

Louvain School of Management

Gestion d'un groupe de raffineries

Auteurs : Luka BENEDETTI et Fiona GIUDICE
Promoteur : Mr Daniel DE WOLF
Année académique 2022-2023
Mémoire présenté en vue de l'obtention du titre de
Master 60 en sciences de Gestion
Horaire décalé

Résumé

Une compagnie pétrolière souhaite optimiser l'exploitation de sa division Extrême Orient. Les deux raffineries dont la compagnie dispose sont situées respectivement à Sydney en Australie et à Tokyo au Japon. Le pétrole brut provient de deux fournisseurs, localisés à Brunei et en Iran.

Afin de formuler le problème mathématiquement, un diagramme de réseau a été modélisé pour représenter le problème de transport du pétrole brut des fournisseurs aux raffineries, le processus de raffinage ainsi que le transport des produits pétroliers vers les clients. L'étape de distillation sépare le pétrole brut en différentes fractions : les naphtes légère, moyenne et lourde, les huiles légère et lourde et les résidus. Ces fractions sont ensuite utilisées dans les différents mélanges qui vont permettre d'obtenir les cinq produits pétroliers : les essences moteurs, c'est-à-dire l'essence normale et l'essence super, le kérosène, le mazout et l'huile de graissage.

Les indices et variables ont été définis au préalable pour l'expression de l'objectif du problème d'optimisation, qui consiste à minimiser les coûts d'achat, de raffinage, de transport des bruts et de transport des produits. Les contraintes du problème reprennent les quantités et les prix des contrats avec les producteurs, les capacités journalières des raffineries, les équilibres des flux présents dans le diagramme de réseau, la capacité des pétroliers de la compagnie, les indices d'octane exigés pour les essences moteurs, le rapport de production souhaité entre l'essence super et l'essence normale, la pression de vapeur maximale du kérosène, le ratio du mélange de mazout à respecter ainsi que les demandes des clients à satisfaire.

Pour résoudre le problème d'optimisation linéaire formulé, l'algorithme du simplexe a été utilisé au travers du solveur Excel. L'algorithme a permis de déterminer la quantité de brut achetée aux deux producteurs, les proportions de naphtes, huiles et résidus utilisées pour les produits finaux, les quantités de produits transportées vers les différents clients et finalement, la valeur de l'objectif, c'est-à-dire le coût total minimisé.

La solution optimale obtenue ainsi que le rapport de sensibilité fourni par Excel ont permis de réaliser l'analyse post-optimale pour adresser des recommandations à la compagnie pétrolière. Sur base des prix cachés, il est conseillé à la compagnie d'augmenter le montant du contrat avec Brunei afin de réduire les coûts et de maintenir le montant du contrat avec l'Iran inchangé. Le groupe pétrolier est en mesure de répondre à une demande plus élevée en essences en Australie car cela n'aurait pas d'impact sur les coûts. Cependant, il est déconseillé d'augmenter la demande australienne en kérosène, graisse et particulièrement en mazout car cela entraînerait une augmentation des coûts totaux de production. Étant donné la capacité de production inutilisée de la raffinerie de Sydney, il est justifié d'acquérir les deux concurrents en Nouvelle-Zélande et il n'est pas nécessaire d'investir dans de nouvelles capacités car cela n'aurait de plus aucun intérêt pour la compagnie au niveau des coûts. Finalement, il n'est pas utile d'investir dans un nouveau pétrolier car la quantité de barils de brut transportés n'atteint pas la capacité maximale disponible et les transporteurs indépendants n'ont pas été sollicités.

Table des matières

1	Introduction	8
2	Formulation du problème	9
2.1	Choix des indices	9
2.2	Choix des variables	10
2.3	Diagramme de réseau	11
2.4	Expression de l'objectif	14
2.5	Expression des contraintes	16
3	Algorithme de résolution	25
4	Analyse post-optimale	28
5	Conclusion	30

Bibliographie		31
----------------------	--	-----------

Table des figures

1	Diagramme de réseau - Partie 1	11
2	Diagramme de réseau - Partie 2	12
3	Diagramme de réseau - Partie 3	13
4	Contraintes sur les montants des contrats	28
5	Contraintes sur la demande des produits en Australie	28
6	Contraintes sur les capacités de raffinage	29
7	Contraintes sur la capacité des pétroliers	29

Liste des tableaux

1	Contrats de livraison	11
2	Prix des bruts	14
3	Coûts de transport du brut	15
4	Coûts de raffinage	15
5	Coûts de transport des produits	15
6	Contrats de livraison	16
7	Temps de trajet d'un pétrolier	17
8	Capacité journalière pour la distillation de brut	17
9	Fractions de naphtes	18
10	Fractions d'huiles	18
11	Fractions de résidus	18
12	Capacité journalière pour le reformage de naphtes	19
13	Essence réformée par baril de naphte	19
14	Capacité journalière pour le craquage d'huiles	20
15	Essence et huile craquées par baril d'huile	21
16	Indice d'octane des composants	22
17	Pression de vapeur des composants	22
18	Demande des clients	24
19	Quantités de brut	25
20	Transport du brut des fournisseurs aux raffineries	25
21	Utilisations des naphtes, essences réformées et essences craquées	26
22	Utilisations des huiles légères, lourdes et craquées	26
23	Utilisations des résidus	26
24	Transport des produits finis	27
25	Prix des bruts	27

1 Introduction

Ce travail de fin d'études analyse un problème d'optimisation d'une compagnie pétrolière concernant l'exploitation de sa division Extrême Orient. La compagnie achète le pétrole brut auprès de deux fournisseurs, situés à Brunei et en Iran, et dispose de deux raffineries, à Sydney et à Tokyo.

L'objectif est d'établir le plan optimal d'achat et de transport des bruts, d'exploitation des raffineries et de mise à disposition des produits finaux afin de satisfaire la demande des clients à coût d'exploitation minimal. Les concepts utilisés dans ce travail ont été enseignés par le professeur Daniel DE WOLF dans le cadre du cours « MGEHD1322 - Production »[1].

Des contrats de livraison définissent le nombre maximal de barils de pétrole brut fournis par chaque producteur ainsi que les prix d'achat. Ces bruts sont ensuite transférés vers les raffineries avec les bateaux de la compagnie ou via des transporteurs indépendants lorsque la capacité de transport n'est pas suffisante.

Le processus de raffinage commence avec la distillation, qui va séparer le pétrole brut en plusieurs fractions : les naphthes légère, moyenne et lourde, les huiles légère et lourde et les résidus. Les naphthes peuvent ensuite être utilisées directement pour le mélange de plusieurs types de carburants ou elles peuvent passer par une étape de reformage, qui va produire une essence d'indice d'octane 115. Quant aux huiles lourdes et légères, elles peuvent soit être utilisées pour le mélange en kérosène ou mazout, soit elles peuvent suivre le processus de craquage catalytique, qui produit soit de l'huile de craquage, soit de l'essence de craquage d'indice d'octane 105. L'huile craquée sera utilisée pour le mélange en mazout et en kérosène tandis que l'essence craquée sert au mélange des essences moteurs. Les résidus permettent de produire de l'huile de graissage ou sont ajoutés au mélange en kérosène et en mazout. Le processus de raffinage permet finalement d'obtenir cinq produits pétroliers : les essences moteurs autrement dit l'essence normale et l'essence super, le kérosène, le mazout et l'huile de graissage. Les explications détaillées sur le processus de raffinage ainsi que l'ensemble des données numériques sont fournies dans l'énoncé du mémoire [2].

La première phase du travail consiste à définir les indices et les variables nécessaires pour la formulation du problème. Le diagramme de réseau permettra de schématiser le transport des bruts entre les fournisseurs et les raffineries, le processus de raffinage mis en oeuvre dans les raffineries ainsi que le transport des produits finaux vers les clients. La formulation du problème reprendra l'expression de l'objectif ainsi que toutes les contraintes auxquelles les variables seront soumises.

Le problème sera ensuite résolu à l'aide de l'algorithme du simplexe, qui permet de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire. Cette méthode sera mise en oeuvre avec le solveur d'Excel et fournira la valeur de chacune des variables ainsi que la valeur de l'objectif.

Le rapport de sensibilité, fourni par Excel, permettra finalement de répondre aux questions d'analyse post-optimale du problème grâce à une interprétation économique.

2 Formulation du problème

2.1 Choix des indices

Cette section définit la liste des indices utilisés lors de la formulation du problème :

Fournisseurs $f \in \{B, I\}$ pour Brunei et Iran

Raffineries $r \in \{s, t\}$ pour Sydney et Tokyo

Produits pétroliers $p \in \{en, es, ke, ma, gr\}$ pour essence normale, essence super, kérosène, mazout et huile de graissage

Clients $c \in \{a, m, p, nz, j\}$ pour Australie, Malaisie, Philippines, Nouvelle-Zélande et Japon

Naphtes $n \in \{le, mo, lo\}$ pour les naphtes légère, moyenne et lourde

Essences normale et super $ns \in \{en, es\}$

Essences $e \in \{en, es, er\}$ pour essence normale, essence super et essence réformée

Huiles $h \in \{le, lo\}$ pour les huiles légère et lourde

Les quatre usages des huiles légère et lourde $kmc \in \{ke, ma, hc, ec\}$ pour kérosène, mazout, huile de craquage et essence de craquage

Les deux usages de l'huile de craquage $km \in \{ke, ma\}$ pour kérosène et mazout

Les trois usages des résidus $kmg \in \{ke, ma, gr\}$ pour kérosène, mazout et huile de graissage

2.2 Choix des variables

L'ensemble des variables représentées dans le diagramme de réseau peuvent être listées de la manière suivante :

$achat(f)$: nombre de barils de brut achetés chez le fournisseur f par jour

$brut(f, r)$: nombre de barils de brut transportés par jour du fournisseur f vers la raffinerie r

$bruttc(f, r)$: nombre de barils de brut transportés par jour par les transporteurs de la compagnie du fournisseur f vers la raffinerie r

$brutti(f, r)$: nombre de barils de brut transportés par jour par les transporteurs indépendants du fournisseur f vers la raffinerie r

$naphte(r, n)$: fractions de naphtes légère, moyenne et lourde obtenues dans la raffinerie r

$huile(r, h)$: fractions d'huiles légère et lourde obtenues dans la raffinerie r

$residus(r)$: résidus obtenus dans la raffinerie r

$usagenaphte(r, n, e)$: quantité de naphtes de la raffinerie r et de type n utilisées pour la production des essences e

$essreformee(r)$: quantité d'essence réformée produite à la raffinerie r

$usageessreformee(r, ns)$: quantité d'essence réformée de la raffinerie r utilisée pour la production des essences normale et super ns

$usagehuile(r, h, kmc)$: quantité d'huiles de la raffinerie r et de type h utilisées pour le mélange kmc

$huilecraquee(r)$: quantité d'huile craquée produite à la raffinerie r

$usagehuilecraq(r, km)$: quantité d'huile de craquage de la raffinerie r utilisée pour le mélange km

$esscraquee(r)$: quantité d'essence craquée produite à la raffinerie r

$usageesscraquee(r, ns)$: quantité d'essence de craquage de la raffinerie r utilisée pour la production des normale et super ns

$usageresidus(r, kmg)$: quantité de résidus de la raffinerie r utilisés pour le mélange kmg

$produit(r, p)$: nombre de barils de produit p obtenus dans la raffinerie r par jour

$transport(r, p, c)$: nombre de barils de produit p transportés de la raffinerie r vers le client c par jour

2.3 Diagramme de réseau

Pour pouvoir formuler mathématiquement le problème, nous allons tout d'abord le représenter par un diagramme de réseau.

Dans ce problème, le graphique de réseau peut être scindé en trois parties.

Le premier diagramme, repris à la Figure 1, représente le problème de transport du pétrole brut des fournisseurs aux raffineries ainsi que la première étape du raffinage. En effet, la compagnie pétrolière dispose de deux fournisseurs de pétroles bruts, le brut venant de Brunei et le brut venant d'Iran, ainsi que deux raffineries situées à Sydney et à Tokyo.

Les contrats de livraison avec les deux producteurs définissent un nombre maximal de barils fournis par jour, égal à 35.000 pour Brunei et 45.000 pour l'Iran.

Ces bruts sont ensuite traités dans une des deux raffineries où ils passent par une étape de distillation, qui permet de séparer les naphthes légère, moyenne et lourde, les huiles légère et lourde et les résidus.

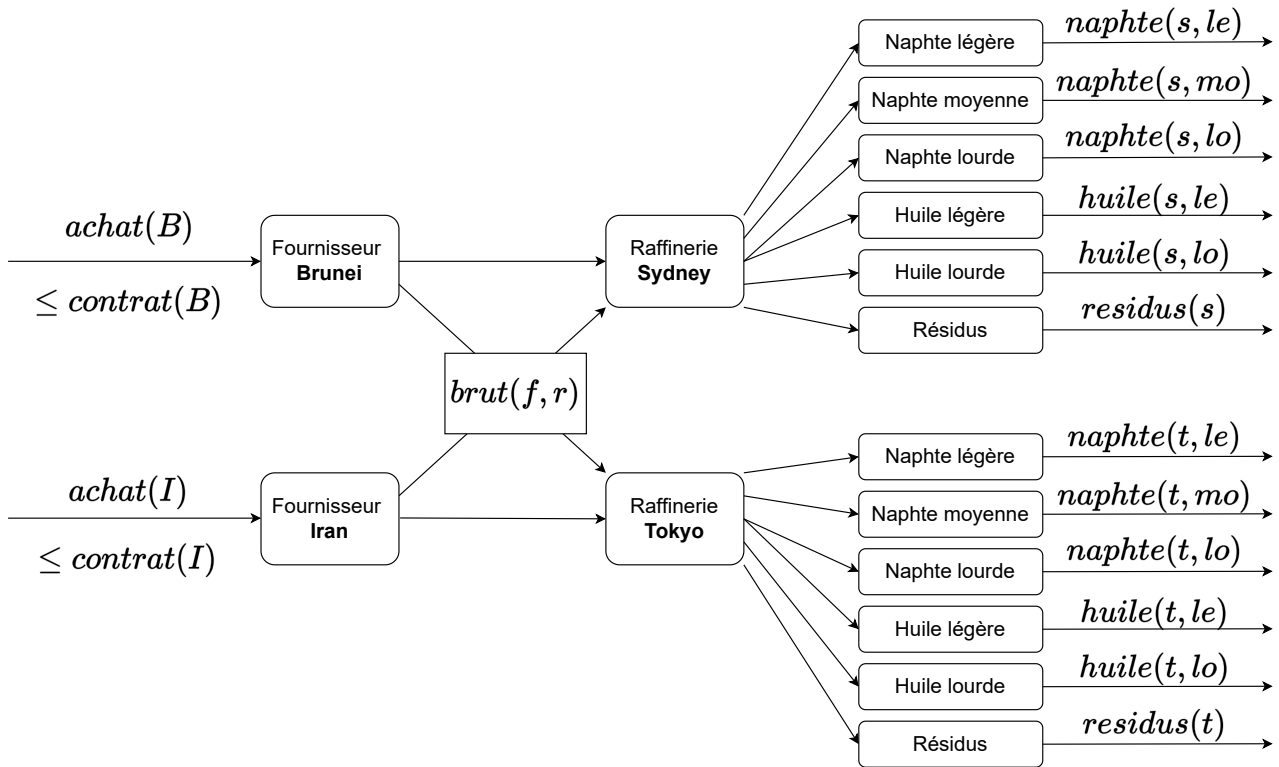


FIGURE 1 – Diagramme de réseau - Partie 1

La fonction $contrat(f)$ représente le nombre maximal de barils de brut que peut fournir chaque fournisseur f par jour :

Brut	$contrat(f)$ (baril/jour)
Brunei	35.000
Iran	45.000

TABLE 1 – Contrats de livraison

Le deuxième diagramme, illustré à la Figure 2, présente le processus de raffinage ayant lieu dans chacune des deux raffineries après la première étape de distillation.

Les naphtes peuvent être utilisées directement pour le mélange en essence normale et en essence super ou sont soumises à un processus de reformage pour produire une essence d'indice d'octane 115.

Quant aux huiles lourdes et légères, elles sont soit utilisées immédiatement pour le mélange en kérosène ou mazout, soit soumises à un processus de craquage catalytique, qui produit de l'huile de craquage ou de l'essence de craquage d'indice d'octane 105. L'huile craquée est utilisée pour le mélange en mazout et en kérosène tandis que l'essence craquée est utilisée pour le mélange des essences moteurs.

Les résidus sont, quant à eux, utilisés pour produire soit de l'huile de graissage soit pour le mélange en kérosène et en mazout.

L'essence normale et l'essence super sont donc obtenues par le mélange des naphtes, des essences réformées et des essences craquées.

Le kérosène et le mazout sont produits à partir des huiles légère et lourde, de l'huile craquée et des résidus.

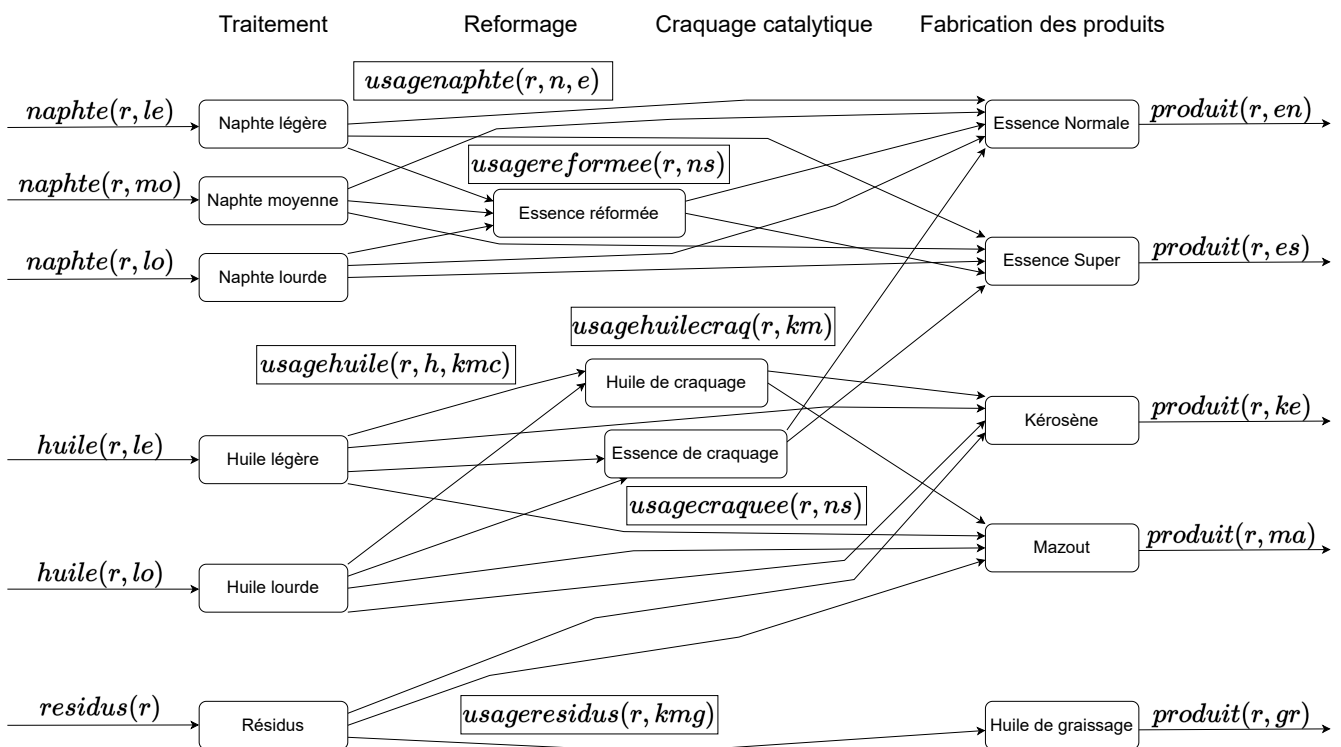


FIGURE 2 – Diagramme de réseau - Partie 2

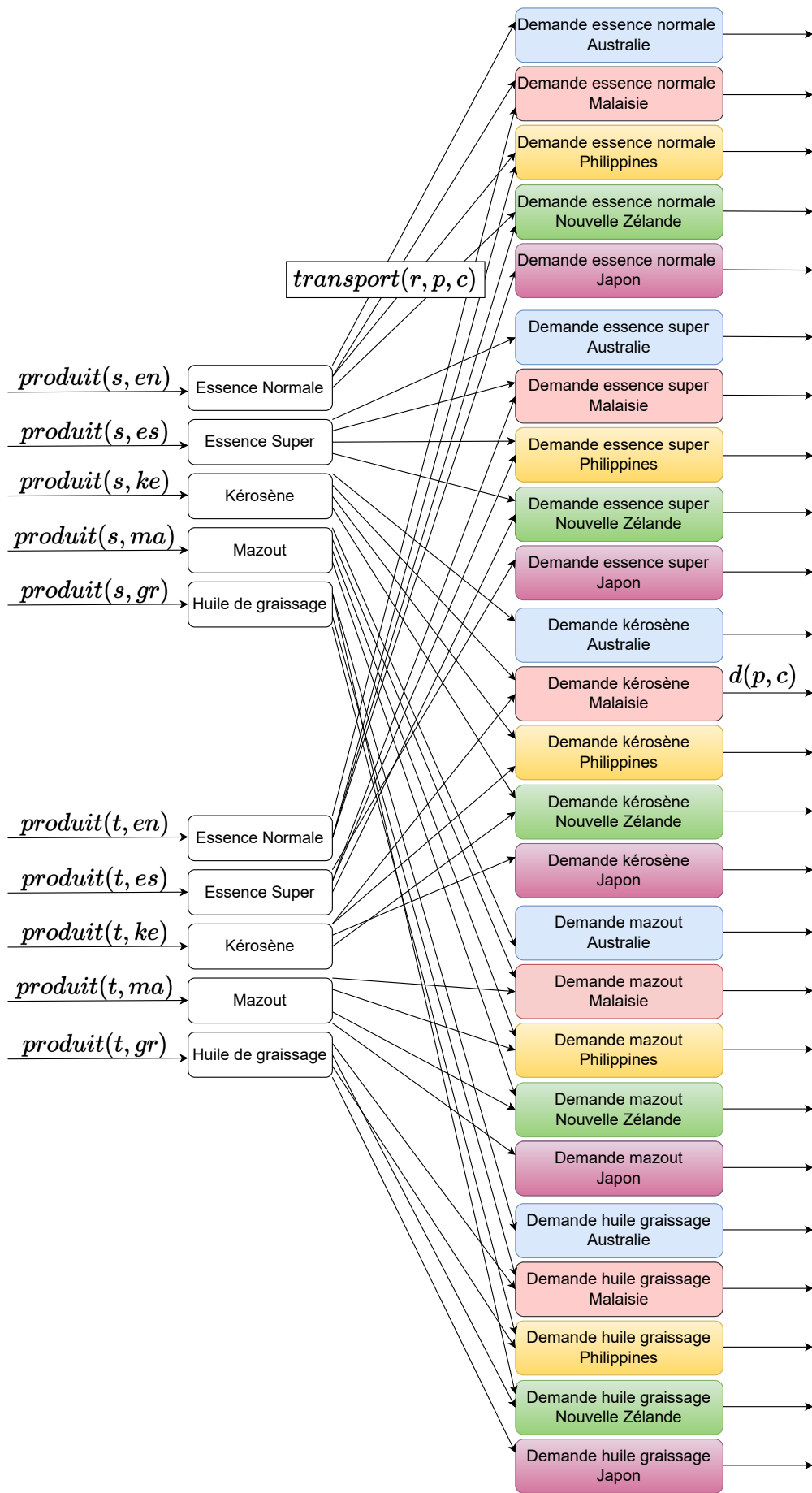


FIGURE 3 – Diagramme de réseau - Partie 3

Le dernier diagramme, présenté à la Figure 3, illustre le transport des produits pétroliers obtenus dans chaque raffinerie vers les différents clients, ayant chacun une demande à satisfaire. Les produits fabriqués dans la raffinerie de Sydney serviront à alimenter la demande locale en Australie et la raffinerie de Tokyo fournira les produits au Japon. Les deux raffineries transporteront également des produits par bateaux vers la Malaisie, les Philippines et la Nouvelle-Zélande.

2.4 Expression de l'objectif

L'objectif consiste à minimiser quatre parties :

- les coûts d'achat ;
- les coûts de raffinage ;
- les coûts de transport des bruts ;
- les coûts de transport des produits.

$$\begin{aligned}
 \min z = & \sum_f \text{achat}(f) \cdot c_{\text{achat}}(f) \\
 & + \sum_f \sum_r \text{brut}(f, r) \cdot c_{\text{raff}}(f, r) \\
 & + \sum_f \sum_r [\text{brutt}c(f, r) \cdot c_{\text{transpb}}(f, r) + \text{brutti}(f, r) \cdot 1, 1 \cdot c_{\text{transpb}}(f, r)] \\
 & + \sum_r \sum_p \sum_c \text{transport}(r, p, c) \cdot c_{\text{transpp}}(r, p, c)
 \end{aligned} \tag{1}$$

avec :

Fournisseurs $f \in \{B, I\}$ pour Brunei et Iran

Raffineries $r \in \{s, t\}$ pour Sydney et Tokyo

Produits pétroliers $p \in \{en, es, ke, ma, gr\}$ pour essence normale, essence super, kérosène, mazout et huile de graissage

Clients $c \in \{a, m, p, nz, j\}$ pour Australie, Malaisie, Philippines, Nouvelle-Zélande et Japon

La fonction c_{achat} représente les coûts d'achat de barils de brut selon le fournisseur, donnés par le tableau suivant :

Brut	$c_{\text{achat}}(f)$ (\$/baril)
Brunei	81,95
Iran	48,80

TABLE 2 – Prix des bruts

La fonction $c_{transpb}$ correspond aux coûts de transport du brut à partir de chaque producteur vers les deux raffineries. Ces coûts variables de transport sont repris dans le tableau suivant :

Coût de transport	$c_{transpb}(B, r)$ (\$/baril)	$c_{transpb}(I, r)$ (\$/baril)
Raffinerie de Sydney	1,3	3,1
Raffinerie de Tokyo	1,2	2,5

TABLE 3 – Coûts de transport du brut

La fonction c_{raff} représente les coûts de raffinage pour chacun des deux bruts et chacune des deux raffineries :

Coût de raffinage	$c_{raff}(B, r)$ (\$/baril)	$c_{raff}(I, r)$ (\$/baril)
Raffinerie de Sydney	17,8	18,5
Raffinerie de Tokyo	16,6	17,2

TABLE 4 – Coûts de raffinage

La fonction $c_{transpp}$ désigne les coûts de transport des différents produits pétroliers à partir des deux raffineries vers chaque client :

$c_{transpp}(r, p, c)$ (\$/baril)	$c_{transpp}(r, p, a)$	$c_{transpp}(r, p, j)$	$c_{transpp}(r, p, m)$	$c_{transpp}(r, p, p)$	$c_{transpp}(r, p, nz)$
Essences (Sydney)	0	-	2,0	0,75	0,5
Kérosène (Sydney)	0	-	2,0	0,75	0,5
Mazout (Sydney)	0	-	3,0	1,0	0,75
Essences (Tokyo)	-	0	1,0	1,0	0,5
Kérosène (Tokyo)	-	0	1,0	1,0	1,0
Mazout (Tokyo)	-	0	2,0	1,25	0,5
Graisse (Sydney et Tokyo)	175	125	150	150	150

TABLE 5 – Coûts de transport des produits

2.5 Expression des contraintes

- Contrainte de positivité :

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{achat}(f) \\
 \text{brut}(f, r) \\
 \text{brutt}(f, r) \\
 \text{brutti}(f, r) \\
 \text{naphte}(r, n) \\
 \text{huile}(r, h) \\
 \text{residus}(r) \\
 \text{usagenaphte}(r, n, e) \\
 \text{essreforme}(r) \\
 \text{usageessreforme}(r, ns) \\
 \text{usagehuile}(r, h, kmc) \\
 \text{huilecraquee}(r) \\
 \text{usagehuilecraque}(r, kmc) \\
 \text{esscraquee}(r) \\
 \text{usageesscraquee}(r, ns) \\
 \text{usageresidus}(r, kmg) \\
 \text{produit}(r, p) \\
 \text{transport}(r, p, c)
 \end{array} \right\} \geq 0$$

- Contrats de livraison avec les producteurs :

$$\text{achat}(f) \leq \text{contrat}(f), \forall f \quad (2)$$

avec :

$\text{contrat}(f)$, le nombre maximal de barils de brut pouvant être fournis par jour par chaque fournisseur f :

Brut	$\text{contrat}(f)$ (baril/jour)
Brunei	35.000
Iran	45.000

TABLE 6 – Contrats de livraison

- Quantité de barils provenant des fournisseurs et pris en charge par les transporteurs de la compagnie et les transporteurs indépendants :

$$\text{brut}(f, r) = \text{brutt}(f, r) + \text{brutti}(f, r), \forall f, r \quad (3)$$

$$\text{achat}(f) = \sum_r \text{brut}(f, r), \forall f \quad (4)$$

- La compagnie dispose de six pétroliers, pouvant transporter chacun 270 000 barils de brut :

$$\sum_{f,r} bruttc(f,r) \cdot jour(f,r) \leq nbateaux \cdot capbateau \quad (5)$$

avec :

$nbateaux = 6$, le nombre de pétroliers

$capbateau = 270.000$ barils de brut , la capacité unitaire de chaque pétrolier

$jour(f,r)$, les temps de trajet d'un pétrolier entre les fournisseurs f et les raffineries r , donnés à la table 7.

Temps de trajet	$jour(B,r)$ (jours)	$jour(I,r)$ (jours)
Raffinerie de Sydney	13,5	20
Raffinerie de Tokyo	7	15

TABLE 7 – Temps de trajet d'un pétrolier

- Capacité journalière pour la distillation de brut :

$$\sum_f brut(f,r) \leq capdist(r), \forall r \quad (6)$$

avec :

$capdist(r)$, la capacité journalière pour la distillation de brut dans chacune des deux raffineries r , définie à la table 8.

Traitement	$capdist(s)$ (barils/jour)	$capdist(t)$ (barils/jour)
Distillation de brut	44 000	33 000

TABLE 8 – Capacité journalière pour la distillation de brut

- Le pétrole brut est d'abord soumis à un processus de distillation, qui a pour but de séparer les naphthes (ou essences) légère, moyenne et lourde, les huiles légère et lourde et les résidus :

$$\sum_f brut(f,r) \cdot frac_dist_n(f,r,n) = naphte(r,n), \forall r,n \quad (7)$$

$$\sum_f brut(f,r) \cdot frac_dist_h(f,r,h) = huile(r,n), \forall r,h \quad (8)$$

$$\sum_f brut(f,r) \cdot frac_dist_re(f,r) = residus(r), \forall r \quad (9)$$

Les fonctions $frac_dist_n$, $frac_dist_h$ et $frac_dist_re$ correspondent aux proportions des fractions de naphtes, d'huiles et de résidus dans un baril de brut selon sa provenance, Brunei ou Iran, présentées dans les tables 9, 10 et 11.

Brut	$frac_dist_n(f, r, le)$	$frac_dist_n(f, r, mo)$	$frac_dist_n(f, r, lo)$
Brunei	0,1	0,2	0,2
Iran	0,15	0,25	0,18

TABLE 9 – Fractions de naphtes

Brut	$frac_dist_h(f, r, le)$	$frac_dist_h(f, r, lo)$
Brunei	0,12	0,2
Iran	0,08	0,19

TABLE 10 – Fractions d'huiles

Brut	$frac_dist_re(f, r)$
Brunei	0,13
Iran	0,12

TABLE 11 – Fractions de résidus

- Les naphtes légère, moyenne et lourde peuvent être utilisées directement pour le mélange d'essence normale et super ou elles peuvent passer une étape de reformage, qui permet de produire de l'essence réformée :

$$naphte(r, n) = \sum_e usagenaphte(r, n, e) \quad (10)$$

avec :

Les naphtes légère, moyenne et lourde : $n \in \{le, mo, lo\}$

Les essences normale, super et réformée : $e \in \{en, es, er\}$

- Capacité journalière pour le reformage de naphtes :

$$\sum_n usagenaphte(r, n, er) \leq capref(r), \forall r \quad (11)$$

avec :

Les naphtes légère, moyenne et lourde : $n \in \{le, mo, lo\}$

L'essence réformée : er

$capref(r)$, la capacité journalière pour le reformage de naphtes dans chacune des deux raffineries r , définie à la table 12.

Traitement	$capref(s)$ (barils/jour)	$capref(t)$ (barils/jour)
Reformage de naphtes	16 000	9 000

TABLE 12 – Capacité journalière pour le reformage de naphtes

- L'essence réformée est produite à partir des différentes naphtes selon des proportions bien précises pour servir ensuite au mélange des essences normale et super :

$$\sum_n usagenaphte(r, n, er) \cdot coeffref(r, n) = essreformee(r), \forall r \quad (12)$$

$$essreformee(r) = \sum_{ns} usageessreformee(r, ns), \forall r \quad (13)$$

avec :

Les naphtes légère, moyenne et lourde : $n \in \{le, mo, lo\}$

L'essence réformée : er

Les essences normale et super : $ns \in \{en, es\}$

$coeffref(r, n)$, le coefficient d'essence réformée produite à partir de chaque type de naphtes n dans les deux raffineries r , présenté à la table 13.

Type de naphte	$coeffref(s, n)$	$coeffref(t, n)$
Naphte légère	0,6	0,65
Naphte moyenne	0,52	0,55
Naphte lourde	0,45	0,47

TABLE 13 – Essence réformée par baril de naphte

- Les huiles lourdes et légères peuvent être utilisées directement pour le mélange de kérosène ou mazout ou elles peuvent être soumises à un processus de craquage catalytique pour produire de l'huile de craquage et de l'essence de craquage :

$$huile(r, h) = \sum_{kmc} usagehuile(r, h, kmc), \forall r, h \quad (14)$$

avec :

Les huiles légère et lourde : $h \in \{le, lo\}$

Les quatre usages des huiles légère et lourde $kmc \in \{ke, ma, hc, ec\}$ pour kérosène, mazout, huile de craquage et essence de craquage.

- Capacité journalière pour le craquage d'huiles :

$$\sum_h \sum_{cr} usagehuile(r, h, cr) \leq capcraq(r), \forall r \quad (15)$$

avec :

Les huiles légère et lourde : $h \in \{le, lo\}$

L'huile de craquage et l'essence de craquage : $cr \in \{hc, ec\}$

$capcraq(r)$, la capacité journalière pour le craquage d'huiles dans chacune des deux raffineries r , définie à la table 14.

Traitement	$capcraq(s)$ (barils/jour)	$capcraq(t)$ (barils/jour)
Craquage d'huiles	9 000	5 000

TABLE 14 – Capacité journalière pour le craquage d'huiles

- L'huile et l'essence de craquage sont produites à partir des huiles légère et lourde dans des proportions données. L'essence craquée est ensuite utilisée pour le mélange des essences normale et super, tandis que l'huile craquée intervient dans le mélange de kérosène et de mazout :

$$\sum_h usagehuile(r, h, hc) \cdot coeffhuilecraq(h) = huilecraquee(r), \forall r \quad (16)$$

$$huilecraquee(r) = \sum_{km} usagehuilecraq(r, km), \forall r \quad (17)$$

$$\sum_h usagehuile(r, h, ec) \cdot coeffesscraq(h) = esscraquee(r), \forall r \quad (18)$$

$$esscraquee(r) = \sum_{km} usageesscraquee(r, ns), \forall r \quad (19)$$

avec :

Les huiles légère et lourde : $h \in \{le, lo\}$

L'huile de craquage : hc

Les deux usages de l'huile de craquage $km \in \{ke, ma\}$ pour kérosène et mazout

L'essence de craquage : ec

Les essences normale et super : $ns \in \{en, es\}$

$coeffhuilecraq(h)$ et $coeffesscraq(h)$, les coefficients d'huile et d'essence craquées produites à partir de chaque type d'huiles h dans les deux raffineries r , présentés à la table 16.

Type d'huile	$coeffhuilecraq(h)$	$coeffesscraq(h)$
Huile légère	0,68	0,28
Huile lourde	0,75	0,2

TABLE 15 – Essence et huile craquées par baril d'huile

- Les résidus sont utilisés pour le mélange de kérosène et de mazout et permettent également d'obtenir de l'huile de graissage :

$$residus(r) = \sum_{kmg} usageresidus(r, kmg), \forall r \quad (20)$$

avec :

Les trois usages des résidus $kmg \in \{ke, ma, gr\}$ pour kérosène, mazout et huile de graissage.

- Les essences moteurs, obtenues par le mélange des naphtes, des essences réformées et des essences craquées, doivent présenter un indice d'octane minimum :

$$84 \cdot produit(r, en) \leq \left(\sum_n usagenaphte(r, n, en) \cdot octane(n) \right) + (usageessreformee(r, en) \cdot octane(er)) + (usageesscraquee(r, en) \cdot octane(ec)), \forall r \quad (21)$$

$$94 \cdot produit(r, es) \leq \left(\sum_n usagenaphte(r, n, es) \cdot octane(n) \right) + (usageessreformee(r, es) \cdot octane(er)) + (usageesscraquee(r, es) \cdot octane(ec)), \forall r \quad (22)$$

avec :

$$produit(r, en) = \sum_n usagenaphte(r, n, en) + usageessreformee(r, en) + usageesscraquee(r, en), \forall r \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{produit}(r, es) = & \sum_n \text{usagenaphte}(r, n, es) + \text{usageessreformee}(r, es) \\ & + \text{usageesscraquee}(r, es), \forall r \end{aligned} \quad (24)$$

Les naphtes légère, moyenne et lourde : $n \in \{le, mo, lo\}$

L'essence normale : en

L'essence super : es

L'essence réformée : er

L'essence craquée : ec

La fonction *Octane* représente l'indice d'octane des différents composants :

	$octane(le)$	$octane(mo)$	$octane(lo)$	$octane(er)$	$octane(ec)$
Indice d'octane	90	80	70	115	105

TABLE 16 – Indice d'octane des composants

- Le rapport minimum entre les productions d'essence super et d'essence normale doit être de 40 % :

$$\text{produit}(r, es) \geq 0,4 \cdot \text{produit}(r, en), \forall r \quad (25)$$

- La pression de vapeur du kérosène ne doit pas excéder 1 kilogramme par centimètre carré :

$$\begin{aligned} & \left(\sum_h \text{usagehuile}(r, h, ke) \cdot \text{pression}(h) \right) + \left(\text{usagehuilecraq}(r, ke) \cdot \text{pression}(hc) \right) \\ & + \left(\text{usageresidus}(r, ke) \cdot \text{pression}(residus) \right) \leq \text{produit}(r, ke) \cdot 1 \end{aligned} \quad (26)$$

avec :

$$\begin{aligned} \text{produit}(r, ke) = & \sum_h \text{usagehuile}(r, h, ke) + \text{usagehuilecraq}(r, ke) \\ & + \text{usageresidus}(r, ke), \forall r \end{aligned} \quad (27)$$

La fonction *pression* représente la pression de vapeur des différents composants :

	$pression(le)$	$pression(lo)$	$pression(hc)$	$pression(residus)$
Pression de vapeur	1,0	0,6	1,5	0,05

TABLE 17 – Pression de vapeur des composants

- Pour la production de mazout, l'huile légère, l'huile craquée, l'huile lourde et les résidus doivent être mélangés selon le ratio 10 :4 :3 :1.

$$usagehuile(r, le, ma) = 10 \cdot usageresidus(r, ma), \forall r \quad (28)$$

$$usagehuile(r, lo, ma) = 3 \cdot usageresidus(r, ma), \forall r \quad (29)$$

$$usagehuilecraq(r, ma) = 4 \cdot usageresidus(r, ma), \forall r \quad (30)$$

- Fabrication des produits :

- Essences moteurs :

$$produit(r, en) = \sum_n usage_naphte(r, n, en) + usageessreformee(r, en) + usageesscraquee(r, en), \forall r \quad (31)$$

$$produit(r, es) = \sum_n usage_naphte(r, n, es) + usageessreformee(r, es) + usageesscraquee(r, es), \forall r \quad (32)$$

- Kérosène :

$$produit(r, ke) = \sum_h usagehuile(r, h, ke) + usagehuilecraq(r, ke) + usageresidus(r, ke), \forall r \quad (33)$$

- Mazout :

$$produit(r, ma) = \sum_h usagehuile(r, h, ma) + usagehuilecraq(r, ma) + usageresidus(r, ma), \forall r \quad (34)$$

- Huile de graissage :

Un baril de résidus donne 0,5 baril d'huile de graissage.

$$produit(r, gr) = 0,5 \cdot usageresidus(r, gr), \forall r \quad (35)$$

- Transport des produits pétroliers vers les clients :

La quantité obtenue pour chaque produit pétrolier doit être égale à la somme des quantités de produits transportés vers les clients.

$$produit(r, p) = \sum_c transport(r, p, c), \forall r, p \quad (36)$$

avec :

Les produits pétroliers $p \in \{en, es, ke, ma, gr\}$ pour essence normale, essence super, kérosène, mazout et huile de graissage.

Les clients $c \in \{a, m, p, nz, j\}$ pour Australie, Malaisie, Philippines, Nouvelle-Zélande et Japon.

Étant donné que la demande locale en Australie et au Japon sera satisfaite par la raffinerie du pays, les quantités de produits transportés de Sydney au Japon et de Tokyo en Australie seront nulles.

$$transport(s, p, j) = 0, \forall p \quad (37)$$

$$transport(t, p, a) = 0, \forall p \quad (38)$$

- Satisfaction de la demande des clients :

$$\sum_r transport(r, p, c) \geq demande(p, c), \forall p, c \quad (39)$$

La fonction *demande* représente la demande des différents produits pour chaque client et s'exprime en barils/jour dans le tableau suivant :

Produit	$demande(p, a)$	$demande(p, j)$	$demande(p, m)$	$demande(p, p)$	$demande(p, nz)$
Essences	2 500	1 100	1 300	1 000	1 200
Kérosène	2 300	1 400	1 250	750	1 000
Mazout	3 000	1 850	1 500	1 000	1 250
Graisse	175	125	150	150	150

TABLE 18 – Demande des clients

3 Algorithme de résolution

Pour résoudre le problème d'optimisation formulé dans la section précédente, nous allons utiliser l'algorithme du simplexe qui permet de résoudre des problèmes d'optimisation linéaire. En pratique, nous allons nous servir du solveur Excel pour encoder l'objectif à minimiser, dans notre cas ce sont les coûts, les variables à compléter par le solveur ainsi que les contraintes à respecter.

Une partie des contraintes sont encodées sous forme de formules directement dans les cellules d'Excel, notamment pour la production des différentes fractions du brut ainsi que la production des produits pétroliers. L'algorithme permettra de déterminer la quantité de brut achetée aux deux producteurs, les proportions de naphthes, huiles et résidus utilisées pour les produits finaux et finalement, les quantités de produits transportés vers les différents clients.

Les quantités de brut achetées à chacun des producteurs pour les deux raffineries sont présentées dans le tableau suivant :

	$brut(B, r)$ (barils/jour)	$brut(I, r)$ (barils/jour)
vers Sydney	13.888,89	0
vers Tokyo	21.111,11	7.222,22
achat(f)	35.000	7.222,22

TABLE 19 – Quantités de brut

Ces bruts sont ensuite transportés par les pétroliers de la compagnie étant donné que la quantité n'excède pas la capacité totale :

	Brunei	Iran
$brutt_c(f, s)$	13.888,89	0
$brutt_i(f, s)$	0	0
$brutt_c(f, t)$	21.111,11	7.222,22
$brutt_i(f, t)$	0	0

TABLE 20 – Transport du brut des fournisseurs aux raffineries

Les naphthes ainsi que les essences réformée et craquée sont utilisées pour la production d'essence normale, d'essence super et d'essence réformée dans les proportions présentées ci-dessous pour chacune des raffineries.

Utilisation	Essence normale	Essence super	Essence réformée
<i>usagenaphte(s, le, e)</i>	408,89	980,00	0
<i>usagenaphte(s, mo, e)</i>	0	0	2.777,78
<i>usagenaphte(s, lo, e)</i>	0	0	2.777,78
<i>usageessreformee(s, ns)</i>	2.507,78	186,67	-
<i>usageesscraquee(s, ns)</i>	0	0	-
<i>usagenaphte(t, le, e)</i>	3.194,44	0	0
<i>usagenaphte(t, mo, e)</i>	0	2.550	3.477,78
<i>usagenaphte(t, lo, e)</i>	0	0	5.522,22
<i>usageessreformee(t, ns)</i>	2.926,56	1.581,66	-
<i>usageesscraquee(t, ns)</i>	0	225,93	-

TABLE 21 – Utilisations des naphtes, essences réformées et essences craquées

Le tableau suivant présente les quantités d’huiles légère, lourde et craquée utilisées pour la production de kérosène, de mazout, d’huile craquée et d’essence craquée à Sydney et à Tokyo.

Utilisation	Kérozène	Mazout	Essence craquée	Huile craquée
<i>usagehuile(s, le, kmc)</i>	0	1.666,67	0	0
<i>usagehuile(s, lo, kmc)</i>	1.388,89	500	0	888,89
<i>usagehuilecraq(s, km)</i>	0	666,67	-	-
<i>usagehuile(t, le, kmc)</i>	0	3.111,11	0	0
<i>usagehuile(t, lo, kmc)</i>	1.872,22	933,33	1.129,63	1.659,26
<i>usagehuilecraq(t, km)</i>	0	1.244,44	-	-

TABLE 22 – Utilisations des huiles légères, lourdes et craquées

Les résidus sont utilisés pour la production de kérosène, de mazout et d’huile de graissage dans les quantités suivantes :

Utilisation	Kérozène	Mazout	Huile de graissage
<i>usageresidus(s, kmg)</i>	1.288,89	166,67	350
<i>usageresidus(t, kmg)</i>	2.150	311,11	1.150

TABLE 23 – Utilisations des résidus

Le tableau 24 présente finalement les quantités de produits pétroliers transportées vers chaque client.

Transport	Australie	Japon	Malaisie	Philippines	Nouvelle-Zélande
$transport(s, ns, c)$	2.500	0	0	1000	583,33
$transport(s, ke, c)$	2.300	0	0	0	377,78
$transport(s, ma, c)$	3.000	0	0	0	0
$transport(s, gr, c)$	175	0	0	0	0
$transport(t, ns, c)$	0	8.561,93	1300	0	616,67
$transport(t, ke, c)$	0	1.400	1250	750	622,22
$transport(t, ma, c)$	0	1.850	1500	1000	1.250
$transport(t, gr, c)$	0	125	150	150	150

TABLE 24 – Transport des produits finis

La solution optimale pour le coût total ainsi que les quatre parties de l'objectif valent :

Objectif	Montant (\$)
Coûts d'achat	3.220.694,44
Coûts de raffinage	721.888,89
Coûts de transport des bruts	61.444,44
Coûts de transport des produits	10.336,11
Coût total z	4.014.363,89

TABLE 25 – Prix des bruts

4 Analyse post-optimale

Dans cette partie, nous allons nous servir de la solution optimale obtenue au point précédent et du rapport de sensibilité fourni par Excel pour répondre aux questions subsidiaires ci-dessous.

1. A-t-on intérêt à augmenter le montant des contrats avec Brunei et avec l'Iran ?

Pour répondre à cette question, nous allons nous baser sur les prix cachés des contraintes sur les quantités maximales de brut fourni par les deux producteurs. En augmentant le montant du contrat avec Brunei de 1 baril/jour, le coût diminuerait de 3\$. Par contre, une augmentation du montant du contrat avec l'Iran n'aurait aucun effet sur le coût. Les prix cachés correspondants à ces contraintes sont surlignés en jaune à la Figure 4.

\$B\$4	Bruts totaux Brut de Brunei	35000	-3	35000	4408,106349	9333,333333
\$C\$4	Bruts totaux Brut d'Iran	7222,222222	0	45000	1E+30	37777,77778

FIGURE 4 – Contraintes sur les montants des contrats

2. Au vu de la solution actuelle, quels sont les produits dont il faudrait promouvoir ou réduire la demande en Australie pour diminuer le coût total de production à Sydney ?

Nous allons analyser les prix cachés des contraintes reprenant la demande des produits pétroliers en Australie. La demande en essences peut être augmentée au maximum de la marge supérieure, c'est-à-dire de 583,33 barils/jour, sans avoir d'effet sur le coût tout en restant dans le domaine admissible. Une augmentation des demandes en kérosène et en huile de graissage de 1 baril/jour entraînerait une légère augmentation de coût de 0,5\$ pour le kérosène et de 1\$ pour l'huile de graissage. Il n'est donc pas conseillé d'augmenter la demande en kérosène et en graisse. Finalement, une diminution de la demande en mazout de 1 baril/jour permettrait de diminuer le coût de 481,21\$ donc il serait intéressant de diminuer la demande en mazout. Les prix cachés des quatre contraintes sont repris en jaune à la Figure 5.

\$G\$108	Essences vers Sydney	2500	0	2500	583,3333333	616,6666667
\$G\$109	Kérosène vers Sydney	2300	0,5	2300	377,7777778	622,2222222
\$G\$110	Mazout vers Sydney	3000	481,2083333	3000	453,0612245	374,3119266
\$G\$111	Grai vers Sydney	175	1	175	188,8888889	175

FIGURE 5 – Contraintes sur la demande des produits en Australie

3. Le service marketing en Nouvelle-Zélande prévoit une expansion du marché des débouchés de la compagnie en Nouvelle-Zélande. Aussi il suggère de profiter de l'opportunité d'acheter deux concurrents sur le marché local de la distribution de sorte que les ventes pourraient augmenter de 30 % si on acquière le premier et de 20 % supplémentaires si on acquière le second, de 50 % si on acquière les deux. Est-ce qu'au vu des capacités de production existantes cet achat est justifié ? Quel est le prix maximum que l'on est prêt à payer pour investir dans d'éventuelles nouvelles capacités de raffinage ?

La Figure 6 présente les capacités de raffinage utilisées ainsi que les capacités maximales dans chacune des raffineries. La raffinerie de Sydney, la plus proche de la Nouvelle-Zélande, dispose d'une grande capacité de raffinage non utilisée, ce qui permettrait de satisfaire l'augmentation des ventes lors de l'achat des deux concurrents. Les prix cachés des contraintes de capacités de production sont nuls, ce qui signifie qu'il n'y a aucun intérêt à investir dans de nouvelles capacités de raffinage et cela est d'ailleurs inutile étant donné la capacité de production encore disponible dans la raffinerie de Sydney.

\$D\$2	vers Sydney Total	13888,88889	0	44000	1E+30	30111,11111
\$D\$24	Total pour er donne en en	5555,555556	0	16000	1E+30	10444,44444
\$D\$3	vers Tokyo Total	28333,33333	0	33000	1E+30	4666,666667

FIGURE 6 – Contraintes sur les capacités de raffinage

4. Dans le plan d'exploitation actuel, a-t-on intérêt à investir dans un nouveau pétrolier pour le transport du brut ?

La solution actuelle donne une quantité de 443.611,11 barils de brut à transporter et les six pétroliers de la compagnie suffisent étant donné qu'ils présentent une capacité totale maximale de 1.620.000 barils de brut. Cette contrainte est reprise à la Figure 7.

Contraintes						
Cellule	Nom	Finale Valeur	Valeur Marginale	Contrainte à droite	Marge Supérieure	Marge Inférieure
\$B\$128	Qté transportée tc Brut de Brunei	443611,1111	0	1620000	1E+30	1176388,889

FIGURE 7 – Contraintes sur la capacité des pétroliers

5 Conclusion

L'objectif de ce travail de fin d'études était d'établir le plan optimal d'achat et de transport des bruts, le plan optimal d'exploitation des raffineries et de mise à disposition des produits finaux. Après avoir résolu le problème d'optimisation formulé précédemment, une série de recommandations peuvent être adressées à la compagnie pétrolière.

La solution obtenue avec le solveur Excel est une des solutions optimales possibles pour ce problème, que la compagnie devrait suivre afin de minimiser ses coûts.

Concernant le montant des contrats avec Brunei et avec l'Iran, il est conseillé à la compagnie d'augmenter le montant du contrat avec Brunei, ce qui permettra de diminuer les coûts, et de ne pas modifier le montant du contrat avec l'Iran.

La compagnie pourrait satisfaire une demande en essences plus importante en Australie sans augmenter ses coûts mais à l'inverse, il n'est pas conseillé d'augmenter la demande d'Australie en kérosène, graisse et particulièrement en mazout car cela augmenterait le coût total de production.

Au vu de la capacité de production non utilisée dans la raffinerie de Sydney, l'achat des deux concurrents en Nouvelle-Zélande est justifié et il n'est pas utile d'investir dans de nouvelles capacités de raffinage.

Finalement, il n'est pas nécessaire d'investir dans un nouveau pétrolier étant donné que la quantité de barils de brut transportée n'excède pas la capacité maximale des pétroliers à disposition et que les transporteurs indépendants n'ont pas été sollicités.

Bibliographie

- [1] Daniel DE WOLF. Syllabus de production, November 2022. URL https://www.student-corner.be/pluginfile.php/1222984/mod_resource/content/6/Syllabus-PROD-HD.pdf.
- [2] Daniel DE WOLF. Gestion d'un groupe de raffineries Enoncé du mémoire, October 2022.

