

17/95
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **GENIE CHIMIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETABLISSEMENT D'UN
LOGICIEL DE MISE EN
OEUVRE DU PETROLE
BRUT

Proposé par :

Mr. Pr. C.E. Chitour.

Etudié par :

Mr. Toumi Slimane

Dirigé par :

Mr. Pr. C.E. Chitour

PROMOTION

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer tout l'honneur que j'ai eu à travailler avec Monsieur le Professeur C.E.Chitour.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail:

Le président du jury:
Monsieur M.BENIDDIR,

Les membres du jury:
Madame F.MEZIANI,
Madame F.SOUAHI,
Monsieur S.SATOR.

Enfin je ne serais assez reconnaissant en vers ceux qui m'ont soutenu moralement et matériellement afin de mener à terme ce travail.

Toumi Slimane.

DEDICACES

A la mémoire de mon père;
A ma mère;
A mes soeurs et mes frères;
A mes nièces et neveux;
A mes amis (es);
A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce modeste travail.

Toumi Slimane.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

**Ce travail entre dans
le cadre
des activités
de recherche du
Laboratoire de
Valorisation
des Energies
Fossiles**

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DU PETROLE BRUT

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DELEGUE AUX UNIVERSITES

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, ALGER

DEPARTEMENT GENIE CHIMIQUE

ELABORATION D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE
DU PETROLE BRUT

ELEVE INGENIEUR: Toumi Slimane, PROMOTEUR: Pr. C.E. Chitour.
Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles.

ملخص :

يتضمن موضوع أطروحتنا نماذج برنامج معلوماقي
ينمكفل بتجزئة البترول الخام.
وينقسم هذا العمل إلى قسمين رئيسيين :

1- إيجاد منهج للتقدير الكمي والنوعي للقطافات
البتروولية (غاز، بنزين، كيروزان، غازول) وتحقيق
برنامج مثالي لمنتجاق مصفاة بتروولية.

2- ترجمة كذا المنهج إلى برنامج معلوماقي

ABSTRACT.....

The aim of this study is concerned with crude oil and petroleum fractions.

This study is divided in two major parts.

Firstly, quantitative and qualitative modelling of petroleum fractions (gaz, benzin, kerozene, gasoil) are made and an optimal program of petroleum refinery production is set up.

The translation of the model into a program is then made.

RESUME.....

Notre étude consiste en l'élaboration d'un logiciel de mise en oeuvre de pétrole brut.

Elle comprend deux parties:

1- Etablissement d'un modèle d'évaluation quantitative et qualitative des coupes pétrolières (Gaz, essence, Kérosène, Gas-oil) et l'élaboration d'un programme optimal de fabrication d'une raffinerie de pétrole.

2- Traduction du modèle en langage informatique.

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DU PETROLE BRUT

SOMMAIRE

=====

- INTRODUCTION	1
PARTIE THEORIQUE	

- GENERALITE	2
- PARTIE: A	
I- LES ANALYSES DE PETROLE BRUT	2
1- Introduction	
2- Les essais normalisés:	
- Distillation T.P.B.	
- Distillation A.S.T.M.	
- Température d'ébullition	
- Densité	
- Kuop	
- Masse molaire	
- Indice de réfraction	
- Indice de corrélation	
- Réfraction molaire	
- Tension de vapeur	
- Indice d'octane	
- Plomb tétraéthyle	
- Indice de cétane	
- Point d'aniline	
- Point de trouble et d'écoulement	
- Indice de diesel	
- Point de congélation	
- Viscosité	
- Teneur en soufre	
4- DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU PETROLE BRUT	14
ET DES FRACTIONS PETROLIERES:	
- Par analyses	
- Par corrélations	
II- LES PRODUITS PETROLIERS ET LEURS SPECIFICATIONS	15
- Les gaz liquéfiés	
- Les essences	
- Les carburateurs	
- Le gas-oil	
- Les fuel-oils	

III- MISES EN OEUVRE DU PETROLE BRUT . . .

- Introduction
- courbe de propriétés instantanées
- courbe de propriétés rendement
- courbe iso-propriétés

IV- LES OPERATIONS DE TRANSFORMATIONS 22

IV.1- LES OPERATIONS TRANSFORMATIONS PHYSIQUES 22

- IV.1.1 - Introduction
- IV.1.2 - Distillation atmosphérique
- IV.1.3 - Distillation sous vide

IV.2- LES OPERATIONS DES TRANSFORMATIONS MOLECULAIRES..24

- IV.2.1 - Introduction
- IV.2.2 - Reforming catalytique
- IV.2.3 - Cracking catalytique
- IV.2.4 - Hydrocracking
- IV.2.5 - visbreaking
- IV.2.6 - fluid coking

PARTIE B:

I- ETABLISSEMENT D'UN PROGRAMME OPTIMAL DE FABRICATION D'UNE RAFFINERIE ..26

- 1 - Généralité
- 2 - Programmation linéaire
- 3 - Méthode du simplexe
- 4 - Notion de dualité
- 5 - Paramétrisation
- 6 - Coûts marginaux
- 7 - Coûts de substitution

PARTIE CALCUL

I - MODELISATION ..31

I.1 - GENERALITE
I.2 - ETABLISSEMENT D'UN MODELE DE DECOUPAGE DE PETROLE BRUT

- 1 - Introduction
- 2 - Choix de la charge
- 3 - Fractionnement
 - 1.1 - marche essence
 - 1.2 - marche gas-oil
 - 1.3 - marche mixte

4 - Détermination des caractéristiques des produits

I.3 - ETABLISSEMENT D'UN PROGRAMME OPTIMAL D'UNE RAFFINERIE 34

- 1 - Les renseignements nécessaires pour établir un programme optimal d'une raffinerie
- 2 - Les résultats du programme

II - PROGRAMMATION INFORMATIQUE 35

- 1 - introduction
- 2 - description du logiciel MOPB
- 3 - utilisation du logiciel MOPB

III - APPLICATIONS NUMERIQUES
- Maximisation de bénéfices
- minimisation de dépenses

IV - CONCLUSION 58

V - ANNEXE 60

INTRODUCTION

Chacun sait la place du pétrole dans l'équilibre de la planète, où il est utilisé comme carburant, combustible, et aussi comme matière première pour l'industrie pétrochimique. Son étude a intéressé de nombreux chercheurs dans le monde, notamment aux Etats-Unis, en Europe et en Ex-URSS.

L'industrie du raffinage du pétrole a pour objet de fournir des dérivées du pétrole issues de la distillation en vue de valoriser quantitativement et qualitativement ces produits sur un triple plan: énergétique, industriel, et financier.

Il apparait ainsi comme une nécessité économique croissante d'implanter sur un ordinateur des systèmes de calculs a cette industrie chimique.

C'est dans cetttes perspectives que vient s'insérer notre présente étude, celle-ci consisté en l'élaboration d'un logiciel de mise en oeuvre du pétrole brut.

Dans un premier temps nous établirons un modèle de découpage du pétrole en vue d'obtenir toute la gamme bien connue des produits finis, tout en axant, dans la marche A, nos efforts sur la production des essences, c'est généralement la tendance aux Etats-Unis où on utilisé un maximum d' essence; et en essayent dans la marche B, d'obtenir un maximum en gas-oil, marche surtout, utilisée en Europe.

Dans un deuxième temps, nous essayerons d'optimiser la production des produits obtenus en fonction de leurs prix de ventes ou en fonction de prix d'achat de pétrole brut en vue d'établir un programme optimal de gestion d'une raffinerie, en utilisant la méthode du simplexe.

Enfin nous traduisons les deux modèles en langage informatique pour établir un logiciel.

GENERALITE

Le raffinage de pétrole a pour objet, de transformer le pétrole brut reçu à l'usine en carburants, combustible, lubrifiants, etc; qui seront acheminés ensuite vers un réseau de distribution.

Il appartient aux services commerciaux d'établir leurs prévisions de vente de chacun des produits.

Ces prévisions devront parvenir en temps voulu au raffineur chargé d'élaborer les produits en question.

Le pétrole brut est un liquide noir, quelquefois à reflets verdâtres, et généralement plus léger que l'eau. Il est plus au moins fluide suivant son origine et son odeur est habituellement forte et caractéristique.

Les pétroles de divers gisements peuvent présenter des différences considérables du point de vue composition. La connaissance des compositions et des rendements des différentes fractions d'un pétrole nous aidera à choisir les meilleurs procédés de transformation en vue de valoriser telle ou telle coupe pétrolière. Les préliminaires à réaliser pour l'étude d'un pétrole sont la détermination des propriétés physiques (mesure de densité, de viscosité, point de congélation et des teneurs en soufre et en sédiments).

Ensuite il y a lieu de songer à la séparation par distillation fractionnée.

ANALYSE DE PETROLE BRUT

Lorsque on découvre un pétrole brut on fait une série d'expériences au laboratoire pour déterminer la composition et le rendement en certaines fractions, de ce pétrole.

L'industrie de raffinage met en oeuvre des techniques de séparation et transformation permettant de produire à partir du pétrole brut des produits commerciaux allant des gaz au coke. L'ordonnement logique des différentes opérations de traitement de brut consiste le schéma de fabrication dont l'élaboration nécessite la connaissance précise des éléments suivants:

- Caractéristiques des produits finis et spécifications qui seront déterminées soit à partir des mesures au laboratoire ou à partir des corrélations ;
- Composition du pétrole brut et produits finis;
- Les propriétés physico-chimiques des hydrocarbures ou des fractions pétrolières;
- les techniques de séparations et de transformation;

Il est impossible d'envisager dans le cadre de ce travail l'étude complète des nombreux produits pétroliers livrés à la consommation, et les spécifications relatives à ces produits seuls les grandes classes de produits finis et leurs spécifications principales.

Les méthodes d'essais normalisés sont les méthodes adoptées par un organisme national de normalisation.

Tous les grands pays possèdent actuellement des organismes qui mettent au point et publient les normes pour les différentes branches de l'industrie.

En France c'est AFNOR (Association Française de Normalisation), aux USA: ASTM (American society for testing of Materials).

En Angleterre : IB

En Allemagne : DIN

Actuellement, la majorité des méthodes sont devenues internationales et ne diffèrent souvent que par le choix de

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

La distillation T.B.P.

La distillation "T.B.P." (True Boiling Point) ou distillation " parfaite " est un procédé de séparation d'un pétrole brut ou d'une coupe pétrolière en fractions composées d'hydrocarbures ayant des propriétés suffisamment voisines pour leur donner la même utilisation.

C'est une opération fondamentale dans l'industrie du raffinage. Et pour séparer, ce type de distillation utilise la différence des points d'ébullition entre des hydrocarbures qui se trouvent mélangés et même dissous les uns dans les autres dans la matière première.

Une telle distillation est conduite dans une colonne à garnissage. Au sommet de cette colonne passe tout d'abord la totalité du constituant le plus volatil et ensuite tous les constituants purs, par ordre de volatilité. Dans ces conditions, tant que passera le constituant le plus volatil, sa température de passage demeure constante et égale à sa température d'ébullition, puis brusquement apparaît le constituant suivant, la température de passage montera jusqu'à sa température d'ébullition qui d'ailleurs demeure constante jusqu'à son épuisement et ainsi de suite, cette rectification dite T.B.P. (true boiling point). Les courbes de distillation T.B.P. d'un pétrole brut ou d'une coupe pétrolière obtenues réellement sont légèrement différentes des courbes théoriques pour les raisons suivantes :

- L'appareillage n'a pas un nombre de plateaux infini, ni un taux de reflux infini.
- Les hydrocarbures d'un pétrole brut ou d'une coupe pétrolière ont des natures chimiques différentes provoquant la formation d'azéotropes.

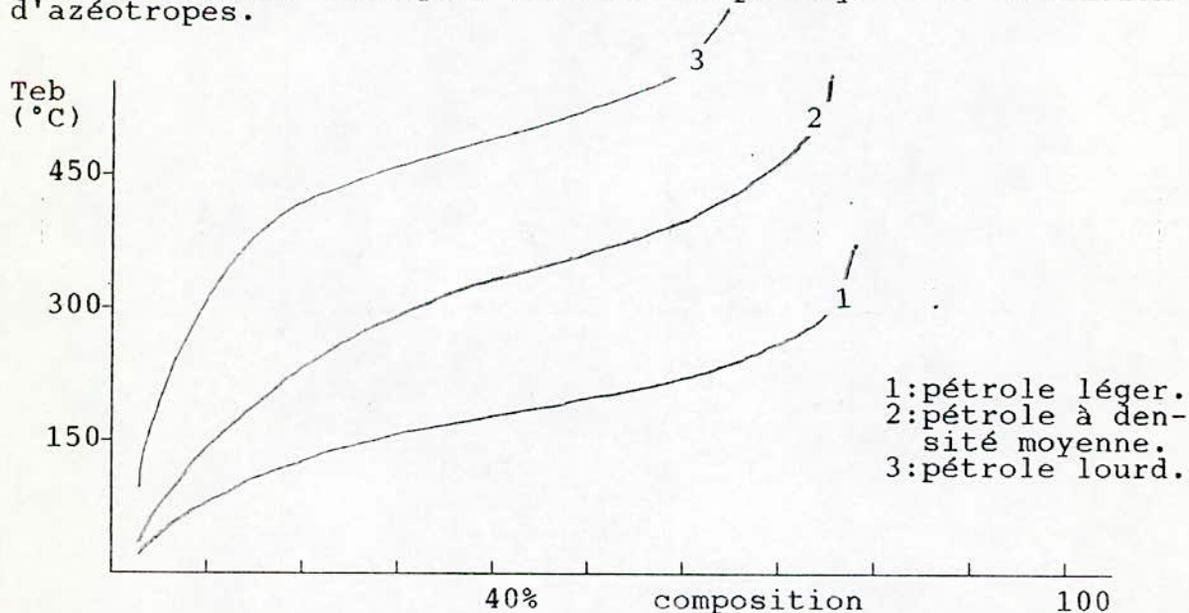
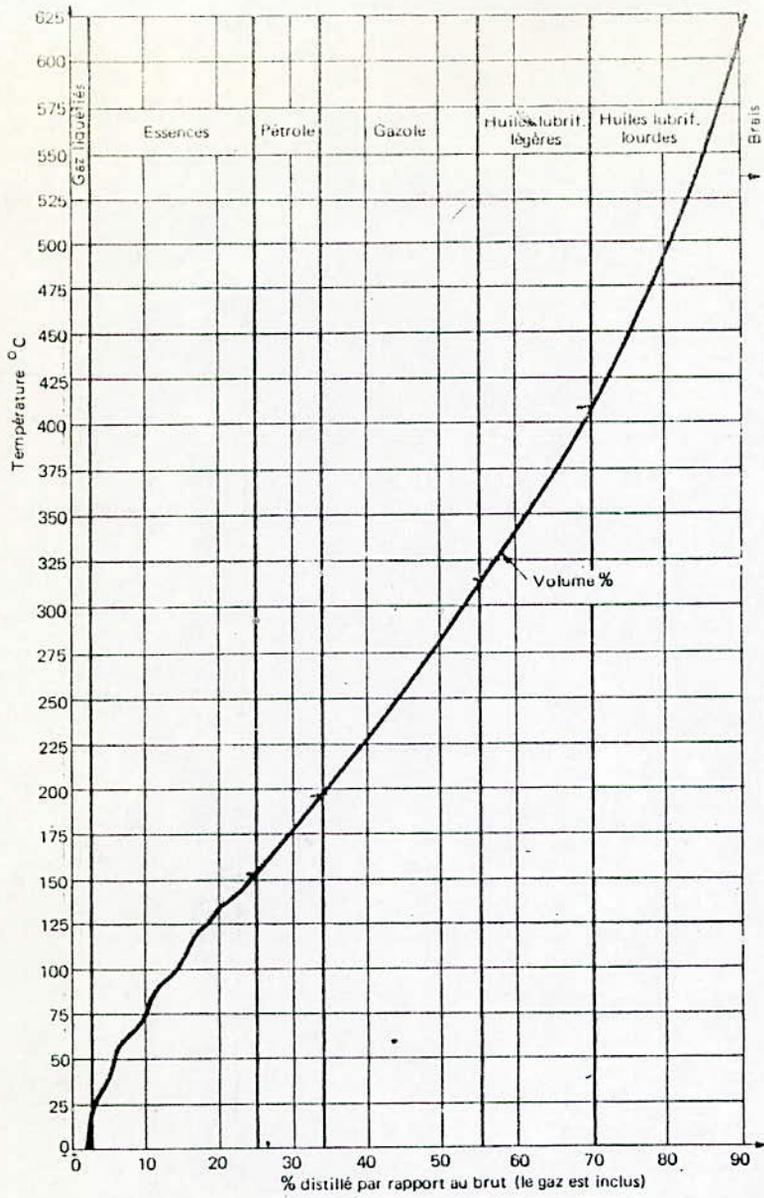
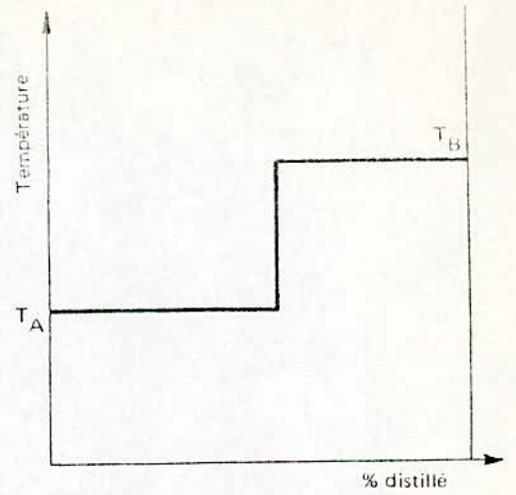


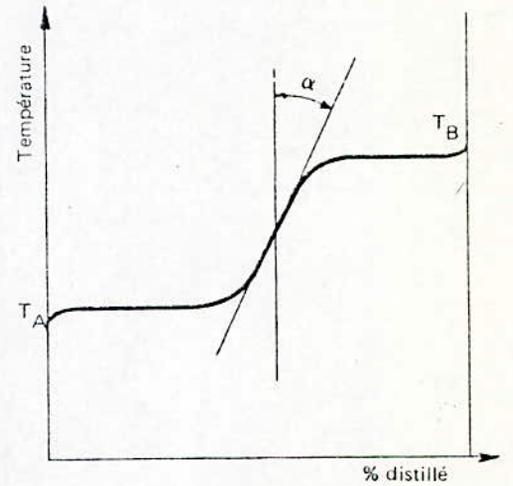
Figure 2: COURBE DE DISTILLATION T.B.P. DE DIFFERENTS BRUTS EN FONCTION DE LEUR DENSITE



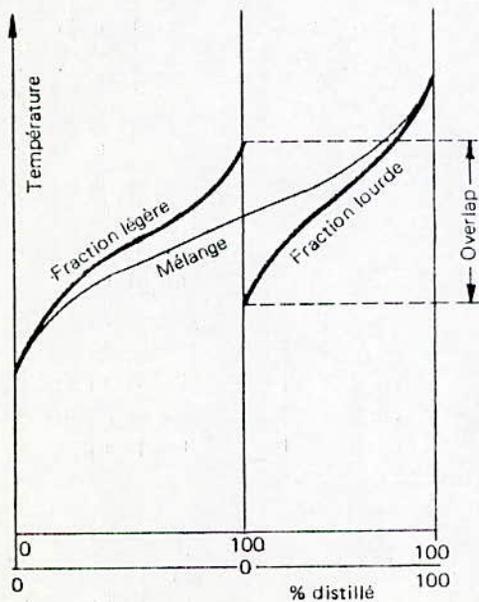
Courbe T.B.P. du brut d'Irak.



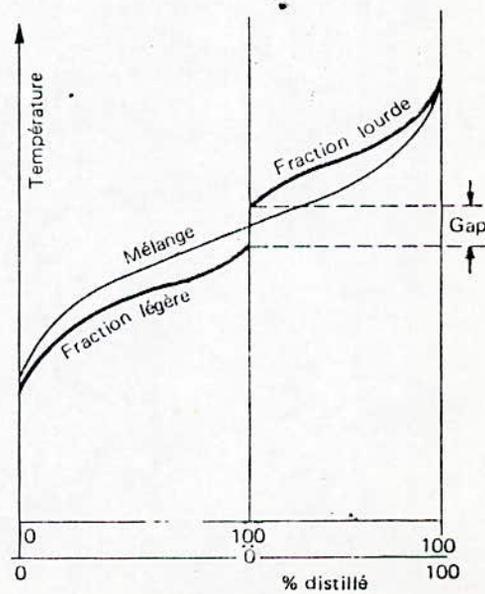
Courbe T.B.P. d'un mélange binaire.



Courbe de distillation (par exemple A.S.T.M.) d'un mélange binaire.



Overlap (sur A.S.T.M.)



Gap (sur A.S.T.M.)

La distillation ASTM (American society for testing materials) [] .

Dans l'industrie du pétrole, il est fait appel aussi à une norme d'analyse appelée distillation ASTM. Elle permet de prévoir le comportement physique du pétrole ou d'une coupe pétrolière durant la T.B.P.

Son mode d'utilisation est simple. La distillation ASTM est beaucoup moins sélective que la distillation T.B.P. qui est quasi parfaite. Les distillations ASTM sont utilisées pour fournir les spécifications de distillation des produits pétroliers. De plus leur principale avantage est le temps court qu'elles nécessitent. Alors que la distillation T.B.P. (plus précise et plus représentative de la composition des produits) est relativement longue.

1-La température d'ébullition

L'ébullition est une vaporisation rapide d'un liquide, elle se produit au sein même du liquide et à une température bien déterminée, c'est la température d'ébullition sous une pression constante. La température d'ébullition d'un corps pur reste constante pendant toute la durée de l'ébullition, elle est donc caractéristique du corps pur.

La température d'ébullition peut être estimée par une expression mathématique élaborée par SUGDEN faisant intervenir des contributions de groupes.

$$T_{eb} = \frac{637(RD)1.47 + B}{(P)}$$

RD et (P) sont des contributions de groupe respectivement de la réfraction molaire et du Parachor. B est une constante qui est fonction de la famille chimique du composé. La température d'ébullition d'un corps pur peut être estimée à 5% par cette corrélation. [3],[4].

Certains auteurs proposent une méthode de calcul de la température d'ébullition de corps purs basée sur la connaissance des indices de rétention obtenus par chromatographie en phase gazeuse, après avoir effectué une centaine de mesures sur des hydrocarbures polyaromatiques.

$$T_b(K) = 1.0672 I + 282.82$$

T_b: température d'ébullition normale (K)
I : indice de rétention des hydrocarbures.

* Une équation empirique a été développée par STIEL et THODOS pour le calcul de la température d'ébullition normale des corps purs mais valable uniquement pour les hydrocarbures aliphatiques saturés.

$$T_{bN} = 1209 - \frac{1163}{1+0.0742(N0.85)}$$

N: nombre d'atomes de carbone dans le composé
 TbN: température d'ébullition (K)

Contrairement au corps pur, la température d'ébullition d'un mélange n'a pas de signification. On parlera plutôt de température moyenne d'ébullition. La T.B.P. et l'ASTM donnent généralement la température d'ébullition instantané en fonction du pourcentage en volume distillé.

En prenant la température du point 50% , si l'intervalle de distillation est faible, on obtient trois températures "moyennes" d'ébullition suivant les différents pourcentages volumique (tv), pondérale (tp) et molaire (tm). Ce qui revient à définir la température moyenne pondérée (tmav) qui est la valeur moyenne pondérée des trois valeurs définies précédemment. Elle est déterminée à partir d'abaques.

Notons que la température d'ébullition (Teb) est une propriété additive. Pour un mélange de corps purs:

$$Teb = \frac{\sum TebiXi}{\sum Xi} \quad (8)$$

Xi: fraction molaire

2- La densité.

La densité est définie comme le rapport de la masse d'un corps au volume qu'il occupe (unité: Kg/cm³). La densité relative est le rapport de la densité du corps considéré (à une température donnée) à celle du corps de référence (c'est d'habitude l'eau à ≈ 4°C).

Excepté pour les calculs nécessitant une très grande précision, on pourra toujours confondre la specific gravity SpGr 60/60°F et la densité à 15°C.

$$d_{15} = 0,99904 \text{ SpGr } 60/60^\circ\text{F}$$

La densité est une propriété additive, il est donc possible d'avoir sa valeur pour n'importe quel mélange de corps purs ou fractions pétrolières en sommant la densité de chaque petite fraction.

$$d = \frac{\sum Xi di}{\sum Xi}$$

Xi: fraction molaire
 di: densité de la fraction

Cette relation nous permet de déterminer la densité à partir de la chromatographie en phase gazeuse.

Dans l'industrie pétrolière il est utilisé également pour mesurer la densité, le degré A.P.I. défini par l'American petroleum Institut, comme une fonction hyperbolique de la specific gravity :

$$^\circ\text{API} = \frac{141,5}{\text{SpGr } 60/60^\circ\text{F}} - 131,5.$$

La mesure de la densité au moyen d'un hydromètre implique la lecture simultanée de la température de l'échantillon. La valeur trouvée est ensuite corrigée par des tables, des formules ou des abaques, pour obtenir la valeur de la densité d20 ou celle de la SpGr 60/60°F. La douane admet la formule de 4 correction suivante:

$$d_{20} = d_t \pm \frac{K(t-20)}{4}$$

Où K est un coefficient dépendant de la densité du produit, selon le tableau (1) suivant:[3]

$\frac{d_{20}}{4}$.60-.70	.70-.76	.76-.80	.80-.85	.85-.88	.88-.90
K	.0009	.00085	.0008	.00075	.00065	.00062

Tableau ()

3- Le facteur de caractérisation KUOP

NELSON, WATSON et MURPHY [9] de la société U.O.P (universal oil products) ont proposé la formule suivante qui définit le facteur de caractérisation KUOP :

$$KUOP = \frac{\sqrt[3]{T_{eb} (^{\circ}R)}}{SpGr\ 60/60}$$

où T est la température d'ébullition exprimée en degrés Rankin. La nature chimique d'un hydrocarbure peut se repérer par la valeur correspondante de son KUOP :

- K = 13 : paraffiniques normaux et isoparaffiniques.
- K = 12 : hydrocarbures mixtes où le cycle et la chaîne sont équivalents.
- K = 11 : naphéniques purs ou aromatiques légèrement substitués.
- K = 10 : aromatiques purs.

4-La masse moléculaire

La connaissance de la masse molaire est importante pour le calcul du bilan massique.

La détermination de la masse moléculaire ne pose pas de problème pour un corps pur ou pour un mélange de corps purs.

Il est en effet possible d'écrire :

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

avec X_i : fraction molaire du constituant i .

Evidemment il est facile de déterminer la masse moléculaire si on connaît la formule brute de la substance.

Pour une fraction pétrolière nous avons recours à des corrélations faisant intervenir des grandeurs physiques différentes.

* A partir du diagramme de KUOP (connaissant la densité et la T_{mav}).

* A partir de la formule utilisant n et T_{mav} . (méthode de HERSCH)[1]

$$\text{Log } M = 0.001978 \text{ } T_{eb} (^{\circ}\text{C}) + 1.9394 + \text{Log}(2.15 - \frac{n_{20}}{D})$$

* A partir de la formule de M.ROBERT.

$$M = 1705.45 \frac{n_{20}}{D} + 792.93 \frac{d_{20}}{D} + 4.553 \text{ PA} - 3287$$

* A partir de la formule de HUANG : []

$$M = 7.7776 \cdot 10^{-6} \text{ } T_{eb}^{2.1197} (^{\circ}\text{R}) \cdot I^{-2.089} \frac{d_{20}}{4}$$

M: masse moléculaire

T_{eb} : température d'ébullition ($^{\circ}\text{R}$)

d : densité à 20°C et 1 atm

I : facteur de caractérisation

* pour $M \leq 200$

$$I = 3.583 \text{ E-}03 \text{ } T_{b}^{1.0147} (M/d) - 0.4787$$

n : Indice de réfraction à 20°C

T_b : température d'ébullition à 50% .

* pour $M \geq 200$

$$I = 1.4 \text{ E-}03 \text{ } T_{b}^{1.09} (M/d) - 0.3984$$

5- Indice de réfraction:

L'indice de réfraction est donné par la formule suivante en tenant compte de l'effet de la température:

$$n_{20} = n_t - a(20 - t)$$

t: température de la détermination

a: 0.0004

La différence entre les valeurs de l'indice de réfraction et de la demi-densité du corps donne un nouveau paramètre Ri appelé " Réfractivité intercept " [3].

$$R_i = n_{20} - \frac{d_{20}}{2}$$

Les propriétés optiques (n et Ri) sont des propriétés additives

6- Indice de corrélation

Ce paramètre est défini comme suit:

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

où n est l'indice de réfraction.

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

$$R = I/d$$

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

7- La réfraction molaire RM

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

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

8- Tension de vapeur

La tension de vapeur mesure la tendance des molécules à s'échapper d'une phase liquide pour un équilibre thermodynamique. Il existe de nombreux diagrammes représentant les courbes de tension de vapeur des hydrocarbures purs comportant huit (08) à dix (10) atomes de carbone dans la molécule. Quand aux hydrocarbures lourds, ils n'interviennent que dans des mélanges très complexes et la connaissance de leur courbe de tension de vapeur ne présente pas d'intérêt.

9- Indice d'octane

C'est une caractéristique essentielle des essences. Elle détermine les qualités de combustion du carburant, qui a un indice d'octane égal à x, si dans le moteur CFR, il provoque un cliquetis équivalent à celui observé pour un mélange de x parties en volumes d'isooctane et (100-x) d'heptane. La détonation est fonction de la composition du carburant.

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

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

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

10- Plomb tétraéthyle

Nous utilisons pour sa détermination la Norme M.07.014. Le plomb est un additif qui est ajouté en faibles doses à l'essence dans le but d'augmenter son indice d'octane.

C'est un liquide qui a une densité égale à 1.66, il est insoluble dans l'eau et a une température d'ébullition de 200°C. Le plomb tétraéthyle est un liquide toxique, c'est pour cela que la teneur en plomb est limitée et est imposée par les spécifications officielles.

11- Indice de cétane

L'indice de cétane montre l'aptitude d'un combustible à s'enflammer.

Un gas-oil a un indice de cétane égal à x, si dans le moteur standard, il a un délai d'allumage équivalent à celui d'un mélange de x parties en volume de cétane et (100-x) parties d'alphaméthylnaphtène.

La précision de la mesure du délai d'allumage est comparé à un mélange de deux carburants étalons. Le normal cétane qui est un hydrocarbure en 16 atomes de carbone en chaînes droite, donnant une excellente combustion dans le moteur, est affecté d'une valeur d'indice de cétane égale à 100.

L'alphaméthylnaphtalène, hydrocarbure aromatique bicyclique, ayant un délai d'allumage très élevé, est affecté d'une valeur d'indice de cétane égale à 0.

On a recherché une relation simple entre l'indice de cétane, et la nature chimique du gas-oil, pour cela il suffit de caractériser le combustible par deux propriétés facilement mesurables, sa densité exprimée en °API et son point d'aniline. On définit l'indice diesel par la relation suivante:

$$\text{Indice diesel} = \frac{\text{PA}(^{\circ}\text{C}). \text{degré API}}{100}$$

12- Point d'aniline

Nous pouvons nous servir de la norme M.07.021 pour le déterminer. Le point d'aniline est la température la plus basse à laquelle des volumes égaux d'aniline et du produit à examiner sont complètement miscibles.

Le point d'aniline est en relation avec l'aromaticité du produit et entre dans les formules de caractérisations de différentes propriétés.

La mesure du point d'aniline avant et après l'élimination des aromatiques peut servir à l'étude de la composition d'une fraction pétrolière.

Le point d'aniline d'une fraction pétrolière peut être estimé par la corrélation établie par R.P.WALSH et J.V.MORTIMER:

$$PA = -204.9 - 1.498(NC50) + 100.5[(NC50)1/3/d]$$

PA: Point d'aniline en °C pour la fraction pétrolière.

NC50: nombre d'atomes de carbone de la normale paraffine à 50%.

13- Point de trouble et d'écoulement

Il peut être déterminé par la norme NF T.60.105

Lorsqu'on refroidit lentement une huile, elle peut soit se figer en une masse pâteuse, soit devenir seulement de plus en plus visqueuse, suivant la nature.

La détermination du point trouble et le point d'écoulement correspond à la température pour laquelle le tube étant placé horizontalement, la surface de l'huile reste immobile.

Le but de l'essai est de caractériser la teneur en paraffines des huiles, soit la teneur en hydrocarbures à haut point de congélation des autres produits. Le point de trouble et le point d'écoulement permettent d'apprécier les limites de température à respecter dans la mise en oeuvre des produits, en particulier, pour leur pompage en hiver.

14- Points d'éclair et de feu

Lorsqu'une huile est chauffée, elle émet des vapeurs inflammables. Le point d'éclair (flash point) est la température à laquelle ces vapeurs s'enflamment à l'approche d'une flamme, mais s'éteignent aussitôt. Le point de feu (fire point) est la température à laquelle ces vapeurs continuent 20° ou 30° au dessus du point d'éclair.

Les points d'éclair et de feu dépendent de la teneur de l'huile en fraction légère, mais aussi de la nature chimique de l'huile. En effet, quand on chauffe une huile, il y a d'une part volatilisation des fractions légères et d'autre part un début de décomposition, de cracking avec formation de produits légers.

15- Point de congélation

Le point de congélation est la température à laquelle la fraction soumise au refroidissement dans une éprouvette demeure immobile, lorsque l'éprouvette est inclinée de 45°. La température correspondante à l'apparition de "nuages" de petits cristaux (de paraffines) dans un produit pétrolier est dite "point de trouble".

Généralement les points de congélation des paraffines sont plus faibles que ceux des naphthènes qui ont des valeurs intermédiaires, et celles des aromatiques sont les plus élevées. Il n'y a pas de règle générale pour prévoir ces point de congélation (ou d'écoulement) à partir des paramètres classiques, tels que densité, Kuop, point d'aniline car la composition des distillats est très complexe.

pour les huiles, la valeur du point d'écoulement peut être estimée en fonction du facteur de caractérisation et de la teneur en paraffines.

En mélange, et en général le point d'écoulement est toujours nettement supérieur à celui que l'on pourrait calculer par une moyenne volumétrique.

De plus le point de congélation est une propriété additive.

16- Viscosité

La viscosité peut être obtenue par la norme NFT 60-100 Deux couches contigues de fluide en mouvement parallèle exercent l'une sur l'autre, par frottement intérieur, une force tangentielle. La viscosité est la force nécessaire par unité de surface, pour maintenir entre deux plans parallèles séparés par unité de distance, un gradient de vitesse égal à un.

$$\tilde{\eta} = \frac{dF}{dS} \frac{dz}{dv}$$

$\tilde{\eta}$ a pour équation aux dimension $[\tilde{\eta}] = M/LT$

Dans le système CGS, L'unité est le poise (Po)

Le poise est la force d'une dyne qui appliquée à un élément de surface de 1 centimètre carré déplace cet élément de 1 centimètre par seconde.

L'eau a une viscosité de 1 centipoise à 20 °C.

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

Viscosité relative:

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

- Viscosité cinématique :

C'est le rapport de la viscosité absolue en centipoises à la densité mesurée à la même température .

$$\mu = \frac{\tilde{\eta}}{d} \quad \mu = \tilde{\eta} / \sigma$$

$\tilde{\eta}$

σ : masse volumique du fluide

l'équation aux dimensions : $[\mu] = L^2/T$

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

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

De nombreuses méthodes pour le calcul de la viscosité des liquides pour les substances pures et pour les mélanges à différentes températures et pressions ont été suggérées.

- Viscosité d'un mélange d'hydrocarbures purs

L'équation suivante proposée par KENDALL et MONROE est valable pour des mélanges de composés purs, l'erreur commise atteint 8% «18».

$$\mu_m = \left(\sum_{i=1}^n x_i \mu_i^{1/3} \right)^3$$

μ_m : viscosité du mélange en cpoise
 μ_i : viscosité du composé i en cpoise
 n : le nombre de composants dans le mélange
 x_i : fraction molaire du composé i

Cette équation n'est pas recommandée pour les fractions pétrolières l'équation d'ARRHENIUS « »

$$\log \mu = \sum X_i \log \mu_i$$

l'incertitude relative moyenne obtenue pour des mélanges complexes définis est inférieur à 20%.

pour un mélange de corps purs, une relation du type :

$$f(\mu_m) = \sum_i x_i f(\mu_i)$$

a été développée où $f(\mu_i)$ peut être $\ln(\mu_i)$, $1/\mu_i$ et x_i peut être fraction molaire, fraction volumique .

LOBE propose l'expression suivante.

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \phi_i \mu_i \exp\left(\sum_{j=1}^n (\alpha_j \phi_j) / RT\right)$$

μ_m : viscosité cinématique (Cstockes), $\mu_m = \text{nm}^2/\text{s}$
 ϕ_j : fraction volumique du composé j
 α_j : paramètre caractéristique de la viscosité du composé j dans le mélange (cal/g.mole.K)
 R : constante des gaz parfaits = 1.987 cal/g.mol.K
 T : température (K).

Pour un mélange binaire et en posant

$$\begin{aligned} \alpha_{iw} &= \alpha_i / RT \\ \alpha_{Aw} &= -1.7 \ln(\mu_B/\mu_A) \\ \alpha_{Bw} &= +0.27 \ln(\mu_B/\mu_A) + (1.3 \ln(\mu_B/\mu_A))^{1/2} \\ \mu_m &= \phi_A \mu_A \exp \alpha_{Bw} \phi_B + \phi_B \mu_B \exp \alpha_{Aw} \phi_A \end{aligned}$$

Cette expression est applicable au mélange de deux (02) corps purs à basses températures. l'erreur peut atteindre 6%.

- Viscosité des fractions pétrolières

La viscosité des fractions pétrolières liquides est en relation étroite avec le poids moléculaire et la structure chimique. WATSON et HOUGEN ont proposé une corrélation en fonction de la température moyenne d'ébullition pondérée, et la densité.

La viscosité n'étant pas une propriété additive nous appliquons la relation suivante, pour une fraction pétrolière.

17- Teneur en soufre

Il existe plusieurs normes qui permettent de mesurer la teneur en soufre, nous citerons les Normes NF M.07.005, NF T 60.109, et la norme NF T 60 108.

Ces trois normes permettent de doser le soufre total de l'échantillon. Par contre la Norme NF M 07.015 est un essai qui contrôle le caractère corrosif des essences et du kérosène dû à la présence des mercaptans.

Quelque soit la nature des composés sulfurés, ils provoquent une corrosion au niveau des réservoirs et constituent des poisons pour les catalyseurs utilisés au cours du raffinage.

Dans les produits pétroliers, nous ne recherchons pas qualitativement le soufre total, mais les dérivés sulfurés corrosifs, nous pourrions citer les mercaptans RSH, l'hydrogène sulfures H₂S ou les sulfures RSR.

DETERMINATION DE LA COMPOSITION DU PETROLE BRUT ET DES FRACTIONS PETROLIERES

Introduction

Pour pouvoir prédire les propriétés physiques et thermodynamiques des fractions pétrolières, il est nécessaire de déterminer la proportion des hydrocarbures paraffiniques, naphténiques et aromatiques présents dans la fraction.

Le pétrole brut et les fractions pétrolières qui en sont issues sont essentiellement composés de molécules résultant de la combinaison d'atomes de carbone tétravalents et d'atomes d'hydrogènes, appelées " hydrocarbures " [3]. Toutefois, dans le pétrole brut n'existent que certains types de structures moléculaires, d'autres, telles quelles formes définies instables, si elles ont pu se former à l'origine du pétrole, se sont lentement et totalement transformées en molécules stables au cours des ages géologiques dans les gisements [5].

Hydrocarbures présents dans le pétrole [4].

- N-paraffines: ou molécules à chaînes droite unique.
- Isoparaffines et paraffines ramifiées: les isoparaffines sont les molécules qui ont un groupe méthyle (CH₃) sur le deuxième atome de carbone. Les chaînes ramifiées ont un ou plusieurs groupes alkyles (souvent un méthyl).

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

- Cycloparaffines: sont les hydrocarbures cycliques saturés dont plusieurs portent des groupements méthyles.
- Aromatiques: sont les composés contenant au moins un noyau benzénique dans la molécule .
- Hydrocarbures mixtes:

Des cycles peuvent se substituer sur les chaînes paraffiniques ou inversement. Les propriétés de la molécule mixte seront fonction de l'importance relative des noyaux et des chaînes dans la structure. Ainsi, par exemple, le toluène est considéré comme un hydrocarbure aromatique car la chaîne méthyle substituée est courte; par contre si l'on substitue un noyau benzénique sur une chaîne droite à 26 atomes de carbone (phenylhexacosane), la molécule résultante aura un caractère paraffinique.

Méthodes de détermination de la composition des fractions pétrolières

1- Par analyses [5]

- La chromatographie en phase gazeuse (CPG)
- La chromatographie en phase liquide
- L'association chromatographie en phase gazeuse avec la spectrométrie de masse

2- Par corrélations

Comme il n'est pas possible de connaître individuellement les constituants d'une fraction pétrolière, on se contente de connaître la composition globale en chacune des familles d'hydrocarbures.

Dans le but de répondre à ce besoin, plusieurs méthodes ont été développées, nous citons: [3][4].

- Méthode n.d.M.

Cette méthode permet de déterminer la distribution du carbone et les taux des cycles dans les fractions pétrolière. Elle donne une précision de l'ordre de $\pm 1,5\%$ pour le pourcentage en carbone à condition que $M > 200g$ et que $X_A < 1,5X_N$ et que $X_A > 25\%$.

Elle nécessite la connaissance de trois paramètres: indice de réfraction (n), densité (d) et poids moléculaire (M)

- Méthode n.d.PA.

La connaissance de trois paramètres: n_{20} , d_{20} et PA suffisent à déterminer les % de chaque famille en appliquant les équations suivantes:

$$\begin{aligned} \%X_A &= 1039,4 n - 470,40 d - 0,3150 PA - 1094,3 \\ \%X_N &= -1573,3 n + 840,15 d - 0,4619 PA + 1662,2 \\ \%X_P &= 100 - (\%X_A + \%X_N) \end{aligned}$$

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

LES PRODUITS PETROLIERS ET LEURS SPECIFICATIONS.

INTRODUCTION

Le marché est demandeur de produits pétroliers aux caractéristiques précises: gaz liquéfié, essences, kérosène, gas-oils, fuel-oils, graisses, etc. Initialement, les coupes pétrolières issues de la distillation du pétrole brut n'ont pas dès le départ toutes les propriétés requises, l'essentiel est que les propriétés les plus importantes soient respectées. Pour celles qui ne le sont pas, on arrive, par des traitements ultérieurs à les rectifier.

1- Gaz liquéfiés

Sous cette appellation, on trouve le propane commercial, le butane commercial et un mélange des deux vendus sous le "bupro". Le propane commercial est constitué principalement de propane et de propène alors que le butane commercial est composé essentiellement de butane et du butylène.

Les spécifications des gaz liquéfiés ont pour but de limiter leur teneur en fractions trop légères et trop lourds. En effet, pour des raisons de sécurité, ces gaz possèdent une tension de vapeur limitée à 50°C, température correspondante au maximum que peut atteindre une bouteille de gaz exposée au soleil. De même que la teneur en éléments lourds ne doit pas excéder une certaine valeur fixée par les spécifications afin de ne pas laisser dans la bouteille une quantité appréciable et inutilisable de résidu.

La limitation en composés sulfures corrosifs et malodorants tend quant à elle à prévenir l'attaque des récipients métalliques contenant les gaz liquéfiés.

La teneur en eau est également limitée, en particulier pour le propane, en effet si le gaz contient des gouttelettes d'eau en suspensions, celles-ci se transforment en glace lors de l'évaporation du propane qui a tendance à se refroidir en se dilatant.

Les spécifications du propane et du butane sont résumées dans le tableau suivant:

	propane commercial	butane commercial
Définition	mélange d'hydrocarbure composé de 90% de propane propène et d'éthane	mélange d'hydrocarbu. composé de butanes et de butènes
Odeur	Caractéristique	Caractéristique
Densité	≥ 0.502 kg/l à 15°C	≥ 0.559 kg /l à 15°C
Tvr à 50°C	11.5-19.3 bars	≤ 6.9 bars
%S	0.005 %	

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

2-LES ESSENCES

Le distillat de pétrole raffiné dont l'intervalle de distillation se situe entre 40-220°C est appelé essence et a sensiblement les caractéristiques distillatoires du carburant pour automobile.

Ce dernier est de deux types: carburant ordinaire et super carburant, qui se distingue par des indices d'octane différents, plus élevé pour le second.

Les carburants sont soumis à des spécifications réglementaires caractéristique de leurs aptitude à la carburation, fixant notamment la tension de vapeur, la courbe de distillation, le nombre d'octane et la teneur en soufre et en gommés.

La tension de vapeur de l'essence possède une limite supérieure, plus élevée en hiver qu'en été, qui permet d'éviter une vaporisation anticipée sous l'effet de la chaleur rayonnée par le moteur. Les spécification de distillation fixe les limites supérieures de température poudres points caractéristiques des pourcentages distillés de la courbe de distillation A.S.T.M de l'essence.

Ainsi le point 10% placé avant 70°C caractérise la teneur minimale en fraction légère qui assure le démarrage du moteur en période de froid.

De même que le point 50% avant 140°C commande dans une large mesure le fonctionnement normal du moteur et en particulier les accélération qui dépendent d'une vaporisation correcte de l'ensemble du carburant.

En fin, le point final de la courbe de distillation peuvent alors se bloquer [].

	Essence normal	Super carburant
Définition	Mélange d'hydrocarbure d'origine minérale ou de synthèse	
Couleur	Rouge	jaune pale
Densité	≤ 0.765	≤ 0.770
Distillation		
T10%		70°C
T50%		140°C
T95%		195°C
Point finale		≤ 205°C
Ecart T5%-T90%		> 60°C
Tvr à 37.8°C		
du 15/10 au 30/4		≤ 0.8 bar
du 1/5 au 14/10		≤ 0.65 bar
%S	< 0.2	< 0.15
Indice d'octane	89-92	97-99
Teneur en plomb		≤ 0.40 gr/l

6- LE PETROLE LAMPANT

- distillation		
. T90% \geq	210°C	
. T65% \geq		250°C
. T80% \geq	285°C	
- Teneur en soufre: \leq	0.13%	
- Point d'éclair: \leq	38°C	
- Point de fumée: \leq	21 mm	

7- LES CARBUREACTEURS

Il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures intermédiaire, par ses propriétés physiques, entre l'essence et le gas-oil. Destinés à alimenter les moteurs à réaction ou turbine à gaz d'aviation, les carburateurs sont de deux types: le TRO, utilisé dans l'aviation civile et le TR4 dit "large coupe", utilisé dans l'aviation militaire et contenant plus de léger que le premier.

Leur utilisation est à haute altitude impose des spécifications sévères assurant un maximum de garantie. Ils doivent en effet posséder un point de congélation très bas, être exempts d'eau en suspension, leur teneur en aromatiques faible afin de limiter les dépôts de carbone et enfin leur tension de vapeur doit être comprise entre deux limites: une limite supérieure qui permet d'éviter la formation de bouchons de vapeur et le désamorçage des pompes en particulier à haute altitude, la pression est faible, et une limite inférieure correspondant à la présence d'une quantité suffisante de légers pour l'allumage du réacteur au sol ou son réallumage en altitude.[3][4]

Les principales caractéristiques des deux carburateurs actuellement utilisés sont les suivantes:

- Carburateur large coupe, anciennement appelé TR4
- Kérosène, encore appelé TRO, JP1, Jet A1.

	Large coupe	Kérosène
Densité	0,751 à 0,802	0,775 à 0,830
distillation		
- T20	143°C	
- T50	188°C	
- T90	243°C	
point T10%		204°C max.
point final		288°C max.
T.V.R (mbar)	140 à 210	
Inflammabilité		38°Cmin
Point de cong.	-58°C max	-50°Cmax
Viscosité -34,4°C		15 cSt max
Soufre (% masse)	0,4max	0,2 max
Point de fumé		\leq 25 mm

8- LE GAS-OIL

Le gas-oil est un produit jaune clair, légèrement visqueux et distillant habituellement entre 190°C et 300°C. Utilisé par excellence comme combustible dans les moteurs Diesel rapides. Sa densité ne doit pas trop s'écarter d'une valeur moyenne fixée à 0,850. Cette caractéristique qui n'est pas un élément déterminant, conditionne le pouvoir calorifique au litre. Avec une densité trop éloignée de la valeur moyenne, on risque un mauvais fonctionnement du moteur, soit par manque de calories, soit par suite d'une combustion incomplète.

Son point final d'ébullition ne doit pas être trop élevé afin de limiter sa teneur en produits lourds susceptibles de se décomposer lors de la combustion pour laisser un dépôt charbonneux.

La viscosité qui conditionne l'écoulement et la finesse de la pulvérisation, ne doit en aucun cas excéder la valeur limite fixée. Le point d'écoulement, qui dérive directement de la valeurs du point final et de la teneur en paraffines cristallisables, est fixé bas, en particulier dans les pays nordiques.

La limitation de la teneur en soufre et en cendres a pour but de prévenir les risques de corrosion des chemises et éviter les dépôts solides.

Enfin, la qualité d'un gas-oil est son indice de cétane.

Les spécifications imposent un indice de cétane supérieur à 50

Les caractéristiques administratives du gazole sont les suivantes:

-
- Densité à 15°C comprise entre 0,810 et 0,890 kg/l
 - Distillation
 - . T65% ≤ 250°C
 - . T85% ≥ 350°C
 - Point d'éclair: compris entre 55°C et 120°C
 - % en soufre: 0,3%
 - Viscosité: 9,5 cSt à 20°C maximum
 - Point d'écoulement: -12°C max. du 1/10 au 31/3, -7°C max. du 1/4 au 30/9
 - Indice de cétane: 50 minimum.
-

9- Les fuel-oils:

Le fuel domestique est un produit analogue au gas-oil moteur, dont il se différencie que par l'indice de cétane (égal ou supérieur à 40).

Comme il ne supporte pas de taxe routière, il est coloré en rouge pour éviter la fraude fiscale.

Il est utilisé dans les installations de chauffage domestique ou installation industrielles de faible puissance [1].

Les spécifications des fuels précisent toujours la teneur en eau et sédiments qui sont susceptibles de boucher les filtres protégeant les orifices des brûleurs ou des buses d'injections. Les autres spécifications concernent le point d'éclair qui doit être supérieur à une limite fixée en vu d'assurer une sécurité au cours des manutentions, et la limitation de la teneur en soufre pour chaque type de fuel-oil [3].[4]

MISE EN OEUVRE DU PETROLE BRUT

La mise en oeuvre de pétrole brut consiste à évaluer, à partir des données de pétrole brut "Crude Work-up", les rendements possibles par distillation en produits commerciaux répondants à des spécifications ou en produits non finis, destinés à subir des transformations ultérieures et répondants à certaines normes, comme des charges pour le reforming catalytique, cracking catalytique, préparations des huiles lubrifiantes, ou des produits de base pour la pétrochimie etc.

Représentation graphique de l'analyse :

L'exploitation des résultats issus de l'analyse du pétrole brut et de ses fractions sous forme de graphiques, assure la continuité des propriétés et permet une utilisation plus rationnelle.

On distingue trois types principaux de représentations :

1- courbe de propriétés instantanées :

Elle consiste à porter les propriétés des fractions élémentaires dans leur pourcentage volumique distillé. Les courbes des propriétés additives telles que densité, point d'aniline et pourcentage en soufre, permettent d'estimer les propriétés correspondantes à des fractions beaucoup plus larges en utilisant la méthode de balancement des aires [3][4]. figure(1).

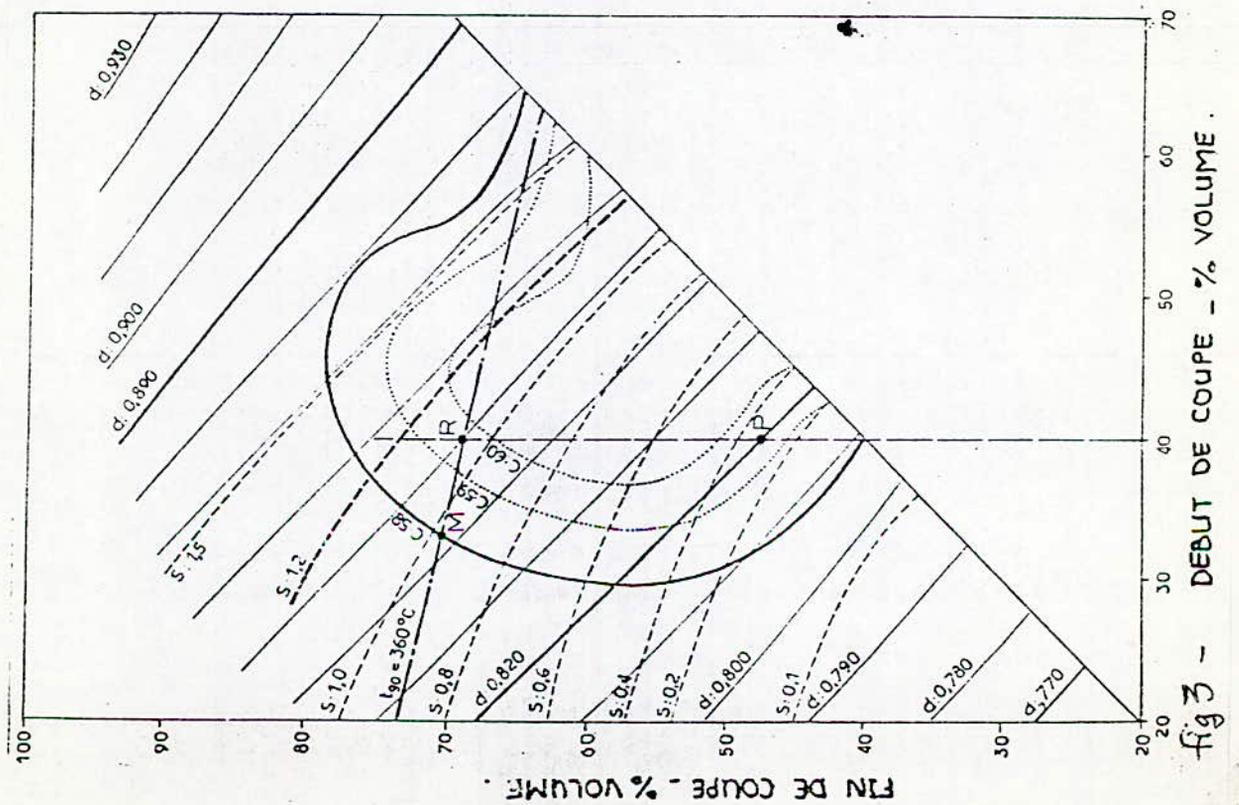
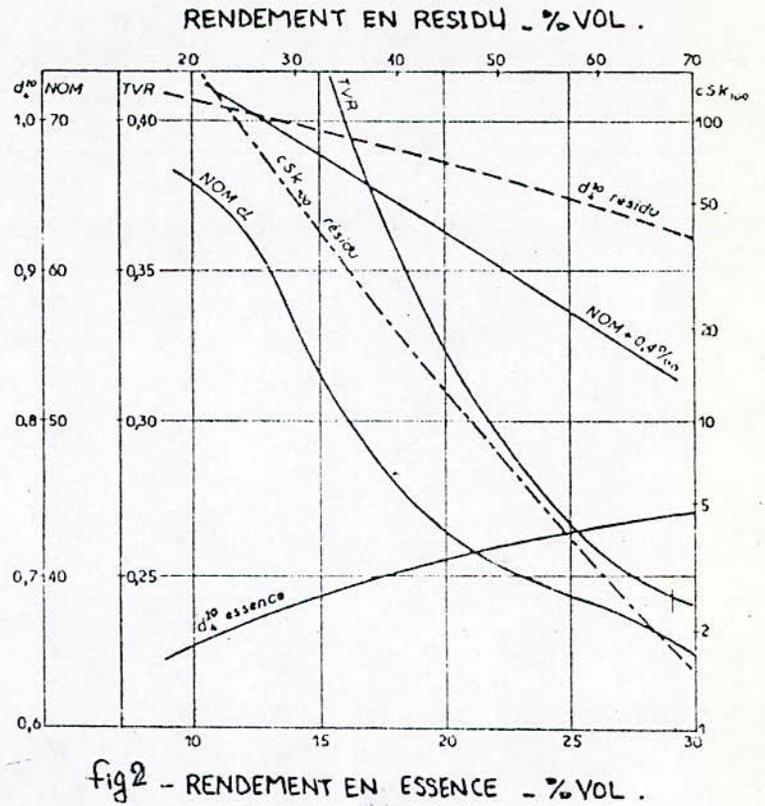
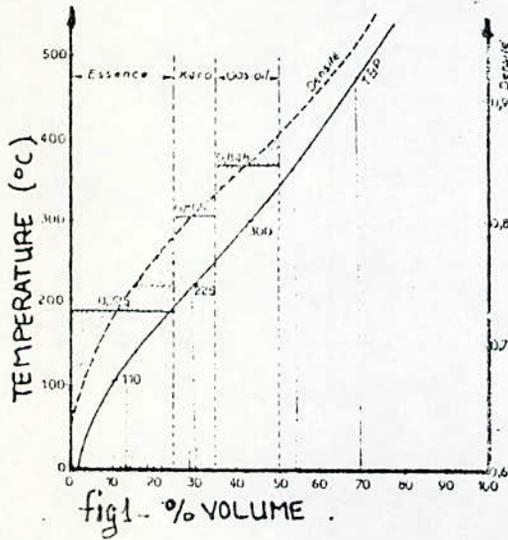
2-Courbe des propriétés rendements (yields%curves) :

Cette représentation est essentiellement utilisée pour les produits extrêmes : essence et résidu. Elle s'avère particulièrement intéressante dans le cas des propriétés non additives pour lesquelles on ne peut déduire les propriétés des coupes larges à partir des courbes de propriétés instantanées. Pour la tracer, on détermine expérimentalement les propriétés de différents mélanges de petites fractions successives, ayant même point initial (pour les essences) ou un même point final (pour les résidus). En portant ces propriétés en fonction du rendement volumique de chaque mélange, on obtient ce qu'on appelle une courbe de propriétés rendements [3], [4]. figure(2).

2-Courbes iso propriétés(iso curves) :

Utilisée pour les fractions intermédiaires telles que kérosène et gas-oil, cette courbe consiste à relier des fractions possédant une même propriété sur une représentation carrée. On l'obtient en repérant le début de coupe ou point final en ordonnée. Ainsi, toute fraction intermédiaire sera représentée par un point situé au dessus de la première bissectrice du carré. On peut ainsi tracer un réseau de courbes isopropriétés qui permettra de choisir des coupes, intermédiaires répondant à une spécification donnée.

[3]. figure (3).



ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

LES DIFFERENTES OPERATIONS DE TRANSFORMATION

INTRODUCTION

Le monde des dérivées du pétrole actuellement en usage, les qualités très particulières demandées à chacun d'eux et enfin la variété dans la nature des pétroles bruts disponibles nous font prévoir que les opérations de raffinage seront très diverses.

Il serait possible cependant de grouper toutes ces opérations en deux séries:

La première comprenant toutes celles qui font appel aux techniques de séparation, la seconde toutes celles de conversion par transformations moléculaires.

Mais, nous allons citer les plus importantes, pour bien clarifier notre étude en suivant la chronologie observée dans les raffineries et en les groupant en trois sections

I- TRANSFORMATION PHYSIQUE

I-1 DISTILLATION ATMOSPHERIQUE:

L'opération initiale de raffinage est la distillation du pétrole brut dans une installation de fractionnement appelée " topping ". Cette unité de raffinage a pour but de fractionner le brut en plusieurs " coupes ", matières premières qui seront traitées ultérieurement pour fournir les produits commerciaux.

Les coupes ainsi obtenues sont généralement les suivantes:

Essence sauvage: matière première pour le butane et le propane
Gazoline stabilisée ou essence directe: matière première a carburant automobile;

Benzine: matière première pour le platforming;

Naphta: matière première pour (supercarburant) et pour certaines essences spéciales;

Pétrole: matière première pour le pétrole lampant et les carbureateurs;

Gazoles: carburant Diesel, fuel domestique, matière première pour le craquage catalytique;

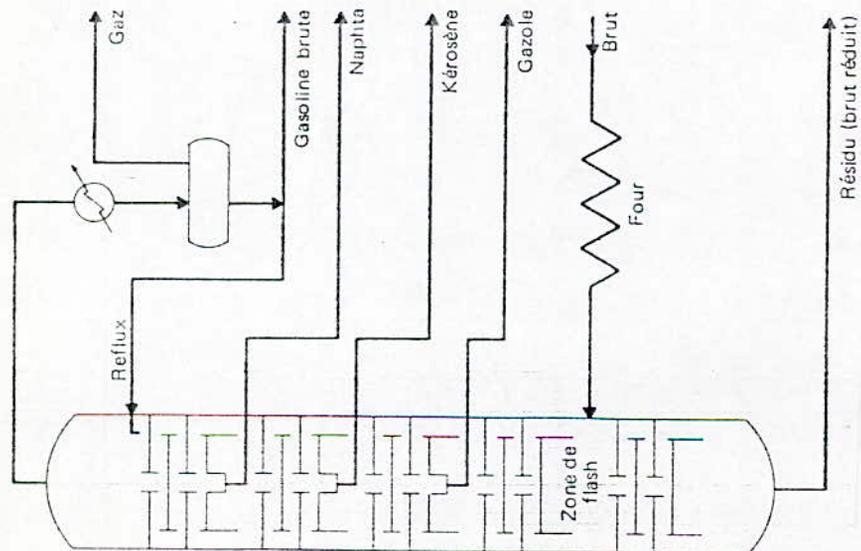
Résidu atmosphérique: matière première pour la distillation sous vide (fabrication des huiles de graissage) et la fabrication des fuels.

I- 2. DISTILLATION SOUS-VIDE

Elle consiste à traiter une charge lourde (gasoil ou résidu atmosphérique); elle est utilisée surtout pour les produits pour lesquels il faut éviter la décomposition thermique, afin d'en tirer des produits plus légers:

- fabrication des huiles de distillation lubrifiantes;
- redistillation des huiles après traitement;
- redistillation de certaines essences spéciales;
- préparation des charges des unités de craquage

	Kuwait	Arabe léger	Arabe lourd	Iran léger	Hassi-Messaoud	Nigeria
Brut						
Densité (° API) (1)	31,3	33,4	28,0	33,6	44,1	36,9
Densité	0,869	0,858	0,887	0,857	0,806	0,840
% soufre	2,5	1,76	2,85	1,36	0,14	0,12
Gasoline C5 - 149° C						
% poids sur brut	13,6	14,2	11,6	15,7	24,3	19,2
Densité	0,703	0,705	0,700	0,718	0,713	0,734
Octane Rech. Clair	50	48,5	47	53,5	55	69
Pétrole 149 - 232° C						
% poids sur brut	12,2	14,3	10,7	13,7	20,7	15,9
Densité	0,785	0,785	0,785	0,793	0,792	0,807
Smoke point (mm)	28	26	27	25	24	23
% soufre	0,15	0,08	0,18	0,14	0,01	0,02
Gazole 232-343° C						
% poids sur brut	17,0	19,9	15,9	19,9	22,3	27,1
Densité	0,843	0,843	0,844	0,849	0,845	0,857
Diesel index	58	57	56	56	57	52
% soufre	1,27	1,14	1,51	0,87	0,12	0,12
Résidu > 343° C						
% poids sur brut	55,5	50,0	59,8	49,0	29,1	36,4
Densité	0,967	0,952	0,984	0,950	0,916	0,924
Viscosité cSt à 50° C	480	176	1 880	220	63	73
% soufre	4,00	3,12	4,12	2,40	0,36	0,25
Distillats paraffineux 371 - 525° C						
% poids sur brut	21,0	20,7	19,8	23,4	15,7	
Densité	0,917	0,913	0,909	0,916	0,900	
Indice de viscosité	62	68	54	54		
% soufre	2,86	2,46	2,85	1,73	0,33	
Résidu > 525° C						
% poids sur brut	30,3	24,6	35,9	20,6	8,9	
% soufre	5,06	3,85	5,01	3,35	0,44	



II- LES PROCÉDES DE TRANSFORMATIONS CHIMIQUES

II-1 INTRODUCTION

Les procédés de transformations chimiques où moléculaires sont variés et complexes nous allons citer les plus importants et les plus utilisés.

Le but de transformation consiste à modifier la structure moléculaire et par la même les caractéristiques physico-chimiques des hydrocarbures où des fractions pétrolières.

Ces opérations s'appellent reformage, craquage, polymérisation, et etc.

Elles peuvent avoir aussi pour simple l'objet de l'amélioration de l'indice d'octane des essences comme le font le reforming catalytique ou l'isomérisation.

Depuis quelques années enfin, ces conversions sont utilisées en vue de la préparation de produits chimiques de synthèse et cette nouvelle industrie, la pétrochimie, est devenue une branche très importante de l'industrie de pétrole.

2- REFORMING CATALYTIQUE

Le reforming catalytique permet la transformation avec des rendements relativement bons des essences lourdes de NO (indice d'octane) faible pour obtenir une essence à NO élevée.

L'adaptation de la catalyse au reforming n'a été mise au point, d'une manière pratique et rentable, que vers 1950 avec le platforming,

- REALISTIIONS INDUSTRIELLES

La plupart des raffineries de pétrole sont aujourd'hui équipées de reformeurs catalytiques et ces unités se ressemblent beaucoup, bien qu'elles portent des noms différents.

Le catalyseur le plus employé est le platine, mais on trouve quelques rares unités, aux U.S.A., qui emploient soit l'oxyde de molybdène, soit le molybdate de cobalt ou encore les oxydes de chrome et d'aluminium. Tous ces derniers catalyseurs ne sont pas aussi actifs que le platine, mais on sera peut être un jour obligé de s'en contenter, car la production mondiale de platine reste très faible et suit difficilement la multiplication des reformages catalytiques.

3- LE CRACKING CATALYTIQUE

Le cracking catalytique est un traitement qui consiste à accroître la proportion relative des composants légers où plus volatils, par modification de la structure chimique de ses constituants.

- TAUX DE CONVERSION

Le craquage ayant pour but de fabriquer de l'essence à partir de produits lourds, on sera amené à considérer comme caractéristique essentielle de l'opération ce qu'on appelle le taux de conversion, c'est-à-dire 100 moins le pourcentage en volume de l'huile de recyclage distillant après 221 C (430 F).

- LE FLUID COKING (COKEFACTION FLUIDE):

Le fluid coking est un cracking très sévère de résidu lourd conduisant à la production du coke, des gaz, des essences et de distillat qui peut être servir comme une charge pour le cracking catalytique.

Ce procédé plus récent présente l'avantage sur le précédent d'être a fonctionnement rigoureusement continu. Il a l'inconvénient cependant de produire un coke pulvérulent qu'il est difficile d'utiliser autrement que comme combustible.

LE VISBREAKING

C'est un craquage thermique qui sert à réduire la viscosité et d'améliorer le point d'écoulement des résidus afin d'obtenir un fuel commercial répondant aux spécifications voulues.

GENERALITE:

La recherche opérationnelle est une discipline scientifique qui fait appel à un ensemble de connaissances puisées dans des sciences exactes ou appliquées (Mathématique, science économique, etc...) et des procédés de calcul, utilisant ou non des machines électroniques (ordinateurs), pour:

- effectuer une analyse globale ou moyen d'un modèle;
- des problèmes rendus complexes par le nombre d'interaction de facteurs aléatoires ou fixés, indépendants ou liés, humains ou matériel, intervenant simultanément en ligne de compte;
- fournir à l'autorité responsable de la décision à prendre.

PROGRAMMATION LINEAIRE

APPLICATION DANS LE RAFFINAGE:

L'une des principales applications de la programmation linéaire est certainement la détermination du programme optimal de la production d'une raffinerie.

Les contraintes tiennent alors compte:

- les bruts disponibles et leurs rendements;
- les spécifications des produits à fabriquer;
- les capacités de stockage disponibles;
- les limitations de débouchés pour certains produits;
- les capacités et les possibilités de réglage des installations existantes;

AUTRES APPLICATIONS :

- La détermination de la composition optimale des mélanges (essences, gasoil, fuels...);
 - L'optimisation de l'utilisation des unités de raffinage;
 - L'optimisation de préchauffage possible dans une installation;
 - La détermination de l'équilibre vapeur-électricité d'une raffinerie;
 - La préparation des programmes d'une raffinerie (annuels, trimestriels, ...);
 - L'étude des plans à long terme, avec choix des investissements à réaliser (types d'unités à construire, moyens de chargement, d'exploitation, etc..);
 - La mise au point d'un programme d'ensemble pour plusieurs raffineries (avec transfert de produits et compensation);
- La difficulté éventuelle pour la mise en équation des problèmes qui réside en la non-linéarité de certaines relations définissant les caractéristiques d'un mélange, où le réglage d'une unité

I. METHODE DE SIMPLEXE:

I.1. Méthode de simplexe pour un problème de maximisation

Définition:

On dit un programme linéaire est écrit sous la forme canonique relativement à une base $B = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$;

Si:

- * Z est exprimée en fonction des variables hors base seules
- * les colonnes de la matrice des contraintes A correspondant

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DU PETROLE BRUT

aux colonnes de A qui sont dans la base forment (à une permutation près) la matrice unité.
 Considérons un programme linéaire:

$$1.11 \quad \begin{aligned} \text{Max } Z &= c \cdot x \\ A \cdot x &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

Tableau simplexe :
 Pour représenter le tableau du simplexe (p'); nous supposons que le (p') est écrit sous forme canonique relativement à une base réalisable B (a₁, a₂, a_m) d'où:

$$\begin{aligned} c_j &= 0 \quad j = i, m \\ a_{ij} &= 0 \quad \text{pour tout } i \quad j \quad i = 1, m ; \quad j = 1, m \\ a_{ij} &= 1 \quad \text{pour } i = j \quad i = 1, m ; \quad j = 1, m \end{aligned}$$

Le programme (p) ci-dessus peut s'écrire:

$$\begin{aligned} \text{Max } Z & \\ c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + \dots + c_n \cdot x_n - z &= 0 \\ a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + \dots + a_{1n} \cdot x_n &= b_1 \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + \dots + a_{2n} \cdot x_n &= b_2 \\ \dots & \\ a_{m1} \cdot x_1 + a_{m2} \cdot x_2 + \dots + a_{mn} \cdot x_n &= b_m \end{aligned}$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, n$$

Variables de base	Variables	Second membre
xb	x ₁ x ₂ ... x _m x _{m+1} ... x _k ... x _{n-z}	b
x ₁	1 0 ... 0 a _{1,m+1} ... a _{1k} ... a _{1n} 0	b ₁
x ₂	0 1 ... 0 a _{2,m+1} ... a _{2k} ... a _{2n} 0	b ₂
⋮		
x _l	0 0 a _{l,m+1} ... a _{lk} ... a _{ln} 0	b _l
⋮		
x _m	0 0 ... 1 a _{m,m+1} ... a _{mk} ... a _{mn} 0	b _m
z	0 0 ... 0 c _{m+1} ... c _k ... c _n 1	b ₀ = 0

Nous avons posé; b₀ = c · x - Z

Principe de la méthode du simplexe pour un problème de maximisation:

La méthode de simplexe consiste à:

Partir d'une solution de base réalisable et déterminer une suite de solution tels que la fonction objectif Z soit croissante.

De plus, la solution doit rester réalisable (toute les variables principales et d'écart sont positives).

Par conséquent, la procédure utilisée pour passer d'une solution à une autre est l'algorithme de Gaus Jordan.

NOTION DE DUALITE:

Lorsqu'on déterminé la solution optimale d'un programme linéaire, on déterminé également la solution optimale d'un autre programme linéaire, lie au premier, qu'on appelle son programme dual.

Le problème que nous avons résolu consistait à déterminer le maximum de :

$$Z = 8x + 6y$$

sous les conditions :

$$\begin{aligned} 5x + 3y &\leq 30 \\ 2x + 3y &\leq 24 \\ x + 3y &\leq 18 \end{aligned}$$

Le problème dual associe s'énonce:

Déterminer le minimum de: $f = 30w_1 + 24w_2 + 18w_3$

sous les conditions:

$$5w_1 + 2w_2 + w_3 \geq 8.$$

$$5w_1 + 3w_2 + 3w_3 \geq 6.$$

On voit que, pour ce problème dual:

- les coefficients de la fonction économique sont les termes constants du premier problème (qu'on appelle le problème primal);
- les termes constants sont les coefficients de la fonction économique du primal;
- les coefficients des contraintes sont les coefficients des variables du primal (les colonnes sont devenues des lignes).

Un théorème fondamentale, appelé théorème de la dualité, montre que les deux fonctions économiques ont la même valeur à l'optimum: le minimum du dual est égal au maximum de primal.

ARAMETRISATION

Jusqu'à présent, nous avons toujours supposé que les différents types de coefficients intervenant dans le problème (c'est à dire) étaient fixes.

Si, au lieu d'en être ainsi, les coefficients sont variables en fonction d'un paramètre, le problème est dit paramétrique.

Nous envisagerons seulement le cas où ces différents coefficients dépendent linéairement du paramètre.

On dit que l'on a affaire à une paramétrisation:

- du second membre, si
- de la fonction économique, si
- de la matrice, si

Nous appellerons paramétrisation générale le cas où les différents coefficients du problème, c'est à dire dépendent simultanément du paramètre.

Les études de paramétrisation des programmes linéaires ont essentiellement pour but de définir les variations de la fonction économique à l'optimum, en fonction du paramètre.

COUTS MARGINAUX

Par définition, on appelle cout marginal d'un bien l'augmentation minimale de dépenses par apport à la solution optimal qui résulterait de l'utilisation d'une unité supplémentaire de ce bien, lorsque le problème posé consiste à produire des au moindre cout.

Si le problème posé consiste à transformer des bien pour vendre une production avec le meilleur profit, l'augmentation maximale de revenu, par rapport à la solution optimale, qui résulterait de la possibilité de dispoer d'une unité supplémentaire de l'un des biens est la valeur marginale de ce bien.

Nous pouvons aussi définir les coûts marginaux sont comme étant les coefficients des variables d'écart hors base , dans l'expression de la fonction économique à l'optimum.

Les cout marginaux et les valeurs marginales sont donc associés aux variables d'écart, puisque ce sont ces variables qui déterminent les exedents (ou l'insuffisances) de bien.

L' étude des coût marginaux se ramène à une paramétrisation du second membre, parce que leur connaissance et celle de leur domaine de validité sont très importantes pour l'interprétation économique des problèmes industriels.

Pour distinguer les coûts marginaux, qui se rapportent en principe aux biens intervenant dans un problème de minimisation des dépenses, et les valeurs marginales qui caractérisent les biens mis en oeuvre dans un problème de maximisation du revenu. Toutefois, nous avons convenu que cette distinction ne serait pas systématique et que nous utiliserions d'une façon générale le seul qualificatif coût marginal.

Dans tout problème de maximisation de profit, le coût marginal d'une variable d'écart représente l'augmentation maximale de profil pouvant résulter de la disponibilité d'une quantité unitaire supplémentaire du bien correspondant.

Dans le cas d'un problème de minimisation des dépenses, le coût marginal d'une variable d'écart représente la diminution maximale de dépense résultant de la non consommation d'une quantité unitaire du bien correspondant.

SIGNIFICATION DES COUTS DE SUBSTITUTION

Les couts de substitution sont les coefficients de la fonction économique correspondant au variables principales qui ne figurent pas sur la base optimale.

Puisque cette variable ne figurait pas dans la base optimale, et avait donc une valeur nulle, c'est que l'activité correspondante n'était pas mise en oeuvre.

Il est possible de choisir cette valeur de façon telle que la nouvelle solution soit encore réalisable, sans être extrême, mais qu'alors la fonction économique a maximiser diminue.

Il précise en effet la réduction de profit résultant de la modification des niveaux des activités intervenant dans la solution optimale par suite de l'incorporation, a un niveau unitaire, de la nouvelle activité qui n'apparaissait pas précédemment, et qui s'est donc partiellement substituée aux activités initiales.

La diminution de la fonction économique a maximiser, proportionnelle au coût de substitution est la plus faible.

PARTIE EXPERIMENTALE

MODELISATION

GENERALITE

L'ingénieur, l'organisateur, le sociologue,.. ont souvent à prendre des décisions sur le sujet des phénomènes dont ils ne connaissent le comportement qu'à partir des données (mesures) expérimentales.

Dans certains cas en physique par exemple, la connaissance fondamentale des phénomènes en question nous permet de proposer un modèle mathématique précis, déterministe que l'on nomme modèle de connaissance.

Mais souvent, on ignore les mécanismes précis du phénomène, ou encore les mesures effectuées sur le phénomène pouvant être influencées par la vérification aléatoire des variables incontrôlables.

Nous pouvons alors proposer un modèle statistique.

Un système physique, chimique biologique, économique,.. peut se concevoir comme étant une relation des causes (variables d'entrée) et conséquence (variables de sortie).

La prévision du comportement d'un modèle est d'étudier l'évolution des grandeurs de sorties en réponse à une valeur ou variation des grandeurs d'entrées. C'est à dire trouver des relations entre les grandeurs d'entrées les grandeurs de sorties.

MODELE DE DECOUPAGE DU PETROLE BRUT

Le découpage de pétrole brut consiste en la détermination quantitative et qualitative des différentes coupes pétrolières issues de la distillation initiale et les autres opérations de transformations moléculaires, d'un pétrole brut dont les caractéristiques sont connues.

Dans notre étude nous allons essayer d'établir un modèle de fractionnement optimal de pétrole brut suivant trois marches, marche essence (maximum en essence), marche gas-oil (maximum en gas-oil), et marche mixte (un compromis entre tous les produits). Ce modèle est constitué par les étapes suivantes:

- L'acquisition des données
- Le choix de la marche
- Le fractionnement
- Le calcul de spécifications des différentes coupes
- La comparaison et l'ajustement qualitative et quantitative
- L'affichage des résultats évalués
- Fin.

1- ACQUISITION DES DONNEES

Les données sont, les plus accessibles expérimentalement, la température et la densité, elles sont introduites sous forme de fichier de données ou directement à partir du clavier. Les autres propriétés seront obtenues par corrélations appropriées.

2- LE CHOIX DE MARCHES

La sélection de la marche se fait par l'utilisateur, en positionnant le curseur sur l'option voulue.

4-LE FRACTIONNEMENT

Le découpage se fait, selon la marche choisie, comme suit:

4.1-LA MARCHÉ ESSENCE

Dans la marche essence, nous devons obtenir le maximum en essence, cela veut dire que nous choisirons le point initial le plus bas possible, il est cependant fixé par le gaz et le point final le plus élevé possible en terme de pourcentage volumique. Les rendements des autres produits pétroliers gaz, kérosène, gas-oil, et résidu seront aussi dé-terminés selon leurs spécifications exigées.

4.2-LA MARCHÉ GAS-OIL

Dans cette marche nous allons essayer d'obtenir le maximum en gas-oil, en déterminant tout d'abord le rendement maximal possible du gas-oil de la même manière que pour l'essence en la marche précédente, puis nous déterminerons les rendements des autres coupes.

4.3- LA MARCHÉ MIXTE

Pour cette dernière marche nous allons procéder, contrairement aux autres marches, de façon que le calcul se fait de la même manière pour toute les coupes en aboutissant à un compromis entre les différents output.

5- LES CALCULS DES CARACTERISTIQUES

La détermination des différentes caractéristiques et propriétés des produits pétroliers sont obtenus, à partir des corrélations, séparément comme suit:

5.1- LES GAZ

- la densité
- la tension de vapeur

5.2- ESSENCE

- la densité
- la tension de vapeur
- l'indice d'octane
- la distillation
- le pourcentage en soufre
- le pourcentage en plomb

5.3- KEROSENE

- la densité
- la tension de vapeur
- l'indice d'octane
- la distillation
- le point d'éclair
- le pourcentage en soufre

5.4- GAS-OIL

- la densité
- la tension de vapeur
- l'indice de cétane
- la distillation
- le point de congélation
- le point d'inflammabilité
- le pourcentage en soufre

5.5- RESIDU

- la température finale d'ébullition
- la viscosité
- le pourcentage en soufre

6- COMPARAISON ET AJUSTEMENT

Après la détermination des différentes caractéristiques pour chaque coupe pétrolière nous faisons la comparaison de ces propriétés avec les spécifications correspondantes.

Dans le cas où il y a un écart important entre les valeurs calculées et celles demandées nous devons faire un ou des ajustements appropriés.

Les ajustements que nous pouvons utiliser, varient selon la marche, la nature de la coupe et la propriété à améliorer, en utilisant surtout les transformations moléculaires ou en ajoutant ou en extrayant un corps ou une fraction d'une coupe considérée (comme le cas du butane pour ajuster la TVR), soit en mélangeant deux parties de coupes différentes.

Nous utiliserons le reforming catalytique pour améliorer le NO des essences, le cracking catalytique pour les coupes lourdes en augmentant la quantité en essence, et le visbreaking pour diminuer la viscosité de résidu.

Et d'autre par la distillation sous vide pour produire des huiles lubrifiantes à partir de résidu atmosphérique.

Une fois que les ajustements nécessaires sont fait nous calculons le bilan de matière globale pour chaque coupe et aussi leur caractéristiques les plus importantes, qui seront par la suite indispensables pour la l'établissement du programme optimal.

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

ETABLISSEMENT D'UN PROGRAMME OPTIMAL DE FABRICATION D'UNE RAFFINERIE.

LES RENSEIGNEMENTS NECESSAIRES POUR ETABLIR UN PROGRAMME OPTIMAL:

Le raffineur possédant, d'une part, les prévisions de vente ou d'expédition de tous les produits qui peut élaborer à son usine et d'autre part:

- Les spécifications précises des produits à fournir.
- L'analyse des pétroles bruts disponibles, leurs prix respectif et les limitations éventuelles du tonnage possibles de chacun deux.
- Les possibilités techniques de toutes les installations de fabrication de l'usine et le prix de revient des opération qu'on peut leur faire effectuer.
- Les caractéristiques de produits intermédiaires que donnent certaines unités de fabrication.
- La capacité de stockage en pétrole brut, produits intermédiaires et produits finis.

Ces renseignements sont nécessaires pour établir un programme optimal de fabrication d'une raffinerie pour la période considérée.

LES RESULTATS D'OPTIMISATION:

D'autre part l'établissement d'un programme optimal d'une raffinerie indique et détermine:

1- Les quantités de pétrole brut à raffiner pendant la période considérée c'est à dire de déterminer, parmi les pétroles bruts disponibles pour la raffinerie, quels sont les plus convenables pour assuré la fabrication des produits finis aux qualités et quantités demandées grâce en effet aux procédés de conversion.

2- L'activité de chacun des unités de fabrication de la raffinerie pour les traitements de pétroles bruts et de leurs dérivé le degré de séparation ou de conversion qu'elles réalisent. Le choix de la méthode de raffinage la plus avantageuse parmi celles qui conduisent une production déterminée.

3-les mélange à faire des divers coupes pétrolières par les opérations de raffinage, et de la constitution de produits marchand répondant aux spécifications très précise.

LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT M.O.P.B

I-INTRODUCTION

Le logiciel M.O.P.B (Mise en Oeuvre de Pétrole Brut) est un ensemble de programmes en langage TURBO PASCAL permettant le découpage de pétrole brut et la détarmination de la solution optimale d'un problème d'optimisation.

Le découpage d'un ou de plusieurs pétroles bruts se fait selon trois marches, a pour but de déterminer les rendements et les caractéristiques des différentes coupes pétrolières allant des gaz au résidu.

Le programme d'optimisation nous permet de déterminer le maximum de bénéfices ou le minimum de dépenses. Il est constitué de trois fichiers; le premier pour le découpage, le deuxième pour l'optimisation et le dernier appelle les deux premiers fichiers et aussi les fichiers de données.

LANCEMENT DU PROGRAMME

Il suffit de taper le nom du fichier du programme principal MOPB; une fois que le fichier est lancé, il fait appel aux autres programmes sélectionnés par l'utilisateur.

La sélection des options se fait par le déplacement du curseur à l'aide des flèches à partir de clavier du menu principal.

LE MENU PRINCIPAL

Dans ce menu on fait la sélection des menus secondaires qui sont:

- MENU D'OPTIMISATION;
- MENU DE DECOUPAGE;

SELECTION DE L'OPTION DECOUPAGE

L'utilisateur peut introduire les données soit, à partir du clavier, soit à partir d'un fichier; une fois que les données sont saisies on fait le choix de la marche

- FILE: sélectionner le brut à traiter;
- MARCHE A: marche essence;
- MARCHE B: marche gasoil;
- MARCHE C: marche mixte;
- QUITTER: sortir au menu principal;

les résultats sont affichés et l'utilisateur peut les sauvegarder une fois le découpage est fait .

SELECTION DE L'OPTION OPTIMISATION

L'introduction des données se fait à partir de clavier ou à partir d'un fichier de données ensuite on fait le choix

- NOUVEAU: créer un nouveau fichier;
- OUVRIRE: ouvrir un fichier déjà existe;
- MINIMISATION: minimisation de dépenses;
- MAXIMISATION: maximisation de bénéfice;
- QUITTER: sortir au menu principal;

les résultats peuvent être sauvegarder dans un fichier de donnée.

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

- EXEMPLES D'APPLICATION:

- MAXIMISATION DE BENEFICES

Une raffinerie peut traiter trois pétroles bruts, par distillation fractionnée dans les toppings, on obtient différentes coupes (gaz, gazoline, naphta léger, naphta lourd, kérosène, gasoil léger, gasoil lourd, fuel oil);

Ces coupes subissent un traitement complémentaire (épuration, désulfuration, cracking, reforming catalytique) pour devenir des produits de bases qui, convenablement mélangées, permettant d'obtenir les produits commerciaux désirés, qui sont présentés dans le tableau suivant:

produits	pb1	pb2	pb3
gaz	2	-	6
essence	20	25	30
kérosène	8	-	4
gasoil	40	25	30
fuel	30	50	30
total	100	100	100

les contraintes sont les suivantes:

la production gaz 300.000 t
 la production essence 1050.000 t
 la production kérosène 180.000 t
 la production gasoil 1350.000 t
 la production fuel 1800.000 t

Les bénéfices des pétroles bruts:

pb1 4 Um/t
 pb2 5 Um/t
 pb3 5 Um/t

Quelle quantité de chacun de pétrole brut devra-t-elle traiter pour réaliser le bénéfice total maximum ?

LA SOLUTION

Les résultats obtenus sont:

- les quantités de pétroles brut à traiter:
- pb1 est 1.5 millions de tonnes par an;
- pb2 est 2.4 millions de tonnes par an;
- pb3 est 0.5 millions de tonnes par an;

La somme est de 4.4 millions de tonnes.

La fonction économique est de 20.5 millions de UM

Les variables d'écart pour l'essence, le gas-oil, le fuel sont nulles. La raffinerie donc produit le maximum en ces produits; par contre elle fabrique moins de gaz et moins de kérosène le bilan des produits obtenus est le suivant:

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DU PETROLE BRUT

Gaz	60.000 t/an
Essence	1.050.000 t/an
Kérosène	140.000 t/an
Gas-oil	1.350.000 t/an
Fuel	1.800.000 t/an
<hr/>	
Total	4.400.000 t/an

Comme nous l'avons déjà remarqué, les variables d'écart pour l'essence, le gas-oil, le fuel sont nulles. On dit que leurs valeurs marginales, c'est à dire les coefficients des variables d'écarts dans l'expression de la fonction économique à l'optimum ne sont pas nuls.

ces valeurs marginales montrent l'intérêt de l'assouplissement de certaines contraintes. Ainsi la valeur marginale de l'essence est de 0.58333, toute augmentation de 1 unité de cette contrainte se traduit une augmentation de 0.58333 de la fonction économique, et de la même manière cette dernière sera augmentée de 0.08333 pour le gas-oil et de 0.3333 dans le cas de l'augmentation d'une unité de la contrainte du fuel-oil.

Par conséquent la raffinerie a un grand intérêt à développer sa production en essences. Si la production de l'essence passe 1.05 à 1.35 millions de tonnes, le bénéfice serait de:
24 millions de UM et la raffinerie traiterait
1.21 millions de tonnes de pb2 et 3 millions de tonnes de pb3.

PROGRAMME OPTIMAL D'UNE RAFFINERIE:
MINIMISATION DE DEPENSES

I. REPRESENTATION DU PROBLEME.
GENERALITE.

Nous allons traiter un exemple très simplifié d'un tel modèle en admettant que notre raffinerie.

- Peut traiter trois pétroles bruts de caractéristiques différentes.

Le premier, en provenance de Kuwait (pb1), lui revient 91 \$/t.

Le second, en provenance de l'Irak (pb2), lui revient 97 \$.

Le troisième, en provenance de Hassi-Massaoud (pb3), lui revient 108 \$/t.

Ces prix comprennent L'achat du brut, le coût de son transport, les frais variables de distillation et la quote-part des dépenses pratiquement proportionnelle à la quantité de brut mise en oeuvre.

Cette raffinerie comporte :

- une unité de distillation;
- une unité de reforming catalytique, permettant d'obtenir deux qualités de reformat. Les coûts proportionnels de traitement, ramenés à la tonne de reformat obtenu, sont:

1.79 \$/t pour la qualité qui a un N.O. clair de 90

1.80 \$/t pour la qualité qui a un N.O. clair de 95;

- une unité d'hydrodésulfuration du gas-oil, dont le coût proportionnel est de 0,70 £/t traité;

Cette raffinerie produit:

- du gaz liquéfié;
- du carburant auto ordinaire;
- du supercarburant;
- du kérosène;
- du gas-oil;
- du fuel oil ordinaire;

Elle emploie, comme combustible, du fuel-lourd ordinaire et l'excédent de gaz.

Elle utilise pour la fabrication des carburants, du plomb tétra-éthyle qui lui revient 10 \$/l.

Comment doit-elle régler son programme optimal de fabrication, lorsque les quantités de produits à obtenir sont fixées, pour que sa dépense soit minimale?

- RENDEMENT DES BRUTS

Au cours de la distillation, les bruts sont fractionnés en cinq coupes, c'est à dire donnent naissance à cinq mélanges d'hydrocarbures voisins, qui sont respectivement:

- gaz
- essence
- kérosène
- gas-oil
- résidu

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

Ces coupes, leur température d'ébullition n'est pas constante mais varie entre deux limites qui constituent l'intervalle distillatoire. cet intervalle est pratiquement indépendant du brut d'origine; par contre, il n'en est évidemment pas de même pour le rendement en chacune des coupes.

Les coupes de même intervalle distillatoire, provenant de bruts différents, ont des caractéristiques très voisines, sauf ce qui concerne la viscosité du résidu et la teneur en soufre. Nous adopterons donc dans la plus part du temps des caractéristiques moyennes pour les coupes ou produits intermédiaires.

produits	PB1	PB2	pb3
gaz	1,9	1,2	2,9
essence	19	25	25
kérosène	4,5	6,5	8,5
gas-oil	19,5	25	35,5
résidu	54,8	40,5	18,5
total	100	100	100

Tableau 1

- SPECIFICATIONS DES PRODUITS A FABRIQUER

Les spécifications particulières auxquelles doivent satisfaire certains produits finis à leur sortie de la raffinerie sont les suivantes:

spécifications	CARBURANT AUTO	SUPERCARBURANT
Densité: d	≥ 0,704	≤ 0,770
Tension de vapeur (bars): tvr.....	≤ 0,7	≤ 0,7
Nombre d'octane: NO.. (+ 0.5°/.. de P.T.E)	≥ 90	≥ 98

Tableau 2

spécifications	GAS-OIL LEGER	FUEL ORDINAIRE
Teneur en soufre (% poids): s.....	≤ 0,4	
Inflammabilité (°C)... I.M de l'infl: i	≥ 56 ≤ 7,1	
(coef de la matrice)		
Point de congélation (°C)..... I.M de cond.....	≤ -10 ≤ 27,6	
(coef de la matrice).		
Viscosité à 50°C (cSt)..... I.M de la visco.v...		≤ 360 ≤ 36,75
coef de la matrice: vx0,1.....		≤ 3,375

Tableau 3

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

- CARACTERISTIQUES DES PRODUITS INTERMEDIAIRES

Les caractéristiques moyennes des coupes obtenues en distillation, qui seront utilisées dans les contraintes de qualité des produits fabriqués sont indiquées dans les tableaux suivants:

spécification	essence
Densité: d	0,660
coef de la matrice: 1/d.....	1,515
Tension de vapeur (bars):tvr.....	0,7
coef de la matrice: tvr x 1/d.....	1,061
Nombre d'octane: NO.. (+ 0.5°/.. de P.T.E)	83
coef de la matrice: NO x 1/d x 0,01.....	1,285

- caractéristiques de l'essence -
Tableau 1

spécifications	KEROSENE	GAS-OIL
Teneur en soufre (% poids):s.....	0,15	0,6
Inflammabilité (°C)... I.M de l'infl: i	40	80
(coef de la matrice)	26,2	1,3
Point de congélation (°C).....	-50	+20
I.M de cond.....	11,2	77,44
(coef de la matrice).		
Viscosité à 50°C (cSt).....		5
I.M de la visco.v...		19,17
coef de la matrice: vx0,1.....		1,975

- caractéristiques du kérosène et gas-oil-
Tableau 2

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

- DONNEES SUR LE REFORMING CATALYTIQUE:

Le tableau ci-dessous contient les renseignements essentiels sur les rendements du reforming catalytique et les caractéristiques des reformats obtenus.

Rendements	NO 90	NO95
gaz	20	25
essence	80	75
caractéristiques des reformats		
Densité: d	0,764	0,77
coef de la matrice 1/d.....	1,309	1,294
Tension de vapeur (bars):tvr.....	0,4	0,4
coef de la matrice: tvr1/d.....	0,524	0,517
Nombre d'octane: NO. (+ 0.5°/.. de P.T.E)	97	100
coef de la matrice: NOx1/dx0,01.....	1,270	1,294

II MISE EN EQUATION

- CHOIX DES INCONNUES

Les inconnues du problème seront:

- les quantités de brut à distiller;
- les quantités des coupes issues du brut, à utiliser pour la constitution des différents produits ou comme combustibles;
- les quantités des reformat NO 90 et reformat NO 95;
- la quantité de gas-oil à désulfurer;
- les quantités de chacun des produits finis effectivement fabriquées.

- LISTE DES CONTRAINTES

Les contraintes du problème seront des équations et inéquations traduisant:

- les bilans de matières pour toutes les coupes, la charge de reforming, les combustibles et les produits à fabriquer;
- les caractéristiques des mélanges avant donner des produits finis conformes aux spécifications imposées.

- SECOND MEMBRE

La mise en équation consiste la traduction des données sous forme des équations mathématiques.

FORMULATION DES CONTRAINTES DE BILAN DE MATIERE:

Les contraintes de bilan de matière consisteront à exprimer que, pour le produit considéré, les quantités à fabriquer sont égales à celles qui sont utilisés ou demandées.

DESIGNATIONS

LES VRIABLES PRINCIPALES

- 1 PB1 : pétrole brut Kuwait
 - 2 PB2 : pétrole brut Irak
 - 3 PB3 : pétrole brut Hassi Messaoud
 - 4 GZCO: gaz vers combustion
 - 5 ESCA: essence vers carburant auto
 - 6 ESSC: essence vers supercarburants
 - 7 KERC: kérosène vers reforming
 - 8 PKER: production du kérosène
 - 9 ESRC: essence vers reforming
 - 10 GADS: gas-oil à désulfurer
 - 11 RF90: reformat 90 NO.
 - 12 RF98: reformat 98 NO.
 - 13 PCAR: production du carburant auto
 - 14 PSUP: production de supercarburant
 - 15 PGAL: production de gas-oil
 - 16 FUCO: fuel-oil vers combustion
 - 17 PFUL: production du fuel-oil
 - 18 GZLQ: gaz liquifié
-

LES CONTRAINTES

- 1 BILCOM: bilan des combustibles
 - 2 BILGAZ: bilan des gaz
 - 3 BILESS: bilan d'essence
 - 4 BILKER: bilan du kérosène
 - 5 BILGAL: bilan du gas-oil
 - 6 BILREF: bilan du reforming
 - 7 BILFUL: bilan du fuel
 - 8 PROCAR: production du carburant auto
 - 9 DENCAR: densité du carburant auto
 - 10 TVRCAR: tension de vapeur du carburant auto
 - 11 NO-CAR: indice d'octane du carburant auto
 - 12 PROSUP: production du supercarburant
 - 13 DENSUP: densité du supercarburant
 - 14 TVRSUP: tension de vapeur du supercarburant
 - 15 NO-SUP: indice d'octane du supercarburant
 - 16 PROKER: production du kérosène
 - 18 PROGAL: production du gas-oil
 - 19 SULGAL: teneur en soufre du gas-oil
 - 20 INFGAL: point d'inflammabilité du gas-oil
 - 21 CONGAL: point de congélation du gas-oil
 - 22 PROFUL: production du fuel-oil
 - 23 SULFUL: teneur en soufre du fuel-oil
 - 24 VISFUL: viscosité du fuel-oil
-

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

Suivant le cas, elles s'écriront :

- s'il n'a pas de vente :
quantité produite - quantité utilisé = 0
- si des ventes sont prévues :
quantité produite - quantité utilisé = débouché prévu;

- Bilan de gaz:

la distillation des bruts et le reforming catalytique produisent des gaz, et celui-ci est uniquement utilisé comme combustible. La contrainte s'écrira donc:

production de gaz - utilisation comme combustible = quantité de gaz liquifiés. Conformément aux rendements en gaz donnés par les tableaux nous pouvons dresser le tableau suivant

OPERATION	PRODUCTION DE GAZ %
Distillation pb1	1,9
Distillation pb2	1,2
Distillation pb3	2,9
Production de reformat:	
- à 90 N.O. pour carburant auto	20
- à 95 N.O. pour supercarburant	25

L'équation correspondante, repérée . . . , se formule donc, puisque l'inconnu représentant le tonnage de gaz utilisé comme combustible est GZCO:

$$0,019 \text{ PB1} + 0,012 \text{ PB2} + 0,029 \text{ PB3} - 1 \text{ GZCO} - 1 \text{ GZLQ} = 0.$$

- Bilan essence

$$0,19 \text{ PB1} + 0,25 \text{ PB2} + 0,25 \text{ PB3} - 1 \text{ ESCA} - 1 \text{ ESSC} - 1 \text{ ESCR} = 0.$$

- Bilan kérosène:

$$0,045 \text{ PB1} + 0,065 \text{ PB2} + 0,085 \text{ PB3} - 1 \text{ KERC} - 1 \text{ PKER} = 0.$$

- Bilan gas-oil:

Le gas-oil s'obtient en mélangeant les coupes gas-oil tirées des bruts.

$$0,195 \text{ PB1} + 0,25 \text{ PB2} + 0,355 \text{ PB3} - 1 \text{ PGAL} = 0.$$

- Bilan fuel lourd ordinaire:

Le fuel lourd ordinaire s'obtient en mélangeant les coupes résidu.

$$0,0508 \text{ PB1} + 0,405 \text{ PB2} + 0,185 \text{ PB3} - 1 \text{ PFUL} - 1 \text{ FUCO} = 0.$$

- Bilan combustible:

La consommation de combustibles des installations de la raffinerie, exprimé en fuel lourd équivalent, atteint:

- 1,5 % du brut de Kuwait;
- 1,7 % du brut d'Irak;
- 1,94 % du brut Hassi-Messaoud;
- 1,8 % du gas-oil désulfuré;
- 9,5 % du reformat 90 N.O.;
- 11,5 % du reformat 98 N.O.;

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

Les gaz ont un pouvoir calorifique supérieur à celui de fuel; pour tenir compte de ce fait, nous emploierons des coefficients fixant, conformément au rapport des pouvoirs calorifiques, La quantité de fuel lourd qui correspond à une tonne de chacun des combustibles. Ces coefficients valent, respectivement:

1 pour le fuel
1,20 pour le gaz:

Le bilan s'écrira:

1 GZCO + 1 FUCO - 0,015 PB1 - 0,017 PB2 - 0,02 PB3
- 0,18 GADS - 0,095 RF90 - 0,115 RF98 > 0.

- Bilan de la charge de reforming catalytique:

La charge de reforming catalytique est obtenu en mélangeant les coupes de l'essence et de kérosène.

Le tableau montre que la consommation de la charge est de:

1,247 t pour le reformat 90 NO;
1,33 t pour le reformat 98 NO;

Dans ces conditions, le bilan se formule :

1 ESRC + 1 KERC - 1,247 RF90 - 1,333 RF98 = 0.

- bilan en volume du carburant-auto (en volume):

Le carburant auto est constitué par mélange :

1,515 ESCA + 1,309 RF90 - PCAR = 0.

- Bilan en volume supercarburant (en volume):

1,515 ESSC + 1,294 RF95 - PSUP = 0.

- Formulation des contraintes particulières au carburant-auto

- contrainte de production:

La production de carburant auto doit être au moins égale au volume demandé.

PCAR > 240.

- densité minimale:

Le carburant auto doit avoir une densité supérieur ou égale à 0,704. Pour formuler cette contrainte nous écrivons que la somme des masses de ces constituants, qui est égale à la masse du carburant auto fabriqué, est supérieur ou égale au produit par 0,704 du volume de ce carburant auto.

1 ESCA + 1 RF90 - 0,704 PCAR > 0.

- tension de vapeur maximale:

Le carburant auto doit avoir une tension de vapeur inférieur ou égale à 0,7 bar.

Pour formuler cette contrainte nous multiplions la masse de chacun des constituants par un coefficient égal au rapport de sa tension de vapeur et de sa densité, coefficient explicité dans le tableau 1.P:48

La contrainte s'écrit par conséquent

-1,061 ESCA - 0,524 RF90 + 0,7 PCAR > 0.

- nombre d'octane minimal:

Le carburant auto doit avoir un indice d'octane supérieur ou égale à 90.

$$- 0,9 \text{ PCAR} - 1,258 \text{ ESCA} - 1,42 \text{ RF90} > 0.$$

- Formulation des contraintes particulières au supercarburant
- contrainte de production:

La production de supercarburant doit être au moins égale au volume demandé.

$$\text{PSUP} > 110.$$

- densité maximale:

Le supercarburant doit avoir une densité inférieure ou égale à 0,77. Pour formuler cette contrainte nous écrivons que la somme des masses de ces constituants, qui est égale à la masse du carburant fabriqué, est supérieur ou égale au produit par 0,704 du volume de ce supercarburant

$$- 1 \text{ ESSC} - 1 \text{ RF98} + 0,77 \text{ PSUP} > 0.$$

- tension de vapeur maximale:

Le supercarburant auto doit avoir une tension de vapeur inférieure ou égale à 0,7 bar. Pour formuler cette contrainte nous multiplions la masse de chacun des constituants par un coefficient égal au rapport de sa tension de vapeur et de sa densité, coefficient explicité dans le tableau 1.48 La contrainte s'écrit par conséquent

$$0,700 \text{ PSUP} - 1,061 \text{ ESSC} - 0,517 \text{ RF98} > 0.$$

- nombre d'octane minimal:

$$- 0,98 \text{ PSUP} + 1,258 \text{ ESSC} - 1,294 \text{ RF98} > 0.$$

- contrainte de production de kérosène

$$\text{PKER} > \text{dker}.$$

- Formulation des contraintes particulières au gas-oil

- contrainte de production:

$$\text{PGAL} > 250.$$

- teneur maximale en soufre:

La teneur en soufre du gas-oil ne doit pas dépasser 0,4%. La contrainte correspondante consistera donc à écrire que la masse totale de soufre, contenue dans l'ensemble des constituants:

$$- 0,234 \text{ PB1} - 0,216 \text{ PB2} - 0,039 \text{ PB3} + 1 \text{ GADS} + 7,1 \text{ PGAL} > 0.$$

- inflammabilité minimale:

La température d'inflammabilité de gas-oil doit être supérieure ou égale à 56°C. Pour exprimer cette contrainte nous avons recours à des indices de mélange pour la température d'inflammabilité. Nous utilisons à cette effet le tableau 1. page 69

$$27,6 \text{ PGAL} - 4,992 \text{ PB1} - 5,376 \text{ PB2} - 7,296 \text{ PB3} > 0.$$

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

- Point de congélation maximal:

Le point de congélation de gas-oil doit être inférieur ou égal à -10°C . Pour exprimer cette contrainte il nous allons recours à des indices de mélange pour le point de congélation. Nous utilisons à cette effet le tableau (2. page 64)

$$27,6 \text{ PGAL} - 4,992 \text{ PB1} - 5,376 \text{ PB2} - 7,296 \text{ PB3} > 0.$$

- Formulation des contraintes particulières au fuel lourd

- contrainte de production:

La production du fuel (pful) doit être au moins égale à la quantité demandée (dful);

$$\text{PFUL} > 360.$$

- viscosité maximale du fuel:

Le fuel doit avoir à la température de 50°C , une viscosité au plus égale à 360 cst. Pour exprimer cette contrainte il nous allons recours à des indices de mélange pour la viscosité.

Nous utilisons à cette effet le tableau (3. page 59)

$$3,675 \text{ PFUL} - 2,028 \text{ PB1} - 1,470 \text{ PB2} - 3,645 \text{ PB3} + 3,675 \text{ FUCO} > 0.$$

- La fonction économique

La fonction économique à minimiser, que nous appendrons FE, comporte uniquement les frais suivants:

- frais relatifs aux bruts;
- frais relatifs à la désulfuration du gas-oil;
- frais relatifs au reforming catalytique et à l'incorporation du P.T.E. dans le reformat obtenu (à raison de $0,5 \text{ } \%/ \dots$ en volume);

La fonction économique s'écrit donc:

$$\text{FECO} = 91 \text{ PB1} + 97 \text{ PB2} + 108 \text{ PB3} + 0,7 \text{ GADS} + 11,5 \text{ RF90} + 15,14 \text{ RF95}.$$

Remarque:

Nous avons supposé, dans ce problème, que les carburants étaient systématiquement éthylés à $0,5 \text{ } \%/ \dots$. Il est possible d'étudier des variantes, avec différents taux d'éthylation s'accompagne d'un accroissement de la sévérité opératoire du reforming et, par suite, des dépenses de traitement.

LE SYSTEME DES EQUATIONS

Minimize
 $+ 91 \text{ PB1} + 97 \text{ PB2} + 108 \text{ PB3} + 0.7 \text{ GADS} + 11.55 \text{ RF90}$
 $+ 15.14 \text{ PF98}$

Subject to

BILGAZ
 $+ 0.019 \text{ PB1} + 0.012 \text{ PB2} + 0.029 \text{ PB3} - 1 \text{ GZCO} + 0.2 \text{ RF90}$
 $+ 0.25 \text{ PF98} - 1 \text{ GZLQ} = 0$

BILESS
 $+ 0.19 \text{ PB1} + 0.25 \text{ PB2} + 0.25 \text{ PB3} - 1 \text{ ESCA} - 1 \text{ ESSC} - 1 \text{ ESRC}$
 $= 0$

BILKER
 $+ 0.045 \text{ PB1} + 0.065 \text{ PB2} + 0.085 \text{ PB3} - 1 \text{ KERC} - 1 \text{ PKER} = 0$

BILGAL
 $+ 0.195 \text{ PB1} + 0.25 \text{ PB2} + 0.355 \text{ PB3} - 1 \text{ PGAL} = 0$

BILFUL
 $+ 0.548 \text{ PB1} + 0.405 \text{ PB2} + 0.185 \text{ PB3} - 1 \text{ FUCO} - 1 \text{ PFUL} = 0$

BILCOM
 $- 0.015 \text{ PB1} - 0.017 \text{ PB2} - 0.02 \text{ PB3} + 1 \text{ GZCO} - 0.018 \text{ GADS}$
 $- 0.095 \text{ RF90} - 0.115 \text{ PF98} + 1 \text{ FUCO} \geq 0$

BILREF
 $+ 1 \text{ KERC} + 1 \text{ ESRC} - 1.247 \text{ RF90} - 1.333 \text{ PF98} = 0$

BILCAR
 $+ 1.515 \text{ ESCA} + 1.309 \text{ RF90} - 1 \text{ PCAR} = 0$

BILSUP
 $+ 1.515 \text{ ESSC} + 1.294 \text{ PF98} - 1 \text{ PSUP} = 0$

PROCAR
 $+ 1 \text{ PCAR} \geq 240$

DENCAR
 $+ 1 \text{ ESCA} + 1 \text{ RF90} - 0.704 \text{ PCAR} \geq 0$

TVRCAR
 $- 1.061 \text{ ESCA} - 0.524 \text{ RF90} + 0.77 \text{ PCAR} \geq 0$

NO-CAR
 $+ 1.258 \text{ ESCA} + 1.42 \text{ RF90} - 0.9 \text{ PCAR} \geq 0$

PROSUP
 $+ 1 \text{ PSUP} \geq 110$

DENSUP
 $- 1 \text{ ESSC} - 1 \text{ PF98} + 0.77 \text{ PSUP} \geq 0$

TVRSUP
 $- 1.061 \text{ ESSC} - 0.517 \text{ PF98} + 0.7 \text{ PSUP} \geq 0$

NO-SUP
 $+ 1.258 \text{ ESSC} + 1.294 \text{ PF98} - 0.98 \text{ PSUP} \geq 0$

PROKER
 $+ 1 \text{ KERC} \geq 45$

PROGAL
 $+ 1 \text{ PGAL} \geq 250$

SULGAL
- 0.234 PB1 - 0.216 PB2 - 0.039 PB3 + 1 GADS + 0.4 PGAL
>= 0

INFGAL
- 0.253 PB1 - 0.273 PB2 - 0.37 PB3 + 7.1 PGAL >= 0

CONGAL
- 4.992 PB1 - 5.376 PB2 - 7.296 PB3 + 27.6 PGAL >= 0

PROFUL
+ 1 PFUL >= 360

VISFUL
- 2.028 PB1 - 1.47 PB2 - 3.645 PB3 + 3.675 FUCO
+ 3.675 PFUL >= 0

- 0 <= PB1
- 0 <= PB2
- 0 <= PB3
- 0 <= GZCO
- 0 <= ESCA
- 0 <= ESSC
- 0 <= KERC
- 0 <= PKER
- 0 <= ESRC
- 0 <= GADS
- 0 <= RF90
- 0 <= PF98
- 0 <= PCAR
- 0 <= PSUP
- 0 <= PGAL
- 0 <= FUCO
- 0 <= PFUL
- 0 <= GZLQ

LASOLUTION OPTIMALE

	Variables	valeurs	coûts	Coûts marginaux
1	PB1	0.0000	91.0000	15.6703
2	PB2	991.2770	97.0000	0.0000
3	PB3	6.1430	108.0000	0.0000
4	GZCO	0.0000	0.0000	0.0000
5	ESCA	91.4144	0.0000	0.0000
6	ESSC	8.5603	0.0000	0.0000
7	KERC	47.2746	0.0000	0.0000
8	PKER	17.6805	0.0000	0.0000
9	ESRC	149.3803	0.0000	0.0000
10	GADS	114.3554	0.7000	0.0000
11	RF90	77.5456	11.5500	0.0000
12	PF98	74.9854	15.1400	0.0000
13	PCAR	240.0000	0.0000	0.0000
14	PSUP	110.0000	0.0000	0.0000
15	PGAL	250.0000	0.0000	0.0000
16	FUCO	42.6036	0.0000	0.0000
17	PFUL	360.0000	0.0000	0.0000
18	GZLQ	46.3290	0.0000	0.0000

	Contraintes		valeurs	Valeurs duales
1	BILGAZ	=	0.0000	0.0000
2	BILESS	=	0.0000	0.0000
3	BILKER	=	0.0000	0.0000
4	BILGAL	=	0.0000	0.0000
5	BILFUL	=	0.0000	387.8694
6	BILCOM	>=	0.0000	36.7687
7	BILREF	=	0.0000	7.5805
8	BILCAR	=	0.0000	0.0000
9	BILSUP	=	0.0000	-56.0680
10	PROCAR	>=	240.0000	-57.2716
11	DENCAR	>=	0.0000	3.7319
12	TVRCAR	>=	0.0000	0.0000
13	NO-CAR	>=	0.0000	84.9430
14	PROSUP	>=	0.0000	47.1754
15	DENSUP	>=	110.0000	9.1141
16	TVRSUP	>=	0.0000	0.0000
17	NO-SUP	>=	0.0000	10.3207
18	PROKER	>=	0.0000	1.1543
19	PROGAL	>=	45.0000	29.1501
20	SULGAL	>=	250.0000	0.0000
21	INFGAL	>=	0.0000	0.0000
22	CONGAL	>=	0.0000	1502.1080
23	PROFUL	>=	360.0000	1526.0760
24	VISFUL	>=	0.0000	0.0000

La fonction economica = 98928.29

III .RESOLUTION DU PROBLEME

Le problème comporte 24 contraintes et 18 variables principales est un peu trop complexe pour être résolu à la main.
 Nous allons donc confier sa résolution à un ordinateur.

INTERPRETATIONS DES RESULTATS

RESULTATS ESSENTIELS

L'examen du tableau montre que la solution optimale pour la raffinerie consiste:

- à produire exactement les quantités demandées pour les différents produits, puisque:

- 240 milliers de mètre cube de carburant auto;
- 110 milliers de mètre cube de supercarburant;
- 250 milliers de tonnes de gas-oil;
- 360 milliers de tonnes de fuel;

- à traiter:

- 0,00 milliers de tonnes de Kuwait;
- 991,277 milliers de tonnes d'Irak;
- 6,143 milliers de tonnes de Hassi Messaoud;

total: 997,5152 milliers de tonnes de bruts.

- à désulfurer:

114,3554 milliers de tonnes de gas-oil

- à utiliser pour le reforming

- 47,2746 milliers de tonnes de kérosène;
- 149,3803 milliers de tonnes d'essence;

total: 196,6563 milliers de tonnes;

- pour fabriquer du carburant auto:

- 91,4144 milliers de tonnes d'essence;
- 77,5456 milliers de tonnes de reformat 90;

total: 168,96 milliers de tonnes de carburant auto.

- pour fabriquer du supercarburant:

- 8,5603 milliers de tonnes d'essence;
- 74,9854 milliers de tonnes de reformat 98;

total: 83,5457 milliers de tonnes de carburant auto.

Dans ces conditions, ses frais variables sont minimaux, et s'élève à: 98928,29 milliers de dollars. (page 49)

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

Etablissement des principaux bilans

- bilan des combustibles

le combustible utilisé par la raffinerie est constitué par:

- 0, 00 milliers de tonnes de gaz;
 - 42,6036 milliers de tonnes de fuel lourd;

total 42,6036 milliers de tonnes de combustible.

- bilan globale de la raffinerie:

Vérifions qu'en ajoutant les combustibles aux masses des différents produits finis obtenus, nous trouvons la masse totale des brut mis en oeuvre. Nous avons en effet:

gaz: 46,6036 milliers de tonnes;
 carburant auto: 168,96 milliers de tonnes;
 supercarburant: 110,000 milliers de tonnes;
 kérosène: 17,6805 milliers de tonnes;
 gas-oil: 240,000 milliers de tonnes;
 fuels: 360,000 milliers de tonnes;
 combustible: 42,6033 milliers de tonnes;

total 997,5152 milliers de tonnes

ce résultat est bien identique à celui du page 50.

- bilan matière de du reforming:

le reforming-stock est obtenu par mélange de:

- 149,3803 milliers de tonnes d'essence;
 - 47,2746 milliers de tonnes de kérosène;

total: 196,6546 milliers de tonnes.

- Le reforming produit:

- reformat 90 NO:

RF90 = 77,5456 milliers de tonnes;

- reformat 98 NO:

RF98 = 74,9854 milliers de tonnes;

reforming productions (milliers de tonnes)	églage 90 NO	réglage 95 NO	total
gaz reformat	19,38 77,9854	24,9951 74,9854	
charge	96,91	99,98	196,654

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

CONSTITUANTS DES PRODUITS FINIS:

La solution optimale précise la composition des produits finis en fixant la quantité de chacun des constituants en milliers de tonnes.

- Gaz: La quantité des gaz obtenus est de 46,329 milliers de tonnes.

- Carburant auto

Le carburant occupe un volume de 240 milliers de mètres cubes, et a une masse de 168,96 milliers de tonnes, sa densité est:

$$d = 168,96 / 240 = 0,704.$$

Ce résultat est conforme à l'indication fournie par la solution optimale: la variable d'écart est nulle.

D'autre part, le carburant auto ainsi fabriqué a une tension de vapeur inférieure à 0,7 bar et un nombre d'octane supérieur à 90, puisque les variables d'écart, relatives aux contraintes ne sont pas nulles à l'optimum.

- Supercarburant

Le super-carburant a une masse de 83,5457 milliers de tonnes et occupe un volume 110 milliers de mètres cubes, sa densité est:

$$ds = 83,5457 / 110 = 0,7594.$$

La variable d'écart, qui vaut 1,1543, signifie précisément que la densité est de:

$$0,77 - 1,1543/110 = 0,7594.$$

D'autre part, le supercarburant ainsi fabriqué a une tension de vapeur de:

$$0,7 - 29/100 = 0,51 \text{ bar,}$$

et un nombre d'octane de 98, puisque la variable d'écart est nulle.

- Gas-oil

La quantité de gas-oil obtenu: 250 milliers de tonnes
Le gas-oil a une teneur en soufre de 0.4% en poids, puisque sa variable est nulle.

Par contre la variable d'écart prend à l'optimum, la valeur 1502,108 résulte alors de la relation de mélange que l'indice de mélange est de $7,1 - 1502,108 / 250 = 1,1$ qui correspond, d'après le tableau au point d'inflammabilité de 84°C.

L'indice de mélange de gas-oil est de $27,6 - 1526 / 250 = 6,1$.
D'après le tableau (2.7.9), le point de congélation est de -20,5°C.

- Fuel- oil

La quantité de fuel obtenu 360 milliers de tonnes.
La variable d'écart, relative à la contrainte, étant nulle, le fuel lourd ainsi fabriqué à une viscosité de 360 cSt à 50°C.

ETABLISSEMENT D'UN LOGICIEL DE MISE EN OEUVRE DE PETROLE BRUT

Bilan matière de distillation des bruts

En utilisant les rendements explicités au tableau 1.339, on peut dresser le bilan de matière complet des coupes obtenues lors de la distillation des quantités optimales de chacun des trois bruts.

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant:

DISTILLATION productions (milliers de tonnes)	BRUT 1	BRUT 2	BRUT 3	Total
gaz	0.000	11,895	0,178	12,675
essence	0.000	247,819	1,537	250,000
kérosène	0.000	64,433	0,522	64,955
gas-oil	0.000	247,819	2,180	250,000
résidu	0.000	401,467	1,136	402,593
brut distillé	0.000	991,277	6,1430	997,420

V. COÛTS MARGINAUX ET VARIABLES DUALES

Comme le problème consistait à minimiser les dépenses, les coûts de substitution sont tous positifs.

I. VARIABLE DUALE DES PRODUITS FINIS

Les variables duales sont toutes positives, ce qui est normal puisque une augmentation des débouchés entraînent nécessairement un accroissement des dépenses. De plus, nous constatons que les variables duales associées à des contraintes du type $>$ sont égales aux coûts marginaux des variables d'écart correspondantes.

C'est ainsi que nous avons:

- pour le carburant auto:	3,7319 x 240 \$
- pour le supercarburant:	10,3207 x 110 \$
- pour le gas-oil:	387,5894 x 250 \$

Total: 98928,92 \$

Ansî nous pouvons vérifier que la valeur prise par la fonction économique à l'optimum est égale à la somme des produits des quantités des biens obtenus par leur valeur duale. Et nous trouvons bien la valeur optimal de la fonction économique FECCO. Insistant sur le fait que ce résultat n'est obtenu que parce que nous avons écrit les équations des problème de façons telles que toutes les contraintes relatives aux qualités des produits ont un second membre nulle.

Dans ces conditions le coût marginal d'un produit est égal au coût moyen qu'on peut attribuer aux quantités déjà fabriquées, en tenant compte que des frais variables.

Coûts des contraintes

Les variables duales nous renseignent sur le coût des différentes contraintes de qualité.

Nous remarquons que les contraintes de qualité:

- Tension de vapeur du carburant auto;
- L'indice d'ocatane du carburant auto;
- La densité du supercarburant;
- La tension de vapeur de super carburant;
- Le point d'inflammabilité du gas-oil;
- Le point de congélation du gas-oil;

Elles ont ~~des~~ valeurs duales nulles. Ce résultat est conforme au fait que ces variables d'écart sont dans la base optimale. IL en résulte qu'un léger durcissement de ces spécifications n'entraînerait aucune charge pour la raffinerie.

Toutes les autres contraintes de qualité ont ~~des~~ valeurs duales positives, ce qui montre que les dépenses augmentent si les spécifications étaient plus sévères, ou, ce qui revient au même, si les caractéristiques des produits fabriqués étaient meilleures que les spécifications correspondantes.

Précisons la signification de la valeur duale associée à chacune des contraintes de qualité.

- nombre d'octane du supercarburant:

La variable duale associée à la contrainte de nombre d'octane de supercarburant, a la valeur 68,9717. Par conséquent, si le second membre de l'inéquation actuellement nul, devenait égal à 1, la fonction économique croîtrait de 68,9717 millier de dollars.

Autrement dit, faire le second membre égal à 1,4 revient à augmenter de 1 point le nombre d'octane minimum. Or, ce durcissement de la spécification entraîne une perte de 96,5603 milliers de \$ pour les 140 milliers de mètres cubes, une perte de 0,68 \$/m³.

- densité du carburant auto:

La variable duale associée à la contrainte de densité de carburant auto, a la valeur 84,94. Par conséquent, si le second membre de l'inéquation actuellement nul, devenait égal à 1, la fonction économique croîtrait de 84,94 milliers de dollars.

- teneur en soufre du gas-oil

La variable duale associée à la contrainte de teneur en soufre du gas-oil, a une valeur de 0,7. Par conséquent, si le second membre de l'inéquation, actuellement nul, devenait égal à 25, la fonction économique croîtrait de: $0,7 \times 25$ milliers de \$

Autrement dit, faire le second membre égal à 25 revient à ramener à 0.3% la teneur maximale en soufre du gasoil-leger. Or, ce durcissement de la spécification entraîne une perte de 17,5 milliers de \$ pour les 250 milliers de tonnes, une perte de 0,7 \$/t.

- viscosité du fuel ordinaire

La variable duale associée à la contrainte de viscosité du fuel-oil, a une valeur 10,0051. Par conséquent, si le second membre de l'inéquation, actuellement nul, devenait égal à 1, la fonction économique croîtrait de 10 milliers de dollars.

Coûts de substitution:

Une seule variable principale P_{B1} est nulle dans la solution optimale et par conséquent à un coût de substitution positif. Ce coût de substitution est: 15,6703 \$/t ceci précise donc la perte consécutive à l'utilisation d'une tonne de brut de Kuwait.

VI- CONCLUSION

Pour terminer, nous allons insister sur les précautions à prendre lors de l'utilisation des coûts marginaux et des variables duales. Pour cela, nous cherchons qu'elle est la nouvelle solution du problème si, toutes les autres conditions restant inchangées, le prix du brut Irak augmente de 1\$/t et passe donc de 97 à 98 \$/t.

La première idée qui vient à l'esprit, si on ne réfléchit pas suffisamment, c'est que la fonction économique va augmenter et que les valeurs duales vont en faire de même.

Cette dernière supposition n'est pas exacte.

La modification d'un coefficient de la fonction économique fait varier les différents coûts marginaux.

Ainsi la nouvelle valeur de la solution optimale, donnée par le tableau 57, montre que:

- La solution de base n'est pas modifiée par la majoration de prix du brut d'Irak:

toutes les variables conservent les mêmes valeurs;

- la fonction économique FECO, s'élève à 99919,57 milliers de \$. Elle a donc augmenté, par rapport à la solution optimale précédente, de 991,28 milliers de \$, voir page 57

- les coûts marginaux et valeurs duales restent constants pour:

- le carburant auto reste égale à 3,7319 \$ / metres cubes;
- le supercarburant reste égale à 10,3207 \$ / metres cubes;
- le fuel reste égale à 0,00 \$ / tonne.

Le cout marginal du gas-oil passe de 387,5894 à 391,5545.

Mais, bien entendu, la fonction économique est, ici encore, égale à la somme des produits des valeurs duales par les quantités de biens associés.

En conclusion, nous recommandons de ne pas utiliser les coûts marginaux et les valeurs duales avant d'avoir défini leur domaine de validité et de ne pas généraliser les résultats d'une solution sans appuyer sur une étude de paramétrisation.

* La nouvelle solution optimale *

	Variables	Valeurs	Coûts	Coûts marginaux
1	PB1	0.0000	91.0000	14.9038
2	PB2	991.2770	98.0000	0.0000
3	PB3	6.1430	108.0000	0.0000
4	GZCO	0.0000	0.0000	0.0000
5	ESCA	91.4144	0.0000	0.0000
6	ESSC	8.5603	0.0000	0.0000
7	KERC	47.2746	0.0000	0.0000
8	PKER	17.6805	0.0000	0.0000
9	ESRC	149.3803	0.0000	0.0000
10	GADS	114.3554	0.7000	0.0000
11	RF90	77.5456	11.5500	0.0000
12	PF98	74.9854	15.1400	0.0000
13	PCAR	240.0000	0.0000	0.0000
14	PSUP	110.0000	0.0000	0.0000
15	PGAL	250.0000	0.0000	0.0000
16	FUCO	42.6036	0.0000	0.0000
17	PFUL	360.0000	0.0000	0.0000
18	GZLQ	46.3290	0.0000	0.0000

Les variables d'ecart

24	BILCOM	7.5805	0.0000	0.0000
28	PROCAR	0.0000	0.0000	3.7319
29	DENCAR	0.0000	0.0000	84.9430
30	TVRCAR	47.1754	0.0000	0.0000
31	NO-CAR	9.1141	0.0000	0.0000
32	PROSUP	0.0000	0.0000	10.3207
33	DENSUP	1.1543	0.0000	0.0000
34	TVRSUP	29.1501	0.0000	0.0000
35	NO-SUP	0.0000	0.0000	68.9717
36	PROKER	2.2746	0.0000	0.0000
37	PROGAL	0.0000	0.0000	391.5545
38	SULGAL	0.0000	0.0000	0.7000
39	INFGAL	1502.1080	0.0000	0.0000
40	CONGAL	1526.0760	0.0000	0.0000
41	PROFUL	0.0000	0.0000	0.0000
42	VISFUL	0.0000	0.0000	10.4798

La fonction économique : $\text{€} 99919.57$

CONCLUSION GENERALE

Notre étude a consisté en l'élaboration d'un logiciel de mise en oeuvre du pétrole brut.

Dans la première partie nous avons établi un modèle permettant le découpage du pétrole brut en cinq fractions gaz, essence, kérosène, gasoil et résidu; selon trois marches, marche essence (maximum en essence), marche gasoil (maximum en gas-oil) et marche mixte dans cette dernière il y'avait un compromis entre tous les produits.

Ce fractionnement était nécessaire pour estimer les rendements et les qualités de chaque coupe pétrolière, obtenus après raffinage, qui seront par la suite utilisés dans la deuxième partie.

Dans la deuxième partie, nous avons essayé d'établir un programme optimal de gestion des produits de raffinage de Pétrole, en basant sur les résultats obtenus dans la première partie, en utilisant la programmation linière (la méthode du simplexe), ainsi compte tenu des données sur les pétroles bruts et sur la consommation du marche des différents produits.

Cette technique mathématique permettant de donner la meilleure solution d'un problème dont les données et les inconnues satisfaisants à une série d'équations et inéquations linières.

Et enfin, nous avons traduit les deux modèles en langage informatique " TURBO PASCAL ", pour établir un logiciel qui fait à la fois le découpage du pétrole brut et détermine la solution optimale du programme des produits de fabrication d'une raffinerie de pétrole.

Nos applications, portées sur la partie de découpage et celle de l'optimisation, ont été choisies que pour indiquer la méthodologie du travail.

LA BIBLIOGRAPHIE

- 1 AFNOR Manuel de norme d'analyse AFNOR
Association Francaise de Normalisation
Paris, (1973).
- 2 ASTM Manuel de normes d'analyses ASTM.
American Standard for Testing Material,
(1979).
- 3 P.WUITHIER Raffinage et génie chimique T1,T2
TECHNIP, Paris, (1972).
- 4 C.E.CHITOUR Raffinage du pétrole T1
OPU, Alger, (1983).
- 5 X.NORMAND Leçons sommaires sur l'industrie de
raffinage de pétrole T1, T2
TECHNIP, Paris, (1985).
- 6 A.MAZA, A.D Etablissement d'un logiciel de mise en
oeuvre de pétrole brut et étude
technico-économique d'un complexe de
raffinage
PFE, G.CH, ENP, Alger, (1994).
- 7 W.L.NELSON Petroleum refinery Engeneering,
Edition Mc. Graw Hill, (1958).
- 8 N.TCHERKEZOFT Travaux pratiques de chimie physique
essais normalisés
Centre d'études et de recherches, Raffinage
Institut Algérien du pétrole, Alger, (1967).
- 9 F.MAUSS Les combustibles liquides
Edition TECHNIP, (1973).
- 10 L.GOUAL, N.SKANDER Etude Analytique d'un pétrole algerien
HRS 162, P.F.E, direction C.E.Chitour,
Departement Génie Chimique, E.N.P, Alger.
- 11 H.MAURIN Programmation linéaire appliquée
TECHNIP, Paris, (1967).
- 12 F.ECOTO Initiation à la recherche opérationnelle
ELLIPSES, (1986).
- 13 A.GAUDIN Méthodes numériques appliquées
OPU, Alger, (1991).
- 14 SYSLO Descrite optimization algoritme with
Pascal programs
PRETICE-HALL, (1985).

LA SYNTHESSES DE CARBURANTS A PARTIR DES GAZ:

Les unités de transformation, craquage et reforming, que nous avons vues aux chapitres précédents, produisent une bonne production d'hydrocarbures légers de C1 à C4, c'est à dire de gaz si on les considère à la pression atmosphérique. Tant que l'importance de ces unités de transformation dans les raffineries est restée faible, les gaz qu'elles produisaient a pu être utilisé comme combustible sur place ou liquéfié s'il s'agissait de propane et du butane.

Il a bien fallu se préoccuper de trouver un autre débouché pour les gaz que celui de combustible d'usine.

Nous trouvons: Dans la série paraffinique, le méthane, éthane, propane, butane, isobutane;

Dans la série éthylène, propylène, butène et isobutène.

Les carbures diéthyléniques et acétyléniques ne sont présents qu'exceptionnellement en quantités appréciables à la sortie des appareils de craquage usuels et de réformage et, si nous en avons besoin, nous aurons à les préparer spécialement. Deux voies sont ouvertes aujourd'hui aux raffineurs pour la transformation des gaz disponibles.

La première est celle des carburants de synthèse, généralement à haut indice d'octane, et ils l'ont d'ailleurs suivie depuis les années 1932 ou 1933. La seconde est celle de la pétrochimie, c'est à dire de la fabrication de produits chimiques de synthèse: alcools, amines, matières plastiques, etc.

LA CONSTITUTION DES CARBURANTS POUR L'AUTOMOBILE ET L'AVIATION:

Ce sont les opérations de raffinage décrites dans les précédents chapitres qui nous donnent les coupes d'hydrocarbures à partir desquelles nous pourrions constituer nos carburants et supercarburants.

On dispose en effet de:

- Gazoline stabilisée de première distillation
- Essence de craquage catalytique et d'hydrocraquage
- Essence de reformage catalytique et d'isomérisation
- Essence de synthèse à partir des gaz
- Et éventuellement d'essence provenant d'un vapocraqueur de pétrochimie.

LA PETROCHIMIE

La PETROCHIMIE est cette jeune industrie qui utilise des hydrocarbures issus du pétrole pour la fabrication de produits chimiques organiques (solvant, matières plastiques, textiles artificiels, etc.).

Plus de 50 millions de tonnes de produits chimiques organiques sont fabriqués à partir du pétrole, mais il est intéressant de noter que le nombre des hydrocarbures qui constituent les matières premières de départ est très réduite. Il s'agit en effet surtout des suivants: méthane, éthylène, propylène, isobutène, butadiène, benzène, toluène et xylènes. Il y en a outre, pour des usages particuliers des coupes prélevées dans le pétrole lampant et dans les paraffines craquées. Notons aussi que l'hydrogène est très employé.

INDICES DE MÉLANGE POUR LES TEMPÉRATURES D'INFLAMMABILITÉ
(applicables aux masses)

INFLAMMABILITÉ (°C)	INDICE MÉLANGE (I.M.)	INFLAMMABILITÉ (°C)	INDICE MÉLANGE (I.M.)	INFLAMMABILITÉ (°C)	INDICE MÉLANGE (I.M.)
35	40	55	7,6	75	1,8
36	36,5	56	7,1	76	1,7
37	33,4	57	6,5	77	1,6
38	30,7	58	6,0	78	1,5
39	28,3	59	5,6	79	1,4
40	26,2	60	5,3	80	1,3
41	24,3	61	4,9	82	1,2
42	22,5	62	4,6	84	1,1
43	20,8	63	4,3	86	1,0
44	19,2	64	4,0	88	0,9
45	17,7	65	3,7	90	0,8
46	16,3	66	3,4	95	0,6
47	15,0	67	3,2	100	0,4
48	13,7	68	2,9	110	0,2
49	12,6	69	2,7	120	0,1
50	11,6	70	2,5	> 120	0
51	10,7	71	2,3		
52	9,8	72	2,2		
53	9,0	73	2,0		
54	8,3	74	1,9		

- Tableau 1

INDICES DE MÉLANGE POUR LES POINTS DE CONGÉLATION
(applicables aux masses)

POINT DE CONGÉLATION (°C)	INDICE MÉLANGE (I.M.)	POINT DE CONGÉLATION °C	INDICE MÉLANGE (I.M.)	POINT DE CONGÉLATION °C	INDICE MÉLANGE (I.M.)
- 50	11,2	- 9	28,3	+ 6	45,2
- 45	12,2	- 8	29	+ 7	46,7
- 40	14,0	- 7	29,8	+ 8	48,4
- 35	15,8	- 6	30,7	+ 9	50,2
- 30	17,6	- 5	31,8	+ 10	52
- 29	17,9	- 4	32,9	+ 11	54,2
- 28	18,3	- 3	34,0	+ 12	56,3
- 27	18,7	- 2	35,0	+ 13	58,5
- 26	19,0	- 1	36,1	+ 14	60,6
- 25	19,4	0	37,2	+ 15	62,8
- 24	19,8	+ 1	38,3	+ 16	65,3
- 23	20,3	+ 2	39,5	+ 17	68,2
- 22	20,8	+ 3	40,9	+ 18	71
- 21	21,3	+ 4	42,4	+ 19	74,2
- 20	21,8	+ 5	43,8	+ 20	77,4
- 19	22,3			+ 21	80,7
- 18	22,9			+ 22	83,9
- 17	23,4			+ 23	87,1
- 16	24,0			+ 24	90,4
- 15	24,5			+ 25	94,0
- 14	25			+ 26	97,6
- 13	25,6			+ 27	101,4
- 12	26,2			+ 28	105,8
- 11	26,9			+ 29	110,1
- 10	27,6			+ 30	115,4

(applicables aux masses)

VISCOSITÉ (cSt)	INDICE MÉLANGE (I.M.)	VISCOSITÉ (cSt)	INDICE MÉLANGE (I.M.)	VISCOSITÉ (cSt)	INDICE MÉLANGE (I.M.)
1,0	3,25	30	28,88	220	35,48
1,5	8,32	40	30,03	240	35,71
2,0	11,40	50	30,86	260	35,92
2,5	13,55	60	31,51	280	36,11
3,0	15,18	70	32,04	300	36,29
3,5	16,46	80	32,48	320	36,45
4,0	17,52	90	32,87	340	36,61
5,0	19,17	100	33,20	360	36,75
6,0	20,43	110	33,49	380	36,88
7,0	21,44	120	33,76	400	37,00
8,0	22,27	130	34,00	420	37,12
9,0	22,97	140	34,21	440	37,23
10,0	23,58	150	34,41	460	37,34
12,0	24,58	160	34,60	500	37,53
14,0	25,38	170	34,77	600	37,95
16,0	26,05	180	34,93	700	38,30
18,0	26,62	190	35,08	800	38,59
20,0	27,11	200	35,22	1 000	39,07

Tableau. 3