098	1,8	164	0,9966	0,01192
G	0,8114	2	145	0,9962	0,01235
H	0,8128	2	145	0,9963	0,01157
I	0,8137	2	150	0,9839	0,02405
J	0,8144	1,3	263	0,9886	0,02112
K	0,8470	2	155	0,9914	0,02499
L	0,8588	2	160	0,9915	0,02432
M	0,8597	2	170	0,9914	0,02389
N	0,8756	1,9	198	0,9942	0,01869
O	0,8827	2	200	0,9918	0,02185
P	0,8845	2	195	0,9925	0,02084
Q	0,8889	2,1	236	0,9855	0,02633
R	0,8927	2,7	151	0,9943	0,01765
S	0,8939	3,3	130	0,9672	0,05074
T	0,9030	4,3	96	0,9911	0,02854
U	0,9036	3,3	124	0,9783	0,03299
V	0,9090	3,8	109	0,9965	0,01577
W	0,9123	3,3	131	0,9783	0,03299
X	0,9154	3,3	137	0,9924	0,02197
Y	0,9325	2	245	0,9892	0,02143
Z	0,9395	2	240	0,970994	0,04458

Après avoir caractérisé les TBP, nous remarquons globalement que le paramètre α se situe dans l'intervalle de 1 à 4 et β entre 100 et 260, ce qui correspond à des courbes asymétriques.

Après analyse des résultats et en les couplant avec les caractéristiques de la distribution Gamma, nous remarquons que plus alpha est élevé plus la TBP est lourde et plus le paramètre bêta est grand surtout dans les premières fractions.

Le but étant de faire une classification qui nous permettra de distinguer entre bruts léger/moyen/lourd. Une première tentative a été de proposer des intervalles de variations mais qui ne donneront pas de résultats puisque il est difficile de distinguer entre un couple (α petit, β grand) et (α grand, β petit).

Exemple :

Supposant un intervalle d'une unité tel pour $1 < \alpha < 2$ et $\begin{cases} \beta > 200 \rightarrow \text{pétrole lourd} \\ \beta < 150 \rightarrow \text{pétrole léger} \end{cases}$

- gamma ($\alpha = 1$ et $\beta = 201$) sera considéré comme lourd
- gamma ($\alpha = 1,9$ et $\beta = 149$) sera considéré comme léger
- gamma ($\alpha = 1$ et $\beta = 149$) sera considéré comme léger

Or en traçant ces trois distributions gamma la deuxième distribution est plus lourde que la première ce qui est en contradiction avec notre supposition.

Une deuxième remarque est le grand écart entre la deuxième et la troisième distribution.

Suite à ces résultats, nous concluons qu'un intervalle n'est pas une solution à notre classification, la solution est de tracer un diagramme avec α représentant l'axe des abscisses et β l'axe des ordonnées et pour cela nous allons avoir besoin de deux bornes, une borne supérieure pour les pétroles lourds et une borne inférieure pour les pétroles légers.

Pour cela et en se basant sur les résultats trouvés dans la partie décrite précédemment sur la classification d'après TBP, nous avons pris deux bruts comme références :

- Le brut le plus léger des lourds pour construire la borne supérieure.
- Le brut le plus lourd des légers pour construire la borne inférieure.

En basant sur l'analyse des TBP, le choix le plus adéquat pour la borne supérieure est le brut N, et le brut E semble très intéressant pour construire la borne inférieure.

Maintenant que nous avons défini nos 2 pétroles bruts, nous commençons en suivant la procédure suivante :

1. Pour la borne supérieure nous allons fixer un α constant et faire varier le paramètre β , et en comparant les deux graphes, on cherche le β_{min} pour que la distribution gamma soit confondue avec notre courbe TBP.
2. Nous allons ensuite augmenter notre paramètre α d'un pas de 0,1, ce pas est choisi en raison de son influence négligeable sur le RMSE et R^2 (voir tableau 19).

Tableau 19 : Influence du changement d'un pas de 0,1 sur l'erreur

Pétrole brut B		
α	R ²	RMSE
$\alpha = 1,60$	0,996	0,014
$\alpha = 1,70$	0,996	0,015
$\alpha = 1,50$	0,995	0,016

3. Pour la borne inférieure nous allons suivre la même thématique sauf que l'on va chercher le β_{max} pour que la distribution gamma soit confondue avec celle de la TBP.
4. Nous allons réaliser ce travail dans l'intervalle $\alpha \in [0,4-10]$.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous :

- Définition de la borne supérieure :

Tableau 20 : Valeurs des paramètres de la borne supérieure

α	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
β	2300	1400	1000	760	605	515	444	370	325	303	284
α	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
β	263	243	226	210	198	187	175	167	159	152	145
α	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
β	139	133	128	123	119	115	111	107	104	101	98
α	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7
β	95	92	90	88	86	84	82	79	77	76	74
α	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
β	72	71	69	68	67	65	64	63	62	61	60
α	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9
β	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49
α	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0
β	49	48	48	47	46	46	45	45	44	44	43
α	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0	9,1
β	43	42	41	41	40	40	39	39	38	38	37
α	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10		
β	37	36	36	35	35	34	34	33	33		

- Définition de la borne inférieure :

Tableau 21 : Valeurs des paramètres de la borne inférieure

α	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
β	1000	900	660	450	390	330	300	271	242	218	198
α	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
β	180	159	149	138	130	122	115	109	104	100	95
α	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6
β	91	87	84	81	78	74	72	70	68	66	64
α	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7
β	62	60	59	58	56	54	53	52	50	49	48
α	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
β	47	46	45	44	43	42	41	41	40	40	39
α	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	6,9
β	38	38	37	37	36	35	35	34	34	33	33
α	7,0	7,1	7,2	7,3	7,4	7,5	7,6	7,7	7,8	7,9	8,0
β	32	32	31	31	30	30	30	29	29	29	28
α	8,1	8,2	8,3	8,4	8,5	8,6	8,7	8,8	8,9	9,0	9,1
β	28	28	28	27	27	27	26	26	26	25	25
α	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	9,9	10		
β	24	24	23	23	23	22	22	22	21		

Les résultats ainsi obtenus nous ont permis de tracer le diagramme suivant :

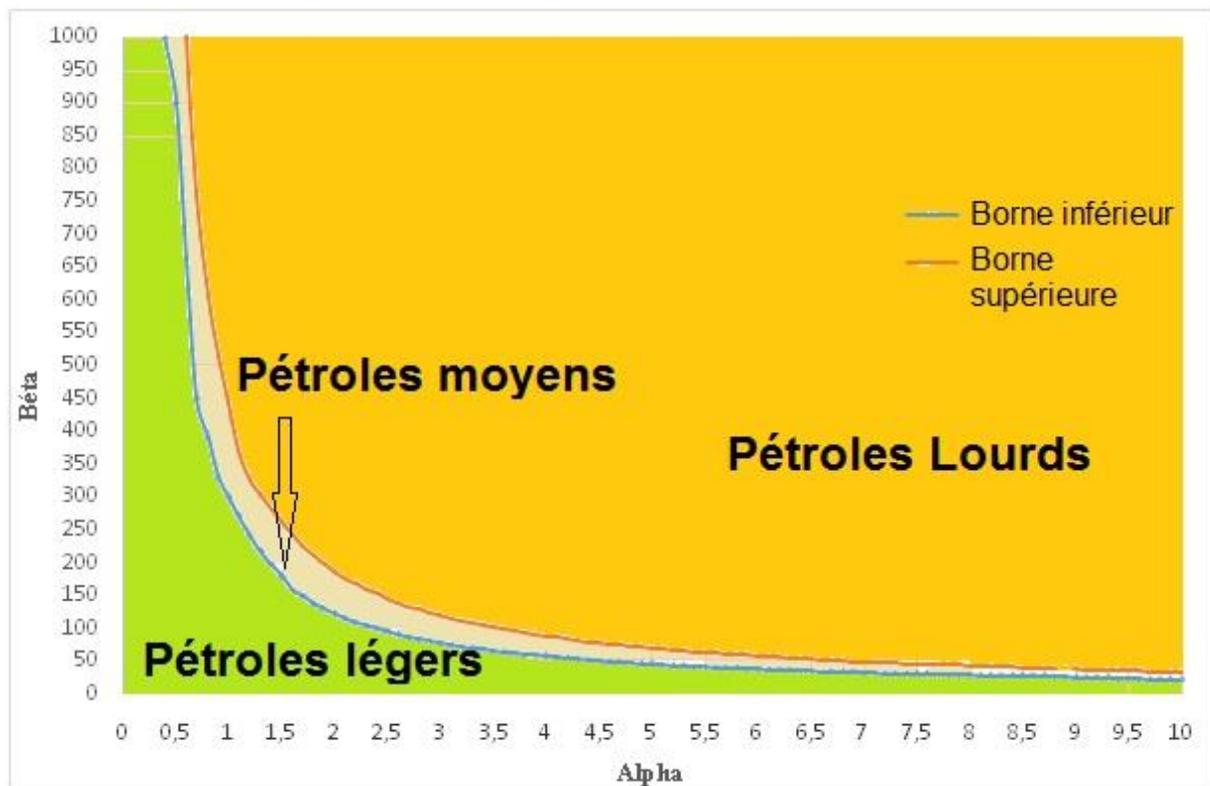


Figure 25 : Diagramme de la classification selon la méthode gamma

Les zones de délimitation sont bien distinctes. Nous pouvons grâce aux paramètres Alpha et Beta situer n'importe quel brut sur ce diagramme et par conséquent situer son appartenance.

IV. Validation des résultats par la méthode GAMMA

Les 26 bruts étudiés vont être positionnés sur la zone de courbes correspondantes (voir figure 26)

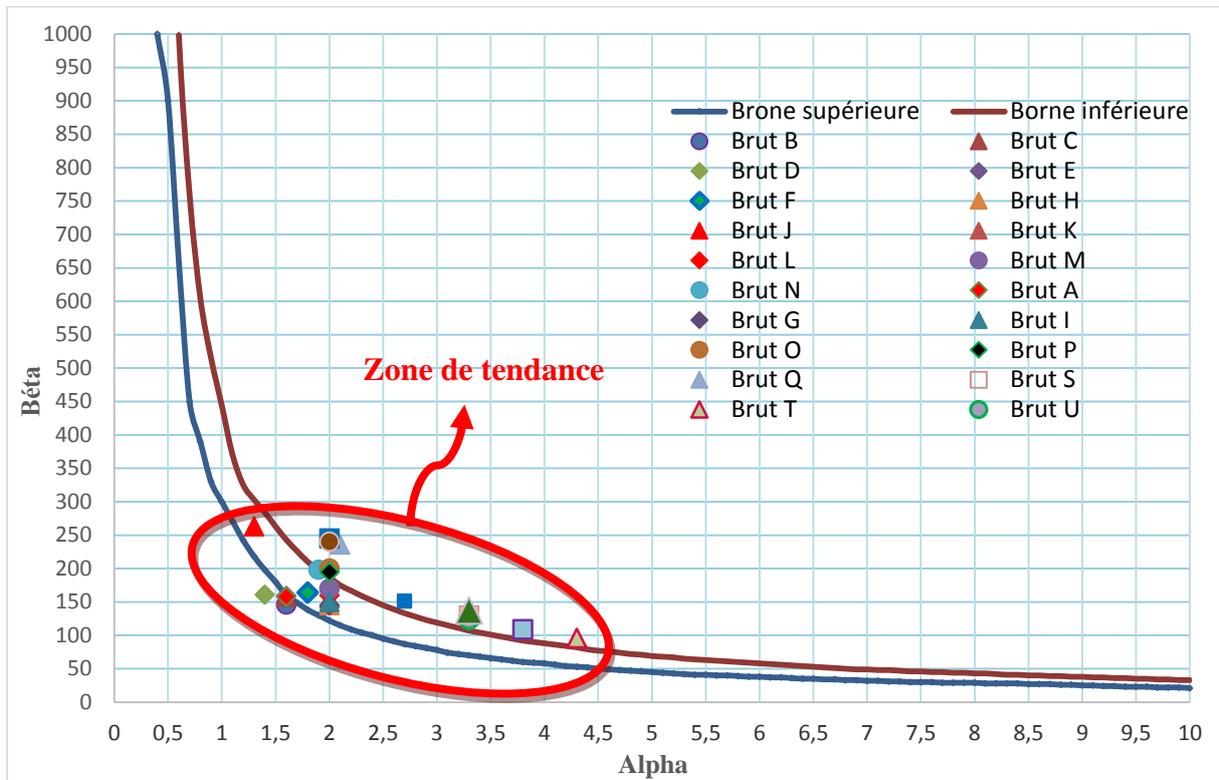


Figure 26 : Représentation des caractéristiques des bruts sur le diagramme gamma

- Nous remarquons qu’il existe une zone de tendance telles que $\alpha \in [1-5]$ et $\beta \in [50-300]$

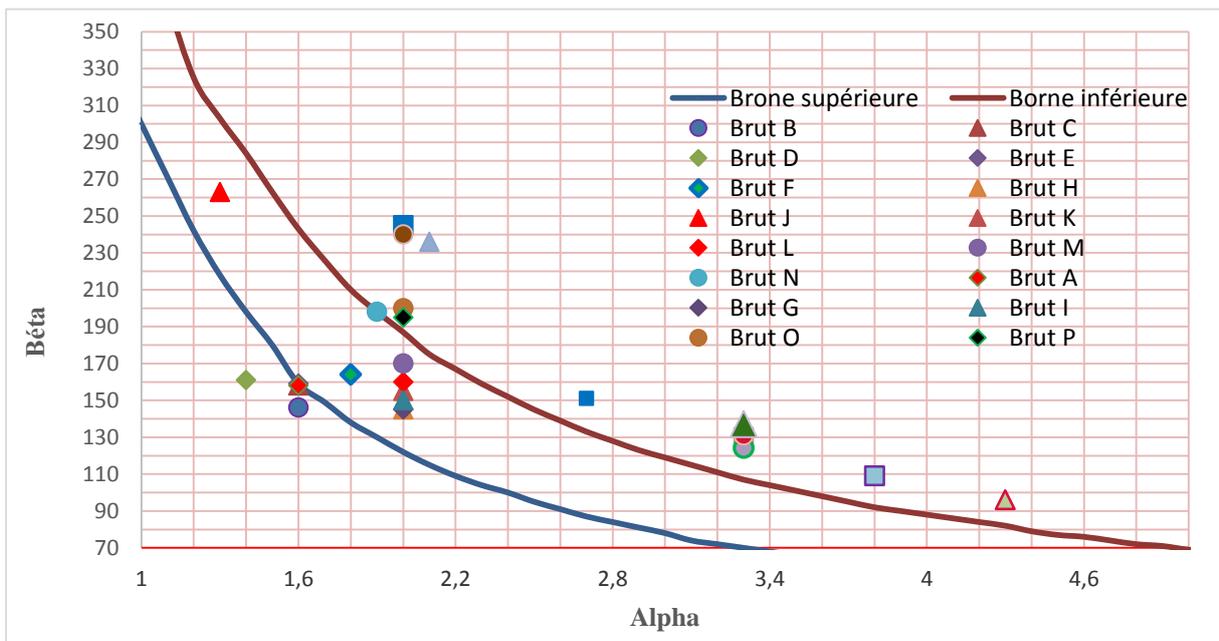


Figure 27 : Zoom sur la zone de tendance

- La zone de tendance caractéristique des différentes classes de bruts est située dans la zone $\alpha \in [1-5]$ et $\beta \in [50-300]$ où nous constatons une bonne délimitation marquée par les bornes supérieures et inférieures du diagramme.

La figure 26 nous a permis de classer nos 26 bruts, les résultats de cette classification sont représentés par le tableau 22 :

Tableau 22 : Classification des pétroles bruts selon la méthode gamma

Brut	Classe
A	Léger
B	Léger
C	Léger
D	Léger
E	Léger
F	Moyen
G	Moyen
H	Moyen
I	Moyen
J	Moyen
K	Moyen
L	Moyen
M	Moyen
N	Lourd
O	Lourd
P	Lourd
Q	Lourd
R	Lourd
S	Lourd
T	Lourd
U	Lourd
V	Lourd
W	Lourd
X	Lourd
Y	Lourd
Z	Lourd

Les résultats obtenus par la classification selon le diagramme de Gamma distribution confirment celles obtenues par la classification TBP

Conclusion

A la lumière des résultats obtenus nous pouvons déduire que la modélisation de la propriété TBP nous a permis d'élaborer une nouvelle méthode de classification des pétroles bruts.

En effet avec des données de TBP et en appliquant la méthode mathématique de distribution GAMMA, le diagramme élaboré mettant en œuvre les paramètres Alpha et Beta nous permet de situer notre brut en qualité de léger, moyen ou lourd avec une erreur acceptable.

Nous avons démontré aussi que les méthodes de classification classiques restent très floues et ne peuvent être appliqués que dans un cadre régional.

Une validation par d'autres pétroles bruts sera souhaitable, elle fera l'objet de nos projets de master respectifs.

Références bibliographiques

- [1] C.E. CHITOUR. Raffinage : les propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions Pétrolières, Edition OPU, Tome 1, 1999.
- [2] W.L. NELSON. Petroleum Refinery Engineering, 4th Edition, Mc Graw-Hill Book Company, 1958, chapitre 1, page 1.
- [3] J.G.SPEIGHT. The Chemistry and Technology of Petroleum, 5th Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014, chapitre 4, page 47 à 36.
- [4] X.NORMAND-A.TREIL. L'industrie du raffinage du pétrole : leçons sommaires Tome 1, Editions Technip, 2000, chapitre 1, page 12.
- [5] M.R.RIAZI. Characterization and Properties of Petroleum Fractions, 1st edition, ASTM, 2005, chapitre 1-2, page 18 à 90.
- [6] F.JAHN, M.COOK &M.GRAHAM. Hydrocarbon exploration and production, 2nd edition, Petroleum Science volume 55, 2008, chapitre 6, page 20-24.
- [7] Site web: www.eia.gov, The US Energy Information Administration, 2013.
- [8] S.PARKASH. Refining Process Handbook, Elsevier, 2003, page 1.
- [9] J.H.GARY & GLENN & E.HANDWERK. Petroleum Refining, Technology and Economics, 4th Edition, Marcel Dekker, 2001, page 15-17.
- [10] Document : ENSPM formation industrie, IFP training, 2004.
- [11] H.K.ABDEL-AAL and M.AGGOUR. Petroleum and gas field processing, Marcel Dekker, Inc., 2003, chapter 2, page 06-10.
- [12] Site web: www.notel.ac.in, NPTEL – Chemical – Chemical Technology II.
- [13] J-C.GUIBE. Caractéristiques des produits pétroliers, Techniques de l'ingénieur 1997, page 04.
- [14] I.Y.WAKAI. Développement des corrélations pour le calcul des propriétés du pétrole et de ses fractions, Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [15] J.DENIS, J.BRIANT, J-C. HIPEAUX. Physico-Chimie des lubrifiants, Analyses et essais, Edition Technip, 1997.
- [16] J-P.WAUQUIER. «Pétrole brut, produits pétroliers, schémas de fabrication » Edition Technip, chapitre 1-2, 1994.
- [17] Faculty of Chemical Engineering and Technology .University of Zagreb, Petroleum Refining and Petrochemical Processes Crude oil: Composition, Classification; Coal; Oil Shale; Tar Sand; Gas Hydrates, 2013.

[18] N.SKANDER. Thèse de doctorat : Evaluation des propriétés des pétroles bruts et des fractions pétrolières par les méthodes d'analyse et par corrélations . Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2004.

[19] L.C.P D'OLIVEIRA. Développement d'une méthodologie de modélisation cinétique de procédés de raffinage traitant des charges lourdes, Other, Ecole Normale Supérieure de Lyon - ENS LYON, 2013.

[20] A. Winter, C.B. Batistella, M.R.WolfMaciel, R.Maciel Filho, M.Lopes, S.Medina, L.C. "A True Boiling Point Curve Through Molecular Distillation Using FRAMOL Correlation", Separation Process Development Laboratory, Faculty of Chemical Engineering, State University of Campinas (UNICAMP), Brazil, 2006.

[21] N.AZROU et A.BOUMAHAMMED. Détermination des propriétés des hydrocarbures purs et des fractions pétrolières par deux méthodes : Contribution des groupes avec interaction et réseaux de neurones modifiés, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.

[22] S.GHANI. Prédiction des propriétés physiques des hydrocarbures par réseaux de neurones artificiels, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[23] A.CHALABI ET M.ABOUAAHI. Etablissement d'une nouvelle corrélation de contribution de groupes pour la prédiction de la chaleur spécifique des hydrocarbures purs en fonction de la température, Projet de Fin d'Etudes, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2006.

[24] Site web : www.Americanpetroleuminstitute.com, API gravity, American Petroleum Institute, 1916.

[25] Site Web : www.energy.gov, The U.S. Department Energy

[26] USGS science for a changing world, Natural Bitumen Resources of the United States, U.S.Geological Survey, 2006, page 2.

[27]P.WHUITIER. Le pétrole-raffinage et génie chimique, Tome 1, Edition Technip, 1972, page 56.

[28] G.LEFEBVRE. Chimie des hydrocarbures, Edition Technip, 1978, page 62.

[29] J.-P.FAVENNEC. Exploitation et gestion de la raffinerie, Edition Technip, 1998, page 552.

[30] U.V.RAMANA. Crude oil characteristics and refinery products, Industry-Academia Workshop On "Refining & Petrochemicals", Aout 2010, page 18.

[31] WikiStat, Introduction à la description et l'inférence statistiques élémentaires, Chapitre 4, page 1.

[32] E.GOBET. Méthodes de Monte-Carlo et processus stochastiques, Ecole Polytechnique, 2013, Chapitre1, page 1.

[33] N.BARBARY. Excel 2010 expert, Fonctions, simulations, bases de données, EY-ROLLES, 2011, Chapitre 14, page 428.

[34] F.DELACROIX, FIAAS Mathématiques, Ecole des Mines de Douai, 2011, Chapitre 14, page 5.

[35] P. DUSART. Cours de statistique différentielles, Université de limoges, 2015, page 4.

[36] R.M.DUDLEY. Real analysis and probability, Cambridge university press, chapitre 9, page 286.

[37] Support office, Help excel, 2013.

[38] L.MAGEE. The American Statistician, Volume 44, Taylor & Francis Ltd, 1990, page 250.

ANNEXES

Annexe I : Modélisation des courbes TBP

Modélisation de la TBP du Brut A

T(°C)	y _{gamma}	y _{v-yg}	delta ²	y _{v-yvmoy}	delta ²		
15,5	0,016046	0,029954	0,000897	-0,42517	0,180767		
65	0,131852	-0,01365	0,000186	-0,35297	0,124586		
70	0,14572	-0,01772	0,000314	-0,34317	0,117764	densité	0.760
75	0,159744	-0,02584	0,000668	-0,33727	0,113749	alpha	Beta
80	0,173887	-0,03129	0,000979	-0,32857	0,107956	1,6	158
85	0,188113	-0,03401	0,001157	-0,31707	0,100531	RMSE	0,024997
90	0,202391	-0,03039	0,000924	-0,29917	0,089501	R ²	0,98927
95	0,216694	-0,02779	0,000773	-0,28227	0,079675		
100	0,230996	-0,0249	0,00062	-0,26507	0,070261		
110	0,259509	-0,00951	9,04E-05	-0,22117	0,048915		
120	0,287777	-0,02228	0,000496	-0,20567	0,042299		
130	0,315672	-0,02517	0,000634	-0,18067	0,032641		
140	0,343096	-0,0175	0,000306	-0,14557	0,02119		
150	0,369965	-0,01517	0,00023	-0,11637	0,013541		
160	0,396217	-0,01612	0,00026	-0,09107	0,008293		
165	0,409096	-0,014	0,000196	-0,07607	0,005786		
170	0,421802	-0,0111	0,000123	-0,06047	0,003656		
180	0,44668	-0,01108	0,000123	-0,03557	0,001265		
190	0,470825	-0,01223	0,000149	-0,01257	0,000158		
200	0,494217	-0,01702	0,00029	0,006033	3,64E-05		
210	0,516843	-0,01814	0,000329	0,027533	0,000758		
220	0,538698	-0,0147	0,000216	0,052833	0,002791		
230	0,559779	-0,01598	0,000255	0,072633	0,005276		
240	0,580091	-0,01359	0,000185	0,095333	0,009088		
250	0,59964	-0,01584	0,000251	0,112633	0,012686		
260	0,618436	-0,01254	0,000157	0,134733	0,018153		
270	0,636491	-0,01099	0,000121	0,154333	0,023819		
280	0,65382	-0,01142	0,00013	0,171233	0,029321		
290	0,670439	-0,00974	9,48E-05	0,189533	0,035923		
300	0,686364	-0,00876	7,68E-05	0,206433	0,042615		
310	0,701615	0,028785	0,000829	0,259233	0,067202		
320	0,71621	0,02729	0,000745	0,272333	0,074165		
330	0,73017	0,03803	0,001446	0,297033	0,088229		
340	0,743514	0,037986	0,001443	0,310333	0,096307		
350	0,756263	0,039237	0,00154	0,324333	0,105192		
360	0,768437	0,039563	0,001565	0,336833	0,113456		
370	0,780056	0,040544	0,001644	0,349433	0,122103		
375	0,785664	0,043136	0,001861	0,357633	0,127901		
380	0,791141	0,045459	0,002067	0,365433	0,133541		

Modélisation de la TBP du Brut B

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15,5	0,018119	0,066281	0,004393	-0,40379	0,163043	densité	0,7806
65	0,146676	-0,01268	0,000161	-0,35419	0,125448	alpha	beta
70	0,161869	-0,01267	0,000161	-0,33899	0,114912	1,6	146
75	0,177194	-0,01779	0,000317	-0,32879	0,1081	RMSE	0,014022
80	0,192607	-0,02131	0,000454	-0,31689	0,100417	R²	0,996528
85	0,208072	-0,01947	0,000379	-0,29959	0,089752		
90	0,223553	-0,00465	2,16E-05	-0,26929	0,072515		
95	0,239019	-0,00042	1,76E-07	-0,24959	0,062293		
100	0,254445	0,010855	0,000118	-0,22289	0,049678		
105	0,269806	-0,00151	2,27E-06	-0,21989	0,04835		
110	0,28508	-0,01148	0,000132	-0,21459	0,046047		
115	0,300248	-0,00415	1,72E-05	-0,19209	0,036897		
120	0,315293	0,002607	6,8E-06	-0,17029	0,028997		
125	0,3302	0,0066	4,36E-05	-0,15139	0,022918		
130	0,344955	0,015145	0,000229	-0,12809	0,016406		
135	0,359545	0,004755	2,26E-05	-0,12389	0,015348		
140	0,373962	-0,00086	7,43E-07	-0,11509	0,013245		
145	0,388195	0,010305	0,000106	-0,08969	0,008044		
150	0,402237	0,004063	1,65E-05	-0,08189	0,006705		
155	0,41608	0,00332	1,1E-05	-0,06879	0,004732		
160	0,429718	0,005782	3,34E-05	-0,05269	0,002776		
165	0,443147	0,010553	0,000111	-0,03449	0,001189		
170	0,456361	0,013039	0,00017	-0,01879	0,000353		
175	0,469359	0,012841	0,000165	-0,00599	3,58E-05		
180	0,482135	0,018465	0,000341	0,012414	0,000154		
185	0,49469	0,00831	6,91E-05	0,014814	0,000219		
190	0,50702	0,00038	1,45E-07	0,019214	0,000369		
195	0,519124	-0,00042	1,8E-07	0,030514	0,000931		
200	0,531003	0,001497	2,24E-06	0,044314	0,001964		
205	0,542654	0,000946	8,94E-07	0,055414	0,003071		
210	0,55408	-0,00048	2,31E-07	0,065414	0,004279		
215	0,56528	0,00042	1,76E-07	0,077514	0,006008		
220	0,576255	0,003845	1,48E-05	0,091914	0,008448		
230	0,597535	0,001365	1,86E-06	0,110714	0,012258		
240	0,617931	-0,00603	3,64E-05	0,123714	0,015305		
250	0,637459	-0,00326	1,06E-05	0,146014	0,02132		
260	0,656138	-0,00104	1,08E-06	0,166914	0,02786		
270	0,673988	-0,00089	7,88E-07	0,184914	0,034193		
280	0,69103	-0,00383	1,47E-05	0,199014	0,039607		
290	0,70729	-0,00319	1,02E-05	0,215914	0,046619		
300	0,72279	-0,00339	1,15E-05	0,231214	0,05346		

310	0,737557	-0,00016	2,46E-08	0,249214	0,062108
320	0,751616	0,000184	3,4E-08	0,263614	0,069492
330	0,764992	-0,00589	3,47E-05	0,270914	0,073394
340	0,777713	-0,00221	4,9E-06	0,287314	0,082549
350	0,789802	-0,0036	1,3E-05	0,298014	0,088812
360	0,801287	-0,00319	1,02E-05	0,309914	0,096047
370	0,812192	-0,00319	1,02E-05	0,320814	0,102922
375	0,817434	-0,00263	6,94E-06	0,326614	0,106677
380	0,822541	0,000859	7,37E-07	0,335214	0,112368

Modélisation de la TBP du Brut C

T(°C)	ygamma	Yv-yg	Delta ²	Yv-ymoy	Delta ²		
22,5	0,16301324	0,0371	0,028356371	-0,00874363	7,6451E-05		
43,75	0,10979215	0,1095	0,075786606	-0,03371339	0,00113659		
67,5	0,10377997	0,1187	0,138763884	0,02006388	0,00040256		
72,5	0,09925586	0,1258	0,152715143	0,02691514	0,00072442	densité	0,7806
77,5	0,09208128	0,1374	0,166803293	0,02940329	0,00086455	alpha	beta
82,5	0,08130994	0,1557	0,180991675	0,02529168	0,00063967	1,6	146
87,5	0,07168952	0,1731	0,195247464	0,02214746	0,00049051	RMSE	0,012303
92,5	0,06428709	0,1873	0,2095412	0,0222412	0,00049467	R²	0,996564
97,5	0,05534208	0,2056	0,223846412	0,01824641	0,00033293		
102,5	0,04943907	0,2185	0,238139288	0,01963929	0,0003857		
107,5	0,0420861	0,2357	0,252398395	0,0166984	0,00027884		
112,5	0,03498732	0,2538	0,266604443	0,01280444	0,00016395		
117,5	0,02837506	0,2724	0,280740066	0,00834007	6,9557E-05		
122,5	0,02224542	0,2917	0,294789649	0,00308965	9,5459E-06		
127,5	0,01775529	0,3076	0,308739158	0,00113916	1,2977E-06		
132,5	0,01342099	0,325	0,322576002	-0,002424	5,8758E-06		
137,5	0,01027162	0,3395	0,336288899	-0,0032111	1,0311E-05		
142,5	0,00785864	0,3522	0,349867768	-0,00233223	5,4393E-06		
147,5	0,00585975	0,3643	0,363303624	-0,00099638	9,9277E-07		
152,5	0,00420539	0,376	0,376588481	0,00058848	3,4631E-07		
157,5	0,00142499	0,4031	0,389715277	-0,01338472	0,00017915		
162,5	0,00096404	0,4098	0,402677788	-0,00712221	5,0726E-05		
167,5	0,00057835	0,4168	0,415470569	-0,00132943	1,7674E-06		
172,5	0,0001404	0,429	0,428088881	-0,00091112	8,3014E-07		
177,5	3,0138E-07	0,4403	0,440528643	0,00022864	5,2277E-08		
182,5	8,7442E-05	0,4502	0,45278637	0,00258637	6,6893E-06		
187,5	0,00052675	0,4638	0,464859134	0,00105913	1,1218E-06		
192,5	0,00140258	0,4783	0,476744511	-0,00155549	2,4195E-06		
197,5	0,0023572	0,4894	0,488440548	-0,00095945	9,2055E-07		
202,5	0,00324342	0,4978	0,499945717	0,00214572	4,6041E-06		
207,5	0,00441574	0,5073	0,511258889	0,00395889	1,5673E-05		
212,5	0,00621748	0,5197	0,522379296	0,0026793	7,1786E-06		

217,5	0,00810919	0,5309	0,533306503	0,0024065	5,7913E-06
225	0,01287113	0,5543	0,54933486	-0,00496514	2,4653E-05
235	0,01741107	0,5728	0,57003089	-0,00276911	7,668E-06
245	0,02391694	0,5955	0,589960245	-0,00553976	3,0689E-05
255	0,02960155	0,6129	0,609131317	-0,00376868	1,4203E-05
265	0,03642411	0,6317	0,627555237	-0,00414476	1,7179E-05
275	0,04598924	0,6553	0,645245395	-0,0100546	0,0001011
285	0,05228129	0,6695	0,662217024	-0,00728298	5,3042E-05
295	0,05897662	0,6837	0,678486838	-0,00521316	2,7177E-05
305	0,06592109	0,6976	0,694072723	-0,00352728	1,2442E-05
315	0,07526848	0,7152	0,708993469	-0,00620653	3,8521E-05
325	0,0810262	0,7255	0,723268536	-0,00223146	4,9794E-06
335	0,09141614	0,7432	0,736917859	-0,00628214	3,9465E-05
345	0,10468526	0,7644	0,749961671	-0,01443833	0,00020847
355	0,11266161	0,7765	0,762420362	-0,01407964	0,00019824
365	0,11982053	0,787	0,774314347	-0,01268565	0,00016093
372,5	0,12415124	0,7932	0,782876486	-0,01032351	0,00010657

Modélisation de la TBP du Brut D

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,027499	0,042701	0,001823	-0,41458	0,171877		
32,5	0,076277	0,061023	0,003724	-0,34748	0,120743	Densité	0,784
65	0,179728	0,005472	2,99E-05	-0,29958	0,089749	alpha	beta
90	0,260312	-0,00261	6,82E-06	-0,22708	0,051566	1,4	161
110	0,322459	-0,00806	6,49E-05	-0,17038	0,02903		
130	0,381513	-0,00961	9,24E-05	-0,11288	0,012742	RMSE	0,02123
150	0,436996	-0,0149	0,000222	-0,06268	0,003929	R²	0,991973
170	0,488692	-0,01019	0,000104	-0,00628	3,95E-05		
190	0,536556	-0,01336	0,000178	0,038419	0,001476		
212,5	0,585905	-0,0086	7,4E-05	0,092519	0,00856		
237,5	0,635382	-0,00418	1,75E-05	0,146419	0,021439		
262,5	0,67957	0,00043	1,85E-07	0,195219	0,03811		
287,5	0,718875	-0,00158	2,48E-06	0,232519	0,054065		
310	0,750425	0,006575	4,32E-05	0,272219	0,074103		
335	0,781617	0,015883	0,000252	0,312719	0,097793		
362,5	0,811698	0,024002	0,000576	0,350919	0,123144		

Modélisation de la TBP du Brut E

t °C	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,015108	0,049392	0,00244	-0,39215	0,15378	Densité	0,7963
65	0,130727	0,004573	2,09E-05	-0,32135	0,103265	alpha	beta
75	0,158416	0,003584	1,28E-05	-0,29465	0,086817	1,6	159
85	0,186589	-0,00179	3,2E-06	-0,27185	0,073901	RMSE	0,011393
95	0,214984	-0,01488	0,000222	-0,25655	0,065817	R²	0,996808
105	0,243391	-0,00649	4,21E-05	-0,21975	0,048289		
115	0,271636	-0,00844	7,12E-05	-0,19345	0,037422		
125	0,299583	-0,00758	5,75E-05	-0,16465	0,027109		
135	0,327118	-0,00602	3,62E-05	-0,13555	0,018373		
145	0,354151	-0,00385	1,48E-05	-0,10635	0,01131		
155	0,38061	-0,00221	4,88E-06	-0,07825	0,006123		
165	0,406437	-0,00514	2,64E-05	-0,05535	0,003063		
175	0,431589	-0,00139	1,93E-06	-0,02645	0,000699		
185	0,456032	0,001268	1,61E-06	0,000652	4,25E-07		
195	0,479742	-0,00664	4,41E-05	0,016452	0,000271		
205	0,502703	-0,0032	1,03E-05	0,042852	0,001836		
215	0,524905	-0,0021	4,43E-06	0,066152	0,004376		
225	0,546344	0,000756	5,72E-07	0,090452	0,008182		
235	0,56702	-0,00302	9,12E-06	0,107352	0,011524		
242	0,581043	-0,00184	3,4E-06	0,122552	0,015019		
253	0,602333	-0,00483	2,34E-05	0,140852	0,019839		
265	0,624536	0,000964	9,29E-07	0,168852	0,028511		
278	0,647409	-0,00021	4,35E-08	0,190552	0,03631		
289	0,665827	0,003173	1,01E-05	0,212352	0,045093		
300	0,683412	0,004288	1,84E-05	0,231052	0,053385		
312	0,701671	0,009729	9,46E-05	0,254752	0,064899		
322	0,716175	0,012325	0,000152	0,271852	0,073904		
332	0,73005	0,01275	0,000163	0,286152	0,081883		
350	0,753507	0,016593	0,000275	0,313452	0,098252		

Modélisation de la TBP du Brut F

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
20	0,012499207	-0,03140079	0,00098601	-0,35932051	0,12911123		
65	0,087813588	-0,01348641	0,00018188	-0,30192051	0,09115599		
70	0,098473453	-0,01962655	0,0003852	-0,28512051	0,08129371		
75	0,109421711	-0,01617829	0,00026174	-0,27762051	0,07707315		
80	0,120623335	-0,01117667	0,00012492	-0,27142051	0,07366909		
85	0,132045987	-0,00815401	6,6488E-05	-0,26302051	0,06917979	Densité	0,8098
90	0,143659771	-0,00334023	1,1157E-05	-0,25622051	0,06564895	alpha	beta
95	0,155437018	-0,00286298	8,1967E-06	-0,24492051	0,05998606	1,8	164
100	0,16735209	-0,01534791	0,00023556	-0,22052051	0,0486293	RMSE	0,01192215
110	0,191502376	-0,01029762	0,00010604	-0,20142051	0,04057022	R²	0,99665743
120	0,215940437	-0,00925956	8,574E-05	-0,17802051	0,0316913		
130	0,240519808	-0,01338019	0,00017903	-0,14932051	0,02229661		
140	0,265114507	-0,01098549	0,00012068	-0,12712051	0,01615962		
150	0,289616345	-0,00468366	2,1937E-05	-0,10892051	0,01186368		
160	0,313932663	-0,00496734	2,4674E-05	-0,08432051	0,00710995		
165	0,325996064	-0,00380394	1,447E-05	-0,07342051	0,00539057		
170	0,337984408	-0,01081559	0,00011698	-0,05442051	0,00296159		
180	0,361704468	-0,00579553	3,3588E-05	-0,03572051	0,00127595		
190	0,385036245	0,00713624	5,0926E-05	-0,02532051	0,00064113		
200	0,407932396	0,0112324	0,00012617	-0,00652051	4,2517E-05		
210	0,430353741	0,00485374	2,3559E-05	0,02227949	0,00049638		
220	0,452268293	0,01406829	0,00019792	0,03497949	0,00122356		
230	0,473650408	0,01365041	0,00018633	0,05677949	0,00322391		
240	0,49448003	0,01038003	0,00010775	0,08087949	0,00654149		
250	0,514742019	-0,00745798	5,5621E-05	0,11897949	0,01415612		
260	0,534425558	0,00572556	3,2782E-05	0,12547949	0,0157451		
270	0,553523621	0,01472362	0,00021679	0,13557949	0,0183818		
280	0,5720325	0,0204325	0,00041749	0,14837949	0,02201647		
290	0,589951385	0,02195138	0,00048186	0,16477949	0,02715228		
300	0,607281988	0,01488199	0,00022147	0,18917949	0,03578888		
310	0,624028207	0,01282821	0,00016456	0,20797949	0,04325547		
320	0,640195823	0,01069582	0,0001144	0,22627949	0,05120241		
330	0,655792237	0,00599224	3,5907E-05	0,24657949	0,06080144		
340	0,670826229	0,00772623	5,9695E-05	0,25987949	0,06753735		
350	0,685307746	0,00420775	1,7705E-05	0,27787949	0,07721701		
360	0,699247711	0,00484771	2,35E-05	0,29117949	0,0847855		
370	0,712657854	0,00595785	3,5496E-05	0,30347949	0,0920998		
375	0,719168091	0,00246809	6,0915E-06	0,31347949	0,09826939		
380	0,725550562	0,00175056	3,0645E-06	0,32057949	0,10277121		

Modélisation de la TBP du Brut G

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
16	0,00565814	-0,02184186	0,00047707	-0,34173061	0,11677981		
65	0,07494499	0,01984499	0,00039382	-0,31413061	0,09867804		
70	0,08502116	0,02492116	0,00062106	-0,30913061	0,09556173		
75	0,09547703	0,02927703	0,00085714	-0,30303061	0,09182755		
80	0,10627529	0,02647529	0,00070094	-0,28943061	0,08377008		
85	0,11738071	0,01328071	0,00017638	-0,26513061	0,07029424	Densité	0,8114
90	0,12876008	0,00506008	2,5604E-05	-0,24553061	0,06028528	alpha	Beta
95	0,14038205	0,00418205	1,749E-05	-0,23303061	0,05430327	2	145
100	0,15221711	-0,01118289	0,00012506	-0,20583061	0,04236624	RMSE	0,0123528
105	0,16423747	-0,01876253	0,00035203	-0,18623061	0,03468184	R²	0,99624811
110	0,17641695	-0,01388305	0,00019274	-0,17893061	0,03201616		
115	0,18873097	-0,00866903	7,5152E-05	-0,17183061	0,02952576		
120	0,20115642	-0,00574358	3,2989E-05	-0,16233061	0,02635123		
125	0,21367159	-0,00412841	1,7044E-05	-0,15143061	0,02293123		
130	0,22625612	-0,01184388	0,00014028	-0,13113061	0,01719524		
135	0,23889094	-0,01670906	0,00027919	-0,11363061	0,01291192		
140	0,25155818	-0,01504182	0,00022626	-0,10263061	0,01053304		
145	0,26424112	-0,01165888	0,00013593	-0,09333061	0,0087106		
150	0,27692414	-0,01167586	0,00013633	-0,08063061	0,0065013		
155	0,28959268	-0,01310732	0,0001718	-0,06653061	0,00442632		
160	0,30223314	-0,00736686	5,4271E-05	-0,05963061	0,00355581		
165	0,31483287	-0,00326713	1,0674E-05	-0,05113061	0,00261434		
170	0,3273801	0,0010801	1,1666E-06	-0,04293061	0,00184304		
175	0,33986393	-0,01153607	0,00013308	-0,01783061	0,00031793		
180	0,35227423	-0,01302577	0,00016967	-0,00393061	1,545E-05		
185	0,36460165	-0,00409835	1,6796E-05	-0,00053061	2,8155E-07		
190	0,37683755	0,00313755	9,8442E-06	0,00446939	1,9975E-05		
195	0,38897397	0,00857397	7,3513E-05	0,01116939	0,00012476		
200	0,40100359	0,01090359	0,00011889	0,02086939	0,00043553		
205	0,41291971	-0,00408029	1,6649E-05	0,04776939	0,00228191		
210	0,42471621	0,00331621	1,0997E-05	0,05216939	0,00272165		
215	0,43638751	0,00838751	7,035E-05	0,05876939	0,00345384		
220	0,44792853	-0,00017147	2,9402E-08	0,07886939	0,00622038		
230	0,47060192	0,00470192	2,2108E-05	0,09666939	0,00934497		
240	0,49270512	0,00870512	7,5779E-05	0,11476939	0,01317201		
250	0,51421343	0,00891343	7,9449E-05	0,13606939	0,01851488		
260	0,53510798	0,01800798	0,00032429	0,14786939	0,02186536		
270	0,55537506	0,01167506	0,00013631	0,17446939	0,03043957		
280	0,5750055	0,0095055	9,0355E-05	0,19626939	0,03852167		

290	0,59399415	0,00969415	9,3977E-05	0,21506939	0,04625484
300	0,61233937	0,01753937	0,00030763	0,22556939	0,05088155
310	0,63004258	0,01124258	0,0001264	0,24956939	0,06228488
320	0,64710788	0,01300788	0,00016921	0,26486939	0,07015579
330	0,66354168	-0,00555832	3,0895E-05	0,29986939	0,08992165
340	0,67935235	-0,00594765	3,5374E-05	0,31606939	0,09989986
350	0,69454997	-0,00535003	2,8623E-05	0,33066939	0,10934225
360	0,70914602	-0,00505398	2,5543E-05	0,34496939	0,11900388
370	0,7231532	-0,0063468	4,0282E-05	0,36026939	0,12979403
380	0,73658516	-0,00711484	5,0621E-05	0,37446939	0,14022732

Modélisation de la TBP du Brut H

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
23,5	0,01179682	-0,02370318	0,00056184	-0,32611224	0,10634919		
44,25	0,03809277	-0,04190723	0,00175622	-0,28161224	0,07930545		
67,5	0,07993319	-0,00996681	9,9337E-05	-0,27171224	0,07382754		
72,5	0,09020401	-0,00339599	1,1533E-05	-0,26801224	0,07183056	Densité	0,8128
77,5	0,10083561	-0,00036439	1,3278E-07	-0,26041224	0,06781453	alpha	beta
82,5	0,11179173	-0,00210827	4,4448E-06	-0,24771224	0,06136135	2	145
87,5	0,12303815	-0,01156185	0,00013368	-0,22701224	0,05153456	RMSE	0,0115771
92,5	0,13454262	-0,01365738	0,00018652	-0,21341224	0,04554478	R²	0,9963696
97,5	0,14627472	-0,01102528	0,00012156	-0,20431224	0,04174349		
102,5	0,1582058	-0,0060942	3,7139E-05	-0,19731224	0,03893212		
107,5	0,17030889	-0,00399111	1,5929E-05	-0,18731224	0,03508588		
112,5	0,18255862	-0,00604138	3,6498E-05	-0,17301224	0,02993324		
117,5	0,19493116	-0,01066884	0,00011382	-0,15601224	0,02433982		
122,5	0,20740409	-0,00999591	9,9918E-05	-0,14421224	0,02079717		
127,5	0,21995641	-0,00944359	8,9181E-05	-0,13221224	0,01748008		
132,5	0,23256839	-0,00653161	4,2662E-05	-0,12251224	0,01500925		
137,5	0,24522158	-0,01707842	0,00029167	-0,09931224	0,00986292		
142,5	0,25789869	-0,00840131	7,0582E-05	-0,09531224	0,00908442		
147,5	0,27058356	-0,00241644	5,8392E-06	-0,08861224	0,00785213		
152,5	0,2832611	0,0027611	7,6237E-06	-0,08111224	0,0065792		
157,5	0,29591723	0,00491723	2,4179E-05	-0,07061224	0,00498609		
162,5	0,30853885	0,00033885	1,1482E-07	-0,05341224	0,00285287		
167,5	0,32111375	-0,00568625	3,2333E-05	-0,03481224	0,00121189		
172,5	0,33363059	-0,00446941	1,9976E-05	-0,02351224	0,00055283		
177,5	0,34607887	-0,00052113	2,7157E-07	-0,01501224	0,00022537		
182,5	0,35844886	0,00514886	2,6511E-05	-0,00831224	6,9093E-05		
187,5	0,37073155	0,00623155	3,8832E-05	0,00288776	8,3392E-06		
192,5	0,38291866	0,00371866	1,3828E-05	0,01758776	0,00030933		
197,5	0,39500256	0,00670256	4,4924E-05	0,02668776	0,00071224		
202,5	0,40697623	0,00757623	5,7399E-05	0,03778776	0,00142791		
207,5	0,41883328	0,01073328	0,0001152	0,04648776	0,00216111		

212,5	0,43056784	0,01006784	0,00010136	0,05888776	0,00346777
217,5	0,4421746	0,0022746	5,1738E-06	0,07828776	0,00612897
225	0,45933471	0,00503471	2,5348E-05	0,09268776	0,00859102
235	0,48172648	0,01312648	0,0001723	0,10698776	0,01144638
245	0,50353494	0,00943494	8,9018E-05	0,13248776	0,01755301
255	0,5247384	0,0117384	0,00013779	0,15138776	0,02291825
265	0,54532063	0,01102063	0,00012145	0,17268776	0,02982106
275	0,56527027	0,01157027	0,00013387	0,19208776	0,03689771
285	0,58458023	0,01338023	0,00017903	0,20958776	0,04392703
295	0,60324717	0,01314717	0,00017285	0,22848776	0,05220666
305	0,62127103	0,01507103	0,00022714	0,24458776	0,05982317
315	0,63865462	0,01015462	0,00010312	0,26688776	0,07122908
325	0,65540324	0,00790324	6,2461E-05	0,28588776	0,08173181
335	0,67152432	0,01872432	0,0003506	0,29118776	0,08479031
345	0,68702711	0,01542711	0,000238	0,30998776	0,09609241
355	0,70192242	0,01322242	0,00017483	0,32708776	0,1069864
365	0,71622239	0,01022239	0,0001045	0,34438776	0,11860293
375	0,72994019	0,01044019	0,000109	0,35788776	0,12808365

Modélisation de la TBP du Brut I :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
17,7	0,00643781	-0,04256219	0,00181154	-0,32018235	0,10251674		
41,35	0,03168492	-0,04801508	0,002305448	-0,28948235	0,08380003		
67,5	0,07543918	-0,01046082	0,000109429	-0,28328235	0,08024889	Densité	0,8137
72,5	0,08519242	-0,00700758	4,91062E-05	-0,27698235	0,07671922	alpha	Beta
77,5	0,09529986	-0,00770014	5,92922E-05	-0,26618235	0,07085304	2	150
82,5	0,10572779	-0,02027221	0,000410962	-0,24318235	0,05913766	RMSE	0,0240587
87,5	0,11644435	-0,01885565	0,000355535	-0,23388235	0,05470095	R²	0,9839845
92,5	0,1274194	-0,0257806	0,000664639	-0,21598235	0,04664838		
96	0,13524042	-0,04675958	0,002186458	-0,18718235	0,03503723		
98,5	0,14089069	-0,04910931	0,002411724	-0,17918235	0,03210631		
102,5	0,15003268	-0,04846732	0,002349081	-0,17068235	0,02913246		
107,5	0,16161868	-0,04908132	0,002408976	-0,15848235	0,02511666		
112,5	0,17335853	-0,04784147	0,002288806	-0,14798235	0,02189878		
117,5	0,18522971	-0,03887029	0,001510899	-0,14508235	0,02104889		
122,5	0,19721099	-0,04588901	0,002105802	-0,12608235	0,01589676		
127,5	0,20928238	-0,03671762	0,001348184	-0,12318235	0,01517389		
132,5	0,2214251	-0,0275749	0,000760375	-0,12018235	0,0144438		
137,5	0,2336215	-0,0218785	0,000478669	-0,11368235	0,01292368		
142,5	0,245855	-0,023145	0,000535691	-0,10018235	0,0100365		
147,5	0,25811008	-0,01998992	0,000399597	-0,09108235	0,00829599		
152,5	0,27037216	-0,01792784	0,000321407	-0,08088235	0,00654195		
157,5	0,28262761	-0,02597239	0,000674565	-0,06058235	0,00367022		
162,5	0,2948637	-0,0238363	0,000568169	-0,05048235	0,00254847		

167,5	0,30706851	-0,02273149	0,000516721	-0,03938235	0,00155097
172,5	0,31923095	-0,02556905	0,000653777	-0,02438235	0,0005945
177,5	0,33134067	-0,02215933	0,000491036	-0,01568235	0,00024594
182,5	0,34338807	-0,02251193	0,000506787	-0,00328235	1,0774E-05
187,5	0,35536421	-0,01673579	0,000280087	0,00291765	8,5127E-06
192,5	0,36726081	-0,01363919	0,000186027	0,01171765	0,0001373
197,5	0,37907023	-0,01022977	0,000104648	0,02011765	0,00040472
202,5	0,39078539	-0,00551461	3,0411E-05	0,02711765	0,00073537
207,5	0,40239977	-0,00270023	7,29123E-06	0,03591765	0,00129008
212,5	0,4139074	-0,0027926	7,7986E-06	0,04751765	0,00225793
217,5	0,42530279	-0,00219721	4,82771E-06	0,05831765	0,00340095
225	0,4421746	-0,0059254	3,51104E-05	0,07891765	0,006228
235	0,46423445	-0,00656555	4,31064E-05	0,10161765	0,01032615
245	0,48576908	-0,00643092	4,13567E-05	0,12301765	0,01513334
255	0,50675449	-0,00414551	1,71853E-05	0,14171765	0,02008389
265	0,52717193	0,00017193	2,95592E-08	0,15781765	0,02490641
275	0,54700739	0,00630739	3,97831E-05	0,17151765	0,0294183
285	0,566251	0,005851	3,42343E-05	0,19121765	0,03656419
295	0,58489662	0,00609662	3,71688E-05	0,20961765	0,04393956
305	0,60294132	0,01004132	0,000100828	0,22371765	0,05004959
315	0,62038507	0,00468507	2,19499E-05	0,24651765	0,06077095
325	0,63723033	-0,00676967	4,58285E-05	0,27481765	0,07552474
335	0,65348173	-0,00841827	7,08673E-05	0,29271765	0,08568362
345	0,66914582	-0,00775418	6,01274E-05	0,30771765	0,09469015
355	0,68423074	-0,00576926	3,32843E-05	0,32081765	0,10292396
365	0,69874606	-0,00465394	2,16591E-05	0,33421765	0,11170144
372,5	0,70926516	-0,00273484	7,47933E-06	0,34281765	0,11752394
377,5	0,71610564	0,00250564	6,27825E-06	0,34441765	0,11862352

Modélisation de la TBP du Brut J :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15,5	0,02089847	-0,02900153	0,000841089	-0,33847949	0,11456837		
65	0,12139641	0,01789641	0,000320282	-0,28487949	0,08115632		
70	0,13229337	0,01579337	0,000249431	-0,27187949	0,07391846		
75	0,1432169	0,0207169	0,00042919	-0,26587949	0,0706919		
80	0,15415139	0,02645139	0,000699676	-0,26067949	0,0679538	Densité	0,8144
85	0,16508316	0,03148316	0,000991189	-0,25477949	0,06491259	alpha	Beta
90	0,17600014	0,03310014	0,001095619	-0,24547949	0,06026018	1,3	263
95	0,18689164	0,02779164	0,000772375	-0,22927949	0,05256908	RMSE	0,0211204
100	0,19774819	0,01854819	0,000344035	-0,20917949	0,04375606	R²	0,9885995
110	0,21932359	0,02652359	0,000703501	-0,19557949	0,03825134		
120	0,24066915	0,02206915	0,000487047	-0,16977949	0,02882508		
130	0,26173919	0,01923919	0,000370146	-0,14587949	0,02128083		
140	0,28249718	0,02179718	0,000475117	-0,12767949	0,01630205		
150	0,30291396	0,01791396	0,00032091	-0,10337949	0,01068732		

160	0,32296641	0,01866641	0,000348435	-0,08407949	0,00706936
165	0,33285017	0,01655017	0,000273908	-0,07207949	0,00519545
170	0,34263637	0,01423637	0,000202674	-0,05997949	0,00359754
180	0,36190983	0,01070983	0,0001147	-0,03717949	0,00138231
190	0,38077623	0,01837623	0,000337686	-0,02597949	0,00067493
200	0,39922797	0,01582797	0,000250525	-0,00497949	2,4795E-05
210	0,41725988	0,00865988	7,49936E-05	0,02022051	0,00040887
220	0,43486893	0,01226893	0,000150527	0,03422051	0,00117104
230	0,45205386	0,00525386	2,7603E-05	0,05842051	0,00341296
240	0,46881492	0,00431492	1,86185E-05	0,07612051	0,00579433
250	0,48515368	-0,00264632	7,00301E-06	0,09942051	0,00988444
260	0,50107281	-0,01102719	0,000121599	0,12372051	0,01530676
270	0,51657593	-0,00482407	2,32716E-05	0,13302051	0,01769446
280	0,53166745	-0,00533255	2,84361E-05	0,14862051	0,02208806
290	0,54635247	-0,00764753	5,84847E-05	0,16562051	0,02743015
300	0,56063665	-0,00946335	8,95551E-05	0,18172051	0,03302234
310	0,57452613	-0,02027387	0,00041103	0,20642051	0,04260943
320	0,58802748	-0,01827252	0,000333885	0,21792051	0,04748935
330	0,60114756	-0,01605244	0,000257681	0,22882051	0,05235883
340	0,61389351	-0,01530649	0,000234289	0,24082051	0,05799452
350	0,6262727	-0,0183273	0,00033589	0,25622051	0,06564895
360	0,63829264	-0,02790736	0,000778821	0,27782051	0,07718424
370	0,64996098	-0,03823902	0,001462223	0,29982051	0,08989234
375	0,65566571	-0,03923429	0,001539329	0,30652051	0,09395482
380	0,66128545	-0,04261455	0,001816	0,31552051	0,09955319

Modélisation de la TBP du Brut K :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,0043912	-0,0219088	0,00048	-0,470055	0,2209517		
40	0,02808806	-0,05841194	0,00341195	-0,409855	0,16798112		
82,5	0,10013953	-0,04566047	0,00208488	-0,350555	0,12288881	Densité	0,847
112,5	0,16482334	-0,02667666	0,00071164	-0,304855	0,09293657	alpha	Beta
137,5	0,22279974	-0,01800026	0,00032401	-0,255555	0,06530836	2	155
162,5	0,28203496	-0,01096504	0,00012023	-0,203355	0,04135326	RMSE	0,024994
187,5	0,34086762	0,00116762	1,3633E-06	-0,156655	0,02454079	R²	0,9914128
212,5	0,39810336	0,01510336	0,00022811	-0,113355	0,01284936		
237,5	0,45291256	0,02461256	0,00060578	-0,068055	0,00463148		
262,5	0,5047482	0,0276482	0,00076442	-0,019255	0,00037076		
287,5	0,55328004	0,02588004	0,00066978	0,031045	0,00096379		
312,5	0,5983422	0,0264422	0,00069919	0,075545	0,00570705		
337,5	0,63989154	0,02069154	0,00042814	0,122845	0,01509089		
367,5	0,6851843	0,0132843	0,00017647	0,175545	0,03081605		
405	0,735097	-0,004803	2,3069E-05	0,243545	0,05931417		
437,5	0,77273872	-0,00276128	7,6247E-06	0,279145	0,07792193		
462,5	0,79842969	-0,00887031	7,8682E-05	0,310945	0,09668679		

487,5	0,82150944	-0,01539056	0,00023687	0,340545	0,1159709
515	0,84412924	-0,02437076	0,00059393	0,372145	0,1384919
547,5	0,86748213	-0,02911787	0,00084785	0,400245	0,16019606

Modélisation de la TBP du Brut L :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy		
15	-0,02217071	0,00049154	-0,454175	0,20627493		
40	-0,04860098	0,00236206	-0,405375	0,16432889		
82,5	-0,03222102	0,00103819	-0,353275	0,12480323		
112,5	-0,02910801	0,00084728	-0,294475	0,08671553	densité	0,8588
137,5	-0,02450891	0,00060069	-0,243275	0,05918273	alpha	beta
162,5	-0,017211	0,00029622	-0,193275	0,03735523	2	160
187,5	-0,00311549	9,7063E-06	-0,150175	0,02255253	RMSE	0,0243253
212,5	0,00980829	9,6203E-05	-0,107175	0,01148648	R²	0,9915179
237,5	0,02063144	0,00042566	-0,064175	0,00411843		
262,5	0,02819149	0,00079476	-0,020575	0,00042333		
287,5	0,03233266	0,0010454	0,023425	0,00054873		
312,5	0,03415781	0,00116676	0,066525	0,00442558		
337,5	0,03429002	0,00117581	0,108025	0,0116694		
367,5	0,01872457	0,00035061	0,169225	0,0286371		
405	0,00525548	2,762E-05	0,233325	0,05444056		
437,5	0,00390993	1,5288E-05	0,273125	0,07459727		
462,5	-0,0020911	4,3727E-06	0,305525	0,09334553		
487,5	-0,00895551	8,0201E-05	0,336225	0,11304725		
515	-0,02017123	0,00040688	0,370925	0,13758536		
547,5	-0,02447933	0,00059924	0,399625	0,15970014		

Modélisation de la TBP du Brut M

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	Delta ²		
15	0,003671	0,015629	0,000244	-0,43952	0,193178		
40	0,0237	0,0415	0,001722	-0,39362	0,154937		
82,5	0,085778	0,041522	0,001724	-0,33152	0,109906		
112,5	0,142629	0,032171	0,001035	-0,28402	0,080667	alpha	beta
137,5	0,194383	0,025817	0,000667	-0,23862	0,05694	2,2	153
162,5	0,248017	0,019083	0,000364	-0,19172	0,036757	densité	0,8597
187,5	0,302048	0,008652	7,49E-05	-0,14812	0,02194	RMSE	0,023895
212,5	0,355364	-0,00536	2,88E-05	-0,10882	0,011842	R²	0,991421
237,5	0,407151	-0,01615	0,000261	-0,06782	0,0046		
262,5	0,45683	-0,02363	0,000558	-0,02562	0,000656		
287,5	0,504009	-0,02811	0,00079	0,01708	0,000292		
312,5	0,548443	-0,02954	0,000873	0,06008	0,00361		
337,5	0,589999	-0,0304	0,000924	0,10078	0,010157		
367,5	0,636012	-0,02221	0,000493	0,15498	0,024019		

405	0,687697	-0,0071	5,04E-05	0,22178	0,049186
437,5	0,727462	-0,00326	1,06E-05	0,26538	0,070427
462,5	0,755051	0,006549	4,29E-05	0,30278	0,091676
487,5	0,780192	0,015408	0,000237	0,33678	0,113421
515	0,805202	0,021398	0,000458	0,36778	0,135262
547,5	0,831465	0,029335	0,000861	0,40198	0,161588

Modélisation de la TBP du Brut N :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,003869039	0,008631	7,45E-05	-0,41064	0,168621		
40	0,022985952	0,023514	0,000553	-0,37664	0,141854		
82,5	0,07933033	0,03347	0,00112	-0,31034	0,096308		
112,5	0,130073094	0,025527	0,000652	-0,26754	0,071575		
137,5	0,176167677	0,013032	0,00017	-0,23394	0,054726	Densité	0,8756
162,5	0,224056613	0,018043	0,000326	-0,18104	0,032774	alpha	beta
187,5	0,272558903	0,002541	6,46E-06	-0,14804	0,021914	2,6	139
212,5	0,320776013	-0,01298	0,000168	-0,11534	0,013302		
237,5	0,368032977	-0,01653	0,000273	-0,07164	0,005132	RMSE	0,018696
262,5	0,413832607	-0,01553	0,000241	-0,02484	0,000617	R ²	0,994268
287,5	0,457819214	-0,02012	0,000405	0,014565	0,000212		
312,5	0,49974955	-0,01995	0,000398	0,056665	0,003211		
337,5	0,539469356	-0,01887	0,000356	0,097465	0,009499		
367,5	0,584100594	-0,014	0,000196	0,146965	0,021599		
405	0,63518766	-0,00639	4,08E-05	0,205665	0,042298		
437,5	0,675304693	0,000695	4,83E-07	0,252865	0,063941		
462,5	0,703626443	0,010574	0,000112	0,291065	0,084719		
487,5	0,729834237	0,018766	0,000352	0,325465	0,105927		
515	0,7563375	0,021562	0,000465	0,354765	0,125858		
547,5	0,784705341	0,032895	0,001082	0,394465	0,155603		

Modélisation de la TBP du Brut O :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy		
60	0,01206369	0,00014553	-0,4278	0,18301284		
70	0,02532892	0,00064155	-0,4028	0,16224784		
80	0,01744806	0,00030443	-0,3978	0,15824484		
90	0,01156082	0,00013365	-0,3898	0,15194404		
100	0,02079599	0,00043247	-0,3658	0,13380964	Densité	0,8827
110	0,01727221	0,00029833	-0,3538	0,12517444	alpha	beta
120	0,01809862	0,00032756	-0,3368	0,11343424	2	200
130	0,01737553	0,00030191	-0,3208	0,10291264		
140	0,01419502	0,0002015	-0,3068	0,09412624	RMSE	0,0218569
150	0,01164147	0,00013552	-0,2918	0,08514724	R ²	0,9918761
160	0,01579214	0,00024939	-0,2698	0,07279204		
170	0,01171762	0,0001373	-0,2558	0,06543364		

180	0,00748235	5,5986E-05	-0,2418	0,05846724
190	0,003145	9,891E-06	-0,2278	0,05189284
200	-0,00024112	5,8138E-08	-0,2128	0,04528384
210	-0,00362761	1,316E-05	-0,1978	0,03912484
220	-0,00697072	4,8591E-05	-0,1828	0,03341584
230	-0,01023095	0,00010467	-0,1678	0,02815684
240	-0,01237273	0,00015308	-0,1518	0,02304324
250	-0,01436421	0,00020633	-0,1358	0,01844164
260	-0,01717688	0,00029505	-0,1208	0,01459264
270	-0,01878539	0,00035289	-0,1048	0,01098304
280	-0,02016729	0,00040672	-0,0888	0,00788544
290	-0,02030279	0,0004122	-0,0718	0,00515524
300	-0,0211746	0,00044836	-0,0558	0,00311364
310	-0,02176767	0,00047383	-0,0398	0,00158404
320	-0,02206905	0,00048704	-0,0238	0,00056644
330	-0,02206774	0,00048699	-0,0078	6,084E-05
340	-0,02175449	0,00047326	0,0082	6,724E-05
350	-0,02112166	0,00044612	0,0242	0,00058564
360	-0,02016311	0,00040655	0,0402	0,00161604
370	-0,01887408	0,00035623	0,0562	0,00315844
380	-0,018251	0,0003331	0,0712	0,00506944
390	-0,01729149	0,000299	0,0862	0,00743044
400	-0,01499415	0,00022482	0,1022	0,01044484
410	-0,01435854	0,00020617	0,1162	0,01350244
420	-0,01238507	0,00015339	0,1312	0,01721344
430	-0,0100749	0,0001015	0,1462	0,02137444
440	-0,00742989	5,5203E-05	0,1612	0,02598544
450	-0,00545252	2,973E-05	0,1752	0,03069504
460	-0,00214582	4,6045E-06	0,1902	0,03617604
470	0,00048669	2,3687E-07	0,2042	0,04169764
480	0,00444104	1,9723E-05	0,2192	0,04804864
490	0,00771287	5,9488E-05	0,2332	0,05438224
500	0,0122975	0,00015123	0,2482	0,06160324
510	0,01618991	0,00026211	0,2622	0,06874884
520	0,01938488	0,00037577	0,2752	0,07573504
530	0,02387693	0,00057011	0,2892	0,08363664
540	0,0276604	0,0007651	0,3022	0,09132484
550	0,03072948	0,0009443	0,3142	0,09872164
600	0,04914827	0,00241555	0,3732	0,13927824
650	0,06279038	0,00394263	0,4212	0,17740944
700	0,07388823	0,00545947	0,4612	0,21270544

Modélisation de la TBP du Brut P :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,002811	0,014289	0,000204	-0,39084	0,152752		
40	0,018371	0,045729	0,002091	-0,34384	0,118223		
82,5	0,067844	0,037556	0,00141	-0,30254	0,091527		
112,5	0,114362	0,023938	0,000573	-0,26964	0,072703		
137,5	0,15759	0,02021	0,000408	-0,23014	0,052962	Densité	0,8845
162,5	0,203237	0,016963	0,000288	-0,18774	0,035244	alpha	beta
187,5	0,250095	0,010605	0,000112	-0,14724	0,021678	2	195
212,5	0,297214	0,003886	1,51E-05	-0,10684	0,011414		
237,5	0,34385	-0,00765	5,85E-05	-0,07174	0,005146	RMSE	0,020847
262,5	0,389439	-0,01694	0,000287	-0,03544	0,001256	R²	0,992505
287,5	0,433556	-0,01976	0,00039	0,005865	3,44E-05		
312,5	0,475897	-0,0223	0,000497	0,045665	0,002085		
337,5	0,516249	-0,02035	0,000414	0,087965	0,007738		
367,5	0,561863	-0,00966	9,34E-05	0,144265	0,020812		
405	0,614415	-0,00101	1,03E-06	0,205465	0,042216		
437,5	0,65593	-0,00353	1,25E-05	0,244465	0,059763		
462,5	0,685367	0,005533	3,06E-05	0,282965	0,080069		
487,5	0,712703	0,013997	0,000196	0,318765	0,101611		
515	0,740438	0,022562	0,000509	0,355065	0,126071		
547,5	0,770228	0,033172	0,0011	0,395465	0,156393		

Modélisation de la TBP du Brut Q :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
80	0,037415	-0,00181	3,29E-06	-0,30151	0,090907		
90	0,046597	-0,0049	2,4E-05	-0,29541	0,087266		
100	0,056544	-0,00754	5,69E-05	-0,28811	0,083006		
120	0,078466	-0,01137	0,000129	-0,27001	0,072904	densité	0,8889
140	0,102673	-0,01397	0,000195	-0,24841	0,061707	alpha	beta
160	0,128708	-0,01771	0,000314	-0,22611	0,051125	2,1	236
180	0,156162	-0,02466	0,000608	-0,20561	0,042275	RMSE	0,02633
200	0,18467	-0,03317	0,0011	-0,18561	0,03445	R²	0,985546
220	0,213911	-0,03921	0,001538	-0,16241	0,026376		
240	0,243606	-0,03981	0,001585	-0,13331	0,017771		
260	0,27351	-0,03491	0,001219	-0,09851	0,009704		
280	0,303413	-0,02861	0,000819	-0,06231	0,003882		
300	0,333134	-0,02523	0,000637	-0,02921	0,000853		
320	0,362519	-0,02372	0,000563	0,001692	2,86E-06		
340	0,391439	-0,02154	0,000464	0,032792	0,001075		
360	0,419787	-0,01799	0,000324	0,064692	0,004185		
380	0,447474	-0,01307	0,000171	0,097292	0,009466		
400	0,474428	-0,00713	5,08E-05	0,130192	0,01695		
420	0,500593	-0,00049	2,43E-07	0,162992	0,026566		

440	0,525925	0,006775	4,59E-05	0,195592	0,038256
460	0,550393	0,014407	0,000208	0,227692	0,051844
480	0,573974	0,022226	0,000494	0,259092	0,067129
500	0,596656	0,030244	0,000915	0,289792	0,083979
520	0,618433	0,038367	0,001472	0,319692	0,102203
540	0,639305	0,046395	0,002153	0,348592	0,121516
560	0,659279	0,054221	0,00294	0,376392	0,141671

Modélisation de la TBP du Brut R :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
60	0,014897	0,016103	0,000259	-0,36564	0,133693		
70	0,021548	0,024452	0,000598	-0,35064	0,122948		
80	0,029487	0,023513	0,000553	-0,34364	0,118088		
90	0,038678	0,019322	0,000373	-0,33864	0,114677	densité	0,8927
100	0,04907	0,02593	0,000672	-0,32164	0,103452	alpha	beta
110	0,0606	0,0264	0,000697	-0,30964	0,095877	2,7	151
120	0,073197	0,026803	0,000718	-0,29664	0,087995	RMSE	0,017658
130	0,086781	0,026219	0,000687	-0,28364	0,080452	R²	0,994315
140	0,101272	0,024728	0,000611	-0,27064	0,073246		
150	0,116587	0,020413	0,000417	-0,25964	0,067413		
160	0,132642	0,022358	0,0005	-0,24164	0,05839		
170	0,149352	0,020648	0,000426	-0,22664	0,051366		
180	0,166638	0,018362	0,000337	-0,21164	0,044791		
190	0,184419	0,015581	0,000243	-0,19664	0,038667		
200	0,202618	0,013382	0,000179	-0,18064	0,032631		
210	0,221164	0,009836	9,68E-05	-0,16564	0,027437		
220	0,239984	0,007016	4,92E-05	-0,14964	0,022392		
230	0,259015	0,004985	2,49E-05	-0,13264	0,017593		
240	0,278192	0,001808	3,27E-06	-0,11664	0,013605		
250	0,297459	-0,00046	2,1E-07	-0,09964	0,009928		
260	0,31676	-0,00376	1,41E-05	-0,08364	0,006996		
270	0,336045	-0,00605	3,65E-05	-0,06664	0,004441		
280	0,355268	-0,00827	6,84E-05	-0,04964	0,002464		
290	0,374385	-0,01039	0,000108	-0,03264	0,001065		
300	0,393358	-0,01236	0,000153	-0,01564	0,000245		
310	0,41215	-0,01415	0,0002	0,00136	1,85E-06		
320	0,43073	-0,01573	0,000247	0,01836	0,000337		
330	0,449068	-0,01707	0,000291	0,03536	0,00125		
340	0,467139	-0,01814	0,000329	0,05236	0,002742		
350	0,484919	-0,01892	0,000358	0,06936	0,004811		
360	0,502388	-0,02039	0,000416	0,08536	0,007286		
370	0,519528	-0,02053	0,000421	0,10236	0,010478		
380	0,536325	-0,02032	0,000413	0,11936	0,014247		
390	0,552764	-0,01976	0,000391	0,13636	0,018594		

400	0,568836	-0,01784	0,000318	0,15436	0,023827
410	0,584531	-0,01653	0,000273	0,17136	0,029364
420	0,599842	-0,01484	0,00022	0,18836	0,035479
430	0,614764	-0,01276	0,000163	0,20536	0,042173
440	0,629293	-0,01029	0,000106	0,22236	0,049444
450	0,643427	-0,00643	4,13E-05	0,24036	0,057773
460	0,657164	-0,00316	1E-05	0,25736	0,066234
470	0,670505	0,000495	2,45E-07	0,27436	0,075273
480	0,683452	0,004548	2,07E-05	0,29136	0,084891
490	0,696005	0,008995	8,09E-05	0,30836	0,095086
500	0,708169	0,012831	0,000165	0,32436	0,105209
510	0,719947	0,017053	0,000291	0,34036	0,115845
520	0,731345	0,020655	0,000427	0,35536	0,126281
530	0,742366	0,024634	0,000607	0,37036	0,137167
540	0,753018	0,028982	0,00084	0,38536	0,148502
550	0,763305	0,033695	0,001135	0,40036	0,160288

Modélisation de la TBP du Brut S :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
60	0,006201	-0,0012	1,44E-06	-0,33768	0,114028		
70	0,009735	-0,00273	7,48E-06	-0,33568	0,112681		
80	0,01428	-0,00628	3,94E-05	-0,33468	0,112011	densité	0,8939
90	0,019892	-0,00789	6,23E-05	-0,33068	0,109349	alpha	beta
100	0,026602	-0,0126	0,000159	-0,32868	0,108031	3,3	130
110	0,034423	-0,01642	0,00027	-0,32468	0,105417	RMSE	0,050744
120	0,043349	-0,02135	0,000456	-0,32068	0,102836	R²	0,967232
130	0,053362	-0,02636	0,000695	-0,31568	0,099654		
140	0,064428	-0,03243	0,001052	-0,31068	0,096522		
150	0,076505	-0,0395	0,001561	-0,30568	0,09344		
160	0,089541	-0,04354	0,001896	-0,29668	0,088019		
170	0,10348	-0,04948	0,002448	-0,28868	0,083336		
180	0,118256	-0,05426	0,002944	-0,27868	0,077663		
190	0,133804	-0,0598	0,003577	-0,26868	0,072189		
200	0,150054	-0,06505	0,004232	-0,25768	0,066399		
210	0,166935	-0,06994	0,004891	-0,24568	0,060359		
220	0,184376	-0,07338	0,005384	-0,23168	0,053676		
230	0,202307	-0,07531	0,005671	-0,21568	0,046518		
240	0,220656	-0,07666	0,005876	-0,19868	0,039474		
250	0,239355	-0,07436	0,005529	-0,17768	0,03157		
260	0,258339	-0,07134	0,005089	-0,15568	0,024236		
270	0,277544	-0,06654	0,004428	-0,13168	0,01734		
280	0,296909	-0,06191	0,003833	-0,10768	0,011595		
290	0,316375	-0,05838	0,003408	-0,08468	0,007171		
300	0,335888	-0,05489	0,003013	-0,06168	0,003804		

310	0,355396	-0,0504	0,00254	-0,03768	0,00142
320	0,374852	-0,04285	0,001836	-0,01068	0,000114
330	0,394209	-0,03321	0,001103	0,01832	0,000336
340	0,413428	-0,02343	0,000549	0,04732	0,002239
350	0,432469	-0,01547	0,000239	0,07432	0,005523
360	0,451298	-0,0123	0,000151	0,09632	0,009278
370	0,469884	-0,00888	7,89E-05	0,11832	0,014
380	0,488197	-0,0042	1,76E-05	0,14132	0,019971
390	0,506213	0,000787	6,19E-07	0,16432	0,027001
400	0,523908	0,008092	6,55E-05	0,18932	0,035842
410	0,541264	0,015736	0,000248	0,21432	0,045933
420	0,558261	0,023739	0,000564	0,23932	0,057274
430	0,574886	0,032114	0,001031	0,26432	0,069865
440	0,591127	0,039873	0,00159	0,28832	0,083128
450	0,606972	0,048028	0,002307	0,31232	0,097544
460	0,622413	0,054587	0,00298	0,33432	0,11177
470	0,637444	0,060556	0,003667	0,35532	0,126252
480	0,652061	0,065939	0,004348	0,37532	0,140865
490	0,666259	0,070741	0,005004	0,39432	0,155488
500	0,680039	0,073961	0,00547	0,41132	0,169184
510	0,693398	0,077602	0,006022	0,42832	0,183458
520	0,70634	0,07966	0,006346	0,44332	0,196533
530	0,718865	0,074135	0,005496	0,45032	0,202788
540	0,730977	0,070023	0,004903	0,45832	0,210057
550	0,742681	0,075319	0,005673	0,47532	0,225929

Modélisation de la TBP du Brut T :

T(°C)	y _{gamma}	y _v -y _g	delta ²	y _v -y _v moy	delta ²		
60	0,00210633	0,00289367	8,3733E-06	-0,34144	0,11658127		
70	0,00376255	0,00423745	1,7956E-05	-0,33844	0,11454163		
80	0,00615265	0,00284735	8,1074E-06	-0,33744	0,11386575		
90	0,00940511	0,00359489	1,2923E-05	-0,33344	0,11118223		
100	0,01363329	0,00236671	5,6013E-06	-0,33044	0,10919059	densité	0,903
110	0,01893237	0,00406763	1,6546E-05	-0,32344	0,10461343	alpha	Beta
120	0,02537756	0,00262244	6,8772E-06	-0,31844	0,10140403	4,3	96
130	0,03302338	-2,3379E-05	5,4656E-10	-0,31344	0,09824463	RMSE	0,0285481
140	0,04190376	-0,00090376	8,1678E-07	-0,30544	0,09329359	R²	0,9911601
150	0,05203281	-0,00703281	4,946E-05	-0,30144	0,09086607		
160	0,06340604	-0,01040604	0,00010829	-0,29344	0,08610703		
170	0,07600192	-0,01500192	0,00022506	-0,28544	0,08147599		
180	0,08978369	-0,02078369	0,00043196	-0,27744	0,07697295		
190	0,10470128	-0,02770128	0,00076736	-0,26944	0,07259791		
200	0,12069323	-0,03469323	0,00120362	-0,26044	0,06782899		
210	0,13768868	-0,04068868	0,00165557	-0,24944	0,06222031		
220	0,15560923	-0,04460923	0,00198998	-0,23544	0,05543199		

230	0,17437073	-0,04537073	0,0020585	-0,21744	0,04728015
240	0,19388495	-0,04588495	0,00210543	-0,19844	0,03937843
250	0,21406109	-0,04606109	0,00212162	-0,17844	0,03184083
260	0,23480716	-0,04680716	0,00219091	-0,15844	0,02510323
270	0,25603122	-0,04503122	0,00202781	-0,13544	0,01834399
280	0,27764243	-0,04364243	0,00190466	-0,11244	0,01264275
290	0,29955198	-0,04055198	0,00164446	-0,08744	0,00764575
300	0,32167389	-0,03667389	0,00134497	-0,06144	0,00377487
310	0,34392564	-0,03192564	0,00101925	-0,03444	0,00118611
320	0,36622869	-0,02722869	0,0007414	-0,00744	5,5354E-05
330	0,38850889	-0,02250889	0,00050665	0,01956	0,00038259
340	0,41069682	-0,01769682	0,00031318	0,04656	0,00216783
350	0,43272794	-0,01472794	0,00021691	0,07156	0,00512083
360	0,45454278	-0,01154278	0,00013324	0,09656	0,00932383
370	0,47608694	-0,00908694	8,2572E-05	0,12056	0,01453471
380	0,49731112	-0,00531112	2,8208E-05	0,14556	0,02118771
390	0,51817104	-0,00117104	1,3713E-06	0,17056	0,02909071
400	0,53862735	0,00337265	1,1375E-05	0,19556	0,03824371
410	0,55864545	0,00835455	6,9798E-05	0,22056	0,04864671
420	0,57819535	0,01380465	0,00019057	0,24556	0,06029971
430	0,59725143	0,01774857	0,00031501	0,26856	0,07212447
440	0,61579225	0,02220775	0,00049318	0,29156	0,08500723
450	0,6338003	0,0261997	0,00068642	0,31356	0,09831987
460	0,65126174	0,02973826	0,00088436	0,33456	0,11193039
470	0,66816621	0,03183379	0,00101339	0,35356	0,12500467
480	0,6845065	0,0344935	0,0011898	0,37256	0,13880095
490	0,70027833	0,03572167	0,00127604	0,38956	0,15175699
500	0,71548015	0,03651985	0,0013337	0,40556	0,16447891
510	0,73011283	0,03788717	0,00143544	0,42156	0,17771283
520	0,74417945	0,03782055	0,00143039	0,43556	0,18971251
530	0,75768509	0,03831491	0,00146803	0,44956	0,20210419
540	0,77063661	0,03836339	0,00147175	0,46256	0,21396175
550	0,78304242	0,03795758	0,00144078	0,47456	0,22520719
600	0,83726688	0,03673312	0,00134932	0,52756	0,27831955
650	0,87970669	0,03429331	0,00117603	0,56756	0,32212435
700	0,9122244	0,0317756	0,00100969	0,59756	0,35707795

Modélisation de la TBP du Brut U :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
60	0,007127	0,028873	0,000834	-0,34902	0,121815		
70	0,011158	0,039842	0,001587	-0,33402	0,111569		
80	0,016324	0,041676	0,001737	-0,32702	0,106942		
90	0,022678	0,041322	0,001707	-0,32102	0,103054	densité	0,9036
100	0,030248	0,052752	0,002783	-0,30202	0,091216	alpha	beta

110	0,039037	0,054963	0,003021	-0,29102	0,084693	3,3	124
120	0,049032	0,056968	0,003245	-0,27902	0,077852	RMSE	0,032999
130	0,060202	0,061798	0,003819	-0,26302	0,06918	R²	0,978348
140	0,072501	0,060499	0,00366	-0,25202	0,063514		
150	0,085875	0,057125	0,003263	-0,24202	0,058574		
160	0,100257	0,061743	0,003812	-0,22302	0,049738		
170	0,115576	0,058424	0,003413	-0,21102	0,044529		
180	0,131757	0,054243	0,002942	-0,19902	0,039609		
190	0,148719	0,050281	0,002528	-0,18602	0,034603		
200	0,166382	0,045618	0,002081	-0,17302	0,029936		
210	0,184662	0,040338	0,001627	-0,16002	0,025606		
220	0,203478	0,035522	0,001262	-0,14602	0,021322		
230	0,222751	0,030249	0,000915	-0,13202	0,017429		
240	0,2424	0,0256	0,000655	-0,11702	0,013694		
250	0,26235	0,01965	0,000386	-0,10302	0,010613		
260	0,282529	0,014471	0,000209	-0,08802	0,007748		
270	0,302866	0,010134	0,000103	-0,07202	0,005187		
280	0,323296	0,005704	3,25E-05	-0,05602	0,003138		
290	0,343758	0,001242	1,54E-06	-0,04002	0,001602		
300	0,364192	-0,00219	4,8E-06	-0,02302	0,00053		
310	0,384545	-0,00555	3,08E-05	-0,00602	3,62E-05		
320	0,404768	-0,00977	9,54E-05	0,00998	9,96E-05		
330	0,424815	-0,01281	0,000164	0,02698	0,000728		
340	0,444643	-0,01564	0,000245	0,04398	0,001934		
350	0,464216	-0,01822	0,000332	0,06098	0,003719		
360	0,483499	-0,0215	0,000462	0,07698	0,005926		
370	0,502461	-0,02346	0,00055	0,09398	0,008832		
380	0,521077	-0,02608	0,00068	0,10998	0,012096		
390	0,539322	-0,02732	0,000746	0,12698	0,016124		
400	0,557176	-0,02818	0,000794	0,14398	0,02073		
410	0,574621	-0,02762	0,000763	0,16198	0,026238		
420	0,591644	-0,02664	0,00071	0,17998	0,032393		
430	0,608232	-0,02523	0,000637	0,19798	0,039196		
440	0,624376	-0,02338	0,000546	0,21598	0,046647		
450	0,640068	-0,02107	0,000444	0,23398	0,054747		
460	0,655303	-0,0193	0,000373	0,25098	0,062991		
470	0,670079	-0,01908	0,000364	0,26598	0,070745		
480	0,684394	-0,01839	0,000338	0,28098	0,07895		
490	0,698248	-0,01625	0,000264	0,29698	0,088197		
500	0,711643	-0,01264	0,00016	0,31398	0,098583		
510	0,724582	-0,00958	9,18E-05	0,32998	0,108887		
520	0,737069	0,000931	8,68E-07	0,35298	0,124595		
530	0,749109	-0,00411	1,69E-05	0,35998	0,129586		
540	0,760709	-0,00271	7,34E-06	0,37298	0,139114		
550	0,771877	0,000123	1,52E-08	0,38698	0,149754		

Modélisation de la TBP du Brut V :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
80	0,008136963	0,01506304	0,0002269	-0,343812	0,11820669		
90	0,011999386	0,01590061	0,00025283	-0,339112	0,11499695		
100	0,016862832	0,01683717	0,00028349	-0,333312	0,11109689		
120	0,029834922	0,01876508	0,00035213	-0,318412	0,1013862		
140	0,047346393	0,02065361	0,00042657	-0,299012	0,08940818	densité	0,909
160	0,069409773	0,02109023	0,0004448	-0,276512	0,07645889	alpha	Beta
180	0,095805376	0,01779462	0,00031665	-0,253412	0,06421764	3,8	109
200	0,12613669	0,01056331	0,00011158	-0,230312	0,05304362	<u>RMSE</u>	<u>0,0157789</u>
220	0,159884625	0,00321537	1,0339E-05	-0,203912	0,0415801	R²	0,9965169
240	0,19645622	0,00154378	2,3833E-06	-0,169012	0,02856506		
260	0,235225725	0,00627427	3,9367E-05	-0,125512	0,01575326		
280	0,275567513	0,01253249	0,00015706	-0,078912	0,0062271		
300	0,316881095	0,0167189	0,00027952	-0,033412	0,00111636		
320	0,358609037	0,01849096	0,00034192	0,010088	0,00010177		
340	0,40024877	0,01835123	0,00033677	0,051588	0,00266132		
360	0,441359368	0,01734063	0,0003007	0,091688	0,00840669		
380	0,481564329	0,01613567	0,00026036	0,130688	0,01707935		
400	0,520551275	0,01514873	0,00022948	0,168688	0,02845564		
420	0,558069405	0,01443059	0,00020824	0,205488	0,04222532		
440	0,593925386	0,01417461	0,00020092	0,241088	0,05812342		
460	0,627978228	0,01422177	0,00020226	0,275188	0,07572844		
480	0,660133621	0,01466638	0,0002151	0,307788	0,09473345		
500	0,690338049	0,01536195	0,00023599	0,338688	0,11470956		
520	0,718572964	0,01632704	0,00026657	0,367888	0,13534158		
540	0,744849196	0,0173508	0,00030105	0,395188	0,15617356		
560	0,769201726	0,01839827	0,0003385	0,420588	0,17689427		
580	0,791684909	0,01951509	0,00038084	0,444188	0,19730298		

Modélisation de la TBP du Brut W :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
60	0,006062	0,007938	6,3E-05	-0,33958	0,115315		
70	0,009521	0,014479	0,00021	-0,32958	0,108623		
80	0,013973	0,014027	0,000197	-0,32558	0,106002	densité	0,9123
90	0,019472	0,013528	0,000183	-0,32058	0,102772	alpha	beta
100	0,026051	0,019949	0,000398	-0,30758	0,094605	3,3	131
110	0,033723	0,022277	0,000496	-0,29758	0,088554	<u>RMSE</u>	<u>0,018767</u>
120	0,042486	0,026514	0,000703	-0,28458	0,080986	R²	0,993941
130	0,05232	0,02768	0,000766	-0,27358	0,074846		
140	0,063196	0,030804	0,000949	-0,25958	0,067382		
150	0,075072	0,026928	0,000725	-0,25158	0,063292		
160	0,0879	0,0251	0,00063	-0,24058	0,057879		

170	0,101622	0,019378	0,000376	-0,23258	0,054093
180	0,116178	0,012822	0,000164	-0,22458	0,050436
190	0,131504	0,006496	4,22E-05	-0,21558	0,046475
200	0,147531	0,001469	2,16E-06	-0,20458	0,041853
210	0,16419	-0,00419	1,76E-05	-0,19358	0,037473
220	0,181411	-0,00841	7,08E-05	-0,18058	0,032609
230	0,199126	-0,01113	0,000124	-0,16558	0,027417
240	0,217266	-0,01327	0,000176	-0,14958	0,022374
250	0,235763	-0,01576	0,000248	-0,13358	0,017844
260	0,254552	-0,01655	0,000274	-0,11558	0,013359
270	0,273571	-0,01757	0,000309	-0,09758	0,009522
280	0,292759	-0,01876	0,000352	-0,07958	0,006333
290	0,31206	-0,02006	0,000402	-0,06158	0,003792
300	0,331418	-0,02142	0,000459	-0,04358	0,001899
310	0,350783	-0,02278	0,000519	-0,02558	0,000654
320	0,370107	-0,02111	0,000445	-0,00458	2,1E-05
330	0,389344	-0,01734	0,000301	0,01842	0,000339
340	0,408455	-0,01446	0,000209	0,04042	0,001634
350	0,427401	-0,0124	0,000154	0,06142	0,003772
360	0,446147	-0,01215	0,000148	0,08042	0,006467
370	0,464661	-0,01166	0,000136	0,09942	0,009884
380	0,482915	-0,01091	0,000119	0,11842	0,014023
390	0,500882	-0,00788	6,21E-05	0,13942	0,019438
400	0,51854	-0,00354	1,25E-05	0,16142	0,026056
410	0,53587	0,00113	1,28E-06	0,18342	0,033643
420	0,552852	0,046148	0,00213	0,24542	0,060231
430	0,569471	0,010529	0,000111	0,22642	0,051266
440	0,585716	0,013284	0,000176	0,24542	0,060231
450	0,601574	0,016426	0,00027	0,26442	0,069918
460	0,617037	0,017963	0,000323	0,28142	0,079197
470	0,632099	0,018901	0,000357	0,29742	0,088459
480	0,646753	0,020247	0,00041	0,31342	0,098232
490	0,660997	0,021003	0,000441	0,32842	0,10786
500	0,674829	0,021171	0,000448	0,34242	0,117251
510	0,688247	0,021753	0,000473	0,35642	0,127035
520	0,701253	0,021747	0,000473	0,36942	0,136471
530	0,713847	0,022153	0,000491	0,38242	0,146245
540	0,726034	0,022966	0,000527	0,39542	0,156357
550	0,737817	0,023183	0,000537	0,40742	0,165991

Modélisation de la TBP du Brut X :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
100	0,023035	-0,00624	3,89E-05	-0,35772	0,127966		
120	0,037746	-0,01035	0,000107	-0,34712	0,120495		
140	0,056406	-0,01401	0,000196	-0,33212	0,110306		
160	0,078814	-0,01661	0,000276	-0,31232	0,097546	densité	0,9154
180	0,104636	-0,02014	0,000405	-0,29002	0,084114	alpha	beta
200	0,133456	-0,02806	0,000787	-0,26912	0,072428	3,3	137
220	0,164809	-0,03571	0,001275	-0,24542	0,060233	<u>RMSE</u>	<u>0,021979</u>
240	0,19821	-0,03371	0,001136	-0,21002	0,04411	R²	0,992427
260	0,233178	-0,02718	0,000739	-0,16852	0,0284		
280	0,269251	-0,02215	0,000491	-0,12742	0,016237		
300	0,305993	-0,01869	0,000349	-0,08722	0,007608		
320	0,343011	-0,01581	0,00025	-0,04732	0,00224		
340	0,37995	-0,01255	0,000157	-0,00712	5,08E-05		
360	0,416498	-0,0088	7,74E-05	0,033176	0,001101		
380	0,45239	-0,00459	2,11E-05	0,073276	0,005369		
400	0,487401	-0,0003	9,07E-08	0,112576	0,012673		
420	0,521346	0,004154	1,73E-05	0,150976	0,022794		
440	0,554077	0,008623	7,44E-05	0,188176	0,03541		
460	0,585481	0,013119	0,000172	0,224076	0,05021		
480	0,615475	0,017725	0,000314	0,258676	0,066913		
500	0,644004	0,022396	0,000502	0,291876	0,085192		
520	0,671034	0,027166	0,000738	0,323676	0,104766		
540	0,696554	0,031746	0,001008	0,353776	0,125157		
560	0,720569	0,036231	0,001313	0,382276	0,146135		
580	0,7431	0,0404	0,001632	0,408976	0,167261		

Modélisation de la TBP du Brut Y :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,00179945	-0,00490055	2,4015E-05	-0,267445	0,07152683		
40	0,01196221	-0,03493779	0,00122065	-0,227245	0,05164029		
82,5	0,04544007	-0,03955993	0,00156499	-0,189145	0,03577583	densité	0,9325
112,5	0,07808894	-0,03611106	0,00130401	-0,159945	0,0255824	alpha	beta
137,5	0,10930573	-0,02279427	0,00051958	-0,142045	0,02017678	2	245
162,5	0,14314158	-0,01925842	0,00037089	-0,111745	0,01248695	RMSE	0,0214315
187,5	0,17879459	-0,01340541	0,00017971	-0,081945	0,00671498	R²	0,9892347
212,5	0,21559379	-0,00940621	8,8477E-05	-0,049145	0,00241523		
237,5	0,25298129	0,00408129	1,6657E-05	-0,025245	0,00063731		
262,5	0,29049666	0,01629666	0,00026558	5,5E-05	3,025E-09		
287,5	0,32776325	0,01976325	0,00039059	0,033855	0,00114616		
312,5	0,36447631	0,03047631	0,00092881	0,059855	0,00358262		
337,5	0,40039252	0,03109252	0,00096675	0,095155	0,00905447		
367,5	0,4421746	0,0165746	0,00027472	0,151455	0,02293862		
405	0,4920372	0,0061372	3,7665E-05	0,211755	0,04484018		
437,5	0,53289909	0,00909909	8,2793E-05	0,249655	0,06232762		
462,5	0,56276116	0,00156116	2,4372E-06	0,287055	0,08240057		
487,5	0,59122516	-0,00577484	3,3349E-05	0,322855	0,10423535		
515	0,62090961	-0,01579039	0,00024934	0,362555	0,13144613		
547,5	0,65380725	-0,02579275	0,00066527	0,405455	0,16439376		

Modélisation de la TBP du Brut Z :

T(°C)	ygamma	yv-yg	delta ²	yv-yvmoy	delta ²		
15	0,00187362	0,01632638	0,00026655	-0,30389	0,09234913		
80	0,04462492	-0,00162492	2,6404E-06	-0,27909	0,07789123		
150	0,13020018	-0,04120018	0,00169745	-0,23309	0,05433095	densité	0,9395
175	0,16600433	-0,05460433	0,00298163	-0,21069	0,04439028	alpha	beta
230	0,24891734	-0,06451734	0,00416249	-0,13769	0,01895854	2	240
325	0,39224282	-0,02154282	0,00046409	0,04861	0,00236293	RMSE	0,0445804
350	0,42813351	0,00156649	2,4539E-06	0,10761	0,01157991	R²	0,97099
375	0,46287082	0,02352918	0,00055362	0,16431	0,02699778		
550	0,66721966	0,06638034	0,00440635	0,41151	0,16934048		
565	0,68144601	0,07305399	0,00533689	0,43241	0,18697841		

Annexe II : Abaque pour la détermination de la température moyenne d'ébullition d'un pétrole brut

