

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. M. OULHADJ - Bouira
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par :

AHMANACHE Mourad

BOUDJAOUI Amar

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie chimique

**Optimisation des paramètres opératoires
de débutaniseur C102 du champ gazier de
Sonatrach-Hassi R'Mel via les plans
d'expériences et le Simulateur HYSYS**

Soutenu le : 30 /01/ 2020

Devant le jury composé de :

Mr. LOUNICI Hakim	Professeur	UAMO, Bouira	Président
Mr. AOUDJIT Farid	MCB	UAMO, Bouira	Examineur
Mme HAMMACHE Fadila	MCB	UAMO, Bouira	Examinatrice
Mme ZIANI Salima	MCA	UAMO, Bouira	Rapporteur
Mr. HAMDANI Khathir	ING-XP	MPP4 , HRM	Co- Rapporteur

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné l'envie, le Courage et la force pour réintégrer les études et mener à terme ce travail, qui a été réalisé au sein de l'usine de traitement de gaz naturel MPP4 - Direction Régionale SONATRACH Hassi R'mel, wilaya de LAGHOUAT.

Au terme de ce travail, nous exprimons :

Toutes nos reconnaissances à notre encadreur Mme S. Ziani et co-encadreur Mr K.Hamdani .

Nos respectueux remerciements aux membres de jury : Mr H. Lounici, Mme F. Hammache et Mr F.Aoudjit, qui nous ont fait l'honneur de participer à l'évaluation de ce modeste travail ;

Un grand merci aussi à tout le personnel du Module IV de l'unité Hassi R'mel. Nous avons eu beaucoup de plaisir à travailler avec chacun d'eux et leur exprimons toute notre gratitude pour l'aide et le respect qu'ils nous ont témoignés ;

Une attention toute particulière aux membres du Département de Génie des Procédés, qui nous ont donnés l'occasion de poursuivre nos études.

Merci à tous

Dédicaces

Mes dédicaces vont à :

Mon père ;

Ma mère ;

Ma chère épouse ;

Mes enfants ;

Mes frères et sœurs et mes neveux chacun à son nom ;

Ma belle famille ;

Tous mes amis (es).

AMAR

Dédicaces

Mon premier remerciement s'adresse à Allah qui m'a donné la force et les moyens pour préparer ce travail ;

A Mes chers parents, que Dieu me les préserve ;

A ma chère femme, mes enfants ; Yousef, Anas et Anaïs ;

A mes frères et sœurs et mes chers petits neveux ;

A la mémoire de mon grand-père paternel que Dieu le tout puissant l'accueille dans son vaste paradis.

A ma grande mère paternelle et mes grand-pères maternels.

A mes amis, tous mes Cousins et toutes les personnes qui me connaissent.

Mourad

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : Présentation du complexe gazier de Hassi R'Mel et description du module de traitement de gaz

I-1. Complexe gazier de Hassi R'Mel.....	3
I-1.2. Installations gazières de Hassi R'Mel.....	3
I-1.2.1. Modules de traitement.....	3
I-1.2.2. Stations Boosting (Stations de compression).....	3
I-1.2.3. Stations de réinjection de gaz	4
I-1.2.4. Centre de Dispatching (CNDG).....	4
I-1.2.5. Centre de Stockage et de Transfert par Facilité « CSTF ».....	4
I-2. Description du module de traitement IV.....	5
I-2.1 Section de séparation à haute pression.....	5
I-2.2 Section à basse pression.....	6
I-2.3. Unité de glycol.....	9
I-3. Unité des utilités.....	9

CHAPITRE II : Gaz Naturel et produits de traitement

II-1. Gaz naturel.....	10
II-1.1. Différents types de gaz naturel.....	10
II-1.2. Réserves de gaz naturel	11
II-1.3. Production mondiale du gaz naturel.....	11
II-2. Produits de traitement	12
II-2.1.GPL.....	12
II-2.1.1. Caractéristiques des GPL.....	12
II-2.1.2. Domaines d'utilisation du GPL.....	13

II-2.1.3. GPL en Algérie.....	14
II-2.2. Condensat.....	15
II-2.2.1.Caractéristiques du condensat.....	15
II-2.2.2. Domaine d'utilisation du condensat.....	15
II-2.2.3.Condensat en Algérie.....	16

CHAPITRE III : Simulation et optimisation par le simulateur HYSYS et les plans d'expériences

III-1. Simulation.....	17
III-1.1. Description du simulateur HYSYS	17
III-1.2. Environnement de simulation.....	18
III-2. Plans d'expériences.....	18
III-2.1. Types des plans d'expériences.....	19
III-2.1.1. Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k)	20
III-2.1.2. Plans composites centrés.....	21
III-2.2. Tests de signification et validation des modèles : Analyse statistique.....	24
III-2.2.1. Vérification de la signification des coefficients	24
III-2.2.2. Validation de l'équation de régression	25
III-2.2.3. Coefficient de détermination.....	26
III-2.2.4. Analyse des résidus.....	26

CHAPITRE IV : ETUDE PRATIQUE DU DEBUTANISEUR

Partie 1 : Simulation du fonctionnement du débutaniseur C102

Par le simulateur HYSYS

IV-1.1. Objectifs de la simulation.....	27
IV-1.2. Etude des paramètres opératoires de la section de stabilisation.....	27
IV-1.3. Simulation du cas design de la section du débutaniseur.....	27
IV-1.3.1. Procédure de la simulation.....	28
IV-1.3.2. Paramètres de fonctionnement et composition de la charge.....	29

IV-1.3.3. Comparaison entre le cas design et le cas design simulé.....	32
IV-1.4. Simulation du cas actuel de la section du débutaniseur.....	34
IV-1.4.1. Caractéristiques de la charge.....	34
IV-1.4.1.1. Vérification des paramètres actuels du débutaniseur.....	34
IV-1.4.1.2. Etudes comparatives entre le cas actuel et le cas actuel simulé.....	35
IV-1.4.2. Répartitions des températures du cas actuel dans la colonne	37
IV-1.5. Effet de la variation de la température du fond de la colonne sur la qualité des produits finis.....	37
IV-1.5.1. Influence de la température du fond de la colonne sur la teneur en C5 ⁺	38
IV-1.5.2. Influence de la température du fond de la colonne sur la TVR	39
IV-1.5.3. Influence de la température du fond de la colonne sur le débit du condensat produit.....	39
IV-1.5.4. Influence de la température du fond de la colonne sur la consommation énergétique du condenseur E108.....	40
IV-1.5.5. Influence de la température du fond de la colonne sur la consommation énergétique du rebouilleur.....	41
IV-1.6. Effet de la variation du débit de reflux froid sur la qualité des produits finis.....	42
IV -1.6.1. Influence du débit de reflux froid sur la teneur en C5 ⁺ dans le GPL.....	42
IV -1.6.2. Influence du débit de reflux froid sur la TVR du condensat.....	42
IV -1.6.3. Influence du débit de reflux froid sur le débit de Condensat.....	43
IV-1.6.4. Influence du débit de reflux froid sur la consommation énergétique du condenseur	44
IV -1.6.5. Influence du débit de reflux sur la consommation énergétique du rebouilleur	44

Partie 2 : Etude du débutaniseur C102 par la méthodologie des plans d'expériences

VI-2.1. Objectif de la méthodologie des plans d'expériences.....	45
VI-2.2. Modélisation des paramètres du débutaniseur C201 par le plan composite centré.....	45
IV-2. 2.1. Elaboration du modèle de second degré.....	45
IV-2.2.2.calcul des coefficients du modèle.....	46
IV-2.2.3. Analyse statistique de l'équation de régression.....	47

IV-2.2.3.1. Vérification de la signification des coefficients	47
IV-2.2.3.2. Test de validation de l'équation de régression.....	49
IV-2.2.4. Evaluation de la qualité du modèle.....	50
IV-2.2.4.1. Coefficient de détermination R^2	50
IV-2.2.4.2. Comparaison entre les réponses prédites et les réponses expérimentales.....	50
IV-2.2.4.3. Evaluation par les points au centre.....	52
IV-2.2.4.4. Analyse des résidus.....	52
IV-2.2.5. Exploitation du modèle de second degré.....	53
VI-2.3. Optimisation des paramètres du débutaneur C201.....	54
IV-2.4. Résultats de simulation après optimisation.....	57
IV-2.4.1. Comparaison entre le cas actuel et le cas actuel optimisé.....	57
IV-2.5. Profils des paramètres opératoires le long de la colonne.....	58
IV-2.5.1. Profil des débits liquide vapeur.....	58
IV-2.5.2. Profil des pressions.....	59
IV-2.5.3. Profil des températures.....	59

Partie 3 : Évaluation économique de l'optimisation proposée

IV-3.1. Objectifs de l'évaluation économique.....	61
IV-3.2. Quantité de gaz économisée au niveau du four H102.....	61
IV-3. 3. Evaluation économique de l'optimisation réalisée au niveau du four H102.....	61
IV-3.3.1. Évaluation du gain.....	61
IV-3.3.2. Calcul de l'énergie économisée.....	62
IV-3.3.3. Estimation de l'économie réalisée en Dollars et en DA.....	62
IV-3.4. Quantité d'énergie économisée au niveau du condenseur E108	63
IV-3.5. Evaluation économique de l'optimisation réalisée au niveau du condenseur E108.....	63
IV-3.5.1. Evaluation du gain.....	63
Conclusion générale.....	65

Annexes

TP plans d'expériences

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, l'industrie gazière aborde le nouveau millénaire dans un contexte de restructuration de la scène énergétique dans son ensemble. Sous l'impulsion de nouvelles opportunités technologiques et commerciales, cette industrie se repositionne et entame une nouvelle phase de croissance et fait émerger une nouvelle économie du gaz. En effet, les stratégies des intervenants, la globalisation, les fusions, les alliances, se sont toutes combinées pour donner au gaz le dynamisme nécessaire à la matérialisation des espoirs qu'il nourrit pour obtenir l'énergie du 21^{ème} siècle. Ainsi, au cours des dix années écoulées, des hausses majeures à travers le monde ont fortement influencé la croissance de la demande du gaz naturel. Cet intérêt vient du fait que celui-ci est choisi pour sa souplesse d'utilisation, sa propreté et enfin l'abondance relative des ressources.

Dans ce contexte, l'Algérie compte parmi les plus grands pays producteurs du gaz naturel. Elle s'attelle depuis plusieurs années à une gestion rationnelle, optimale et efficace de ses réserves d'hydrocarbures, par le développement d'une stratégie de valorisation de ces ressources. Ainsi, le champ de Hassi R'Mel, de par son importance, constitue un des éléments-clés de la mise en œuvre de cette stratégie. Au fait, cinq modules de traitement du gaz naturel ont vu le jour dans cette région. Ces modules qui font appel à différents procédés de génie chimique (séparation, transfert de chaleur, de matière... etc.) et des équipements industriels très variés et coûteux, permettent ; non seulement ; d'effectuer une séparation entre le gaz et les hydrocarbures lourds, mais aussi d'éliminer l'eau présente dans le gaz brut, en vue de produire du condensat, du GPL et du gaz sec conformes à certaines spécifications. Celles-ci doivent être respectées dans le but de faciliter le transport et le stockage, d'une part, et la commercialisation de ces produits en tant que produits finis ou semi- finis d'autre part.

Le champ de Hassi R'Mel, dirigé par l'Entreprise Nationale des Hydrocarbures ; Sonatrach enregistre, comme tout site gazier, une diminution remarquable de la richesse engendrée par le changement graduel et significatif de la composition de la charge récupérée, qui devient plus légère suite à la chute de pression au fur et à mesure que les stations de traitement fonctionnent. Ce problème se répercute par la suite sur les différentes installations de traitement de gaz, du moment qu'il induit des changements perpétuels dans leurs conditions de fonctionnement. Ainsi, pour palier ce phénomène qui peut coûter aussi cher à l'économie Algérienne (en matière de récupération et de matériels), Sonatrach a pris en charge cette tâche et utilise son potentiel technique capitalisé au fil des années, pour améliorer sans cesse les techniques de production en se dotant des techniques les plus récentes et

complexes qui évoluent constamment (stations de Boosting).

Intéressés par ce problème qui ne cesse d'inquiéter Sonatrach, nous avons proposé d'étudier la baisse de débits d'alimentation enregistrée dans la section de fractionnement (débutaniseur C102) du module IV du complexe gazier de Hassi R'Mel suite à la diminution de la pression et de la richesse du gisement. Pour cela, nous nous sommes fixés pour objectif d'optimiser les paramètres de fonctionnement de la colonne de débutaniseur C102 en utilisant les plans d'expériences et le simulateur HYSYS afin de pouvoir proposer des solutions alternatives. Ainsi, en se basant sur ces objectifs tracés, nous avons, en effet, structuré l'ensemble de notre travail en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du complexe gazier Hassi R'Mel d'une manière générale et à la description du module IV de traitement de gaz où nous avons effectué notre stage.

Les chapitres II et III rassemblent des notions sur le gaz naturel, les produits de traitement finis (GPL, condensat), le simulateur HYSYS et les plans d'expériences.

Le chapitre IV est subdivisé en trois volets. Le premier volet illustre les résultats de l'étude menée sur le débutaniseur C102 par le simulateur HYSYS, tandis que le deuxième présente les résultats obtenus lors de la modélisation et de l'optimisation, par les plans d'expériences, des conditions opératoires du débutaniseur. Le troisième, quant à lui, met le point sur l'évaluation économique de l'optimisation soutirée de l'étude de planification.

En conclusion, nous ferons le bilan des acquis de ce travail et nous évoquerons quelques recommandations et perspectives d'avenir destinées à régler le problème de baisse de débits d'alimentation dans les sites pétrolier.

Chapitre I :

Présentation du complexe gazier de Hassi R'Mel et description du module de traitement de gaz

Chapitre I : Présentation du complexe gazier de Hassi R'Mel et description du module de traitement de gaz

I-1. Complexe gazier de Hassi R'Mel

L'industrie pétrolière peut être considérée comme le seul pilier pouvant supporter l'économie et le développement de notre pays qui possède d'importantes réserves en pétrole et en gaz naturel, localisées spécifiquement dans le Sahara Algérien et exploitées méticuleusement par plusieurs entreprises nationale (Sonatrach) et internationale (en partenariat avec Sonatrach) : gisements de Hassi R'Mel et Hassi Messaoud ; Sonatrach, gisement de Hassi Berkine ; Américaine ANADARKO, gisement de Ain Salah et Ain Amenas ; British Petroleum et la Norvégienne STATOIL, gisement de Adrar et Timimoun ; Française TOTAL, gisement Ourhoud ; Australienne BHP.

Le gisement de Hassi R'Mel, situé à 550 km au sud de la capitale Alger et à 130 km au sud de la wilaya de Laghouat, représente l'un des plus grands gisements de gaz à l'échelle mondiale. Il a une forme d'ellipse et s'étale sur plus de 3500 km² ; 70 km du Nord au Sud et 50 km d'Est en Ouest. Il se situe à une profondeur de 2200 m et a une capacité de gisement de l'ordre de 3000 milliards de mètres cubes récupérables. Il est exploité par l'Entreprise Nationale des Hydrocarbures, Sonatrach et est doté d'installations gazières puissantes de hautes performances [1].

I-1.2. Installations gazières de Hassi R'Mel

Le plan d'ensemble des installations gazières implantées sur le champ de Hassi R'Mel est élaboré de façon à avoir une exploitation rationnelle du gisement et pouvoir récupérer le maximum de liquide. Ces installations illustrées sur la Figure I-1 se présentent comme suit [1] :

I-1.2.1. Modules de traitement

Les modules de traitement où Modul Plant Process, (MPP) représentent un ensemble d'installations qui permettent de récupérer les hydrocarbures lourds des gaz bruts à partir de nombreux puits. Un MPP se compose de trois chaînes de traitement. Chacune d'elles comporte les mêmes appareillages de même capacité de traitement (ANNEXE A) [2].

I-1.2.2. Stations Boosting (Stations de compression)

La pression d'entrée du gaz brut aux modules (MPP) décroît avec le temps, ce qui influe sur la quantité et la qualité des produits et sur l'usine. De ce fait, les stations Boosting ont pour but la compression de ces gaz bruts issus des puits producteurs de 100 bars à 120

bars afin d'avoir une détente importante. Les modules II et III ont leurs propres stations Boosting, les autres modules 0, I et IV ont un Boosting commun (Figure I-1) [3].

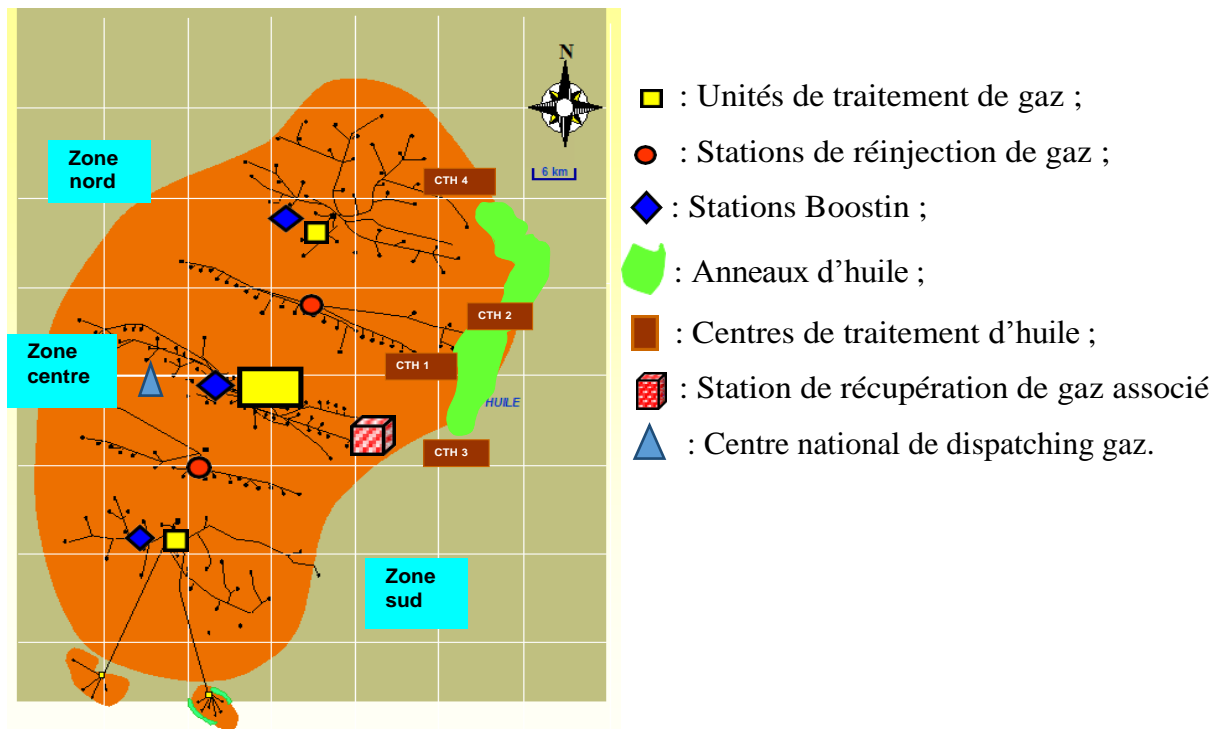


Figure I-1 : Installations gazières de Hassi R'Mel [1]

I-1.2.3. Stations de réinjection de gaz

Son but est de réinjecter le gaz sec au niveau du gisement pour le maintien de pression afin de récupérer le maximum de liquides (GPL et condensât). Les stations de compression Nord et Sud ont pour objectif de réguler la pression gaz au niveau national. La capacité de réinjection de chaque unité est de 90 millions Sm^3/j [2].

I-1.2.4. Centre de Dispatching (CNDG)

Son rôle est la collecte de toutes les quantités de gaz produites au niveau de Hassi R'Mel et de l'extrême sud via les gazoducs. Ces quantités sont ensuite distribuées vers les centres de consommation, comme les centres « GNL » Skikda et Arzew, SONEGAS, et à l'étranger : Italie via la Tunisie (GR1, GR2), Espagne via le Maroc (GME) [2].

I-1.2.5. Centre de Stockage et de Transfert par Facilité « CSTF »

Le condensât et le GPL, produits par tous les modules, sont acheminés vers le CSTF qui se trouve dans le secteur centre de Hassi R'Mel. A ce niveau-là, ils sont débarrassés des éventuelles quantités d'eau résiduelles et comptabilisés avant d'être expédiés vers Arzew. Le CSTF comprend des bacs de 35000 m^3 et de 45000 m^3 pour le stockage du condensât et des sphères de 7000 m^3 pour le stockage du GPL. Les vapeurs formées dans les sphères, sous

l'effet de la température ambiante sont comprimées par des turbocompresseurs, condensées puis remises dans le stockage pour éviter le boil-off et le torchage du GPL [2].

Il est à noter que c'est à partir des salles de contrôle, gérées par un système de control distribuée, que sont données toutes les instructions aux opérateurs sur site en se basant sur les indications des instruments et des diagrammes d'enregistrement.

I-2. Description du module de traitement IV

L'unité de traitement de gaz, Module IV, est constituée essentiellement de trois trains (chaines de traitement) identiques, d'une capacité de production de 20 Msm³ / jour de gaz chacun. Chaque train comporte deux sections : section de séparation à haute pression et section de stabilisation et fractionnement [1, 2].

I-2.1 Section de séparation à haute pression

Le gaz brut en écoulement à partir des puits, va alimenter le manifold du module à travers cinq collecteurs de gaz, qui sont désignés par : E7, E2, E3, W6 et W8. Après il va alimenter la station boosting pour augmenter la pression jusqu'à 104 Kg/cm². Ce dernier est la charge des trois trains identiques du module à $P = 104 \text{ Kg/cm}^2$ et $T = 48^\circ\text{C}$. Le gaz brut disponible au niveau du train, est refroidi par une batterie d'aéroréfrigérants (E101 A-k) jusqu'à $T = 30^\circ\text{C}$. Cette diminution de température associée à une haute pression, assurent la première étape de déshydratation du gaz et la séparation des hydrocarbures légers (gaz) et les hydrocarbures lourds (liquides) dans le séparateur de haute pression (D101A-B) (Figure I-2). Le gaz sortant en tête du séparateur (D101A-B), passe à travers une batterie d'échangeurs gaz/gaz (E 102 A-F) et (E103 A-B) disposé en parallèle , tandis que le gaz sortant des échangeurs aux conditions (-6°C , 115 Kg/cm²) passe à travers une vanne de détente Joul-Thomson (PRC 108), pour subir un abaissement de pression de l'ordre de 100 kg/cm², ce qui a pour effet une diminution de température de l'ordre de -12°C . La détente Joul-Thomson, appelée détente isenthalpique, assure la pression de service de la machine de détente Turbo Exponder. L'ensemble des deux détentes constitue le Procédé Hudson [2].

Le mélange de phases obtenu aux conditions de la vanne de détente Joul-Thomson passe dans un séparateur haute pression (D102 A-B). Par différence de densité, une phase liquide constituée d'hydrocarbures liquides et d'une solution de Glycol hydraté est alors séparée de la phase gazeuse au D102 A-B qui, par la suite, passe dans une machine de détente isentropique appelée Turbo Exponder (K101) [2].

Après détente du gaz côté turbine aux $P = 64 \text{ Kg/cm}^2$ et $T = -34,8^\circ\text{C}$, les dernières traces d'hydrocarbures liquides sont récupérées dans le ballon séparateur (D103). Le gaz

sortant du (D103) présente, d'une part, une composition qui répond aux spécifications de gaz de vente, d'autre part, une très basse température. Ces frigories ainsi obtenues sont cédées au gaz chaud provenant du (D101), au niveau de la batterie d'échangeurs (E102 A-F), côté calandre. Le gaz sortant à la température de l'ordre de 23°C, passe côté compresseur du (K101), pour être comprimé jusqu'à la pression du réseau de gaz de vente de l'ordre de 75 Kg/cm² et une température de l'ordre de 44,8°C. Le gaz sec répondant aux spécifications d'un gaz de vente, est refoulé ainsi vers le Centre National de Dispatching (Figure I-2) [2].

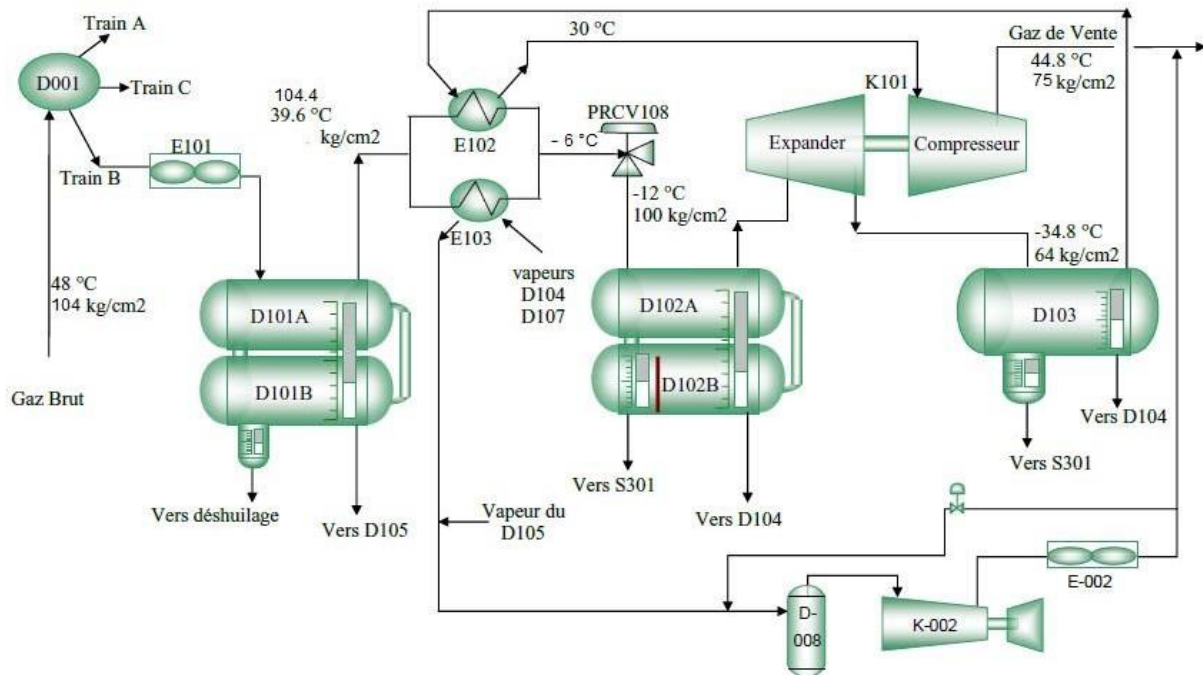


Figure I-2 : Section de séparation à haute pression [2].

I-2.2 Section à basse pression

Les hydrocarbures liquides évacués du (D101) subiront un flash jusqu'à la pression de 32 Kg/cm² et une température de 30°C (D105). Le gaz séparé de l'hydrocarbure liquide dans (D105), sera évacué pour être mélangé au gaz côté calandre de la batterie d'échangeurs (E103 A-B). Le mélange ainsi obtenu passera vers le compresseur de la section de transfert et de stockage pour être comprimé comme gaz sec, puis envoyé vers le réseau de gaz de vente [2].

❑ Colonne de stabilisation C101

L'hydrocarbure liquide du D105 passe dans un échangeur liquide/liquide (E 104), côté calandre pour être préchauffé à $T = 120^{\circ}\text{C}$ et va alimenter la colonne de fractionnement à un niveau de plateau où règne l'équilibre liquide-vapeur (21^{ème} plateau). Cette colonne appelée **déethaniseur** (C101), a 28 plateaux à clapets et opère à $P = 26,52 \text{ Kg/cm}^2$. Elle est composée de deux parties froide et chaude séparées par le 12^{ème} plateau, appelé plateau accumulateur et

qui est alimentée par deux courants. La partie froide est composée de 12 plateaux et alimentée par la charge issue du D104 au 5^{ème} plateau à $-26,4^{\circ}\text{C}$. Avant son entrée à la colonne, elle est utilisée comme fluide réfrigérant du produit de tête de la C101 à travers le condenseur de tête E106. La partie chaude est constituée de 16 plateaux, elle est alimentée au 21^{ème} plateau par le courant en provenance du ballon séparateur basse pression D105, après avoir été préchauffée à 130°C dans l'échangeur E104 côté calandre [2].

La vapeur en tête de colonne est partiellement condensée dans le E106 puis flashée dans le ballon D107 à -28°C . Le Gaz généré du flash est envoyé à la section compression K002, tandis que le liquide est pompé au 1^{er} plateau comme reflux à -28°C . Les hydrocarbures liquides accumulés dans le 12^{ème} plateau, sont acheminés à l'extérieur de la colonne et séparés du glycol dilué dans le séparateur D106. Les liquides issus du point de flash sont réintroduits au 13^{ème} plateau, partie chaude de la colonne, tandis que la vapeur est envoyée au 12^{ème}, partie froide de la colonne (Figure I-3) [2].

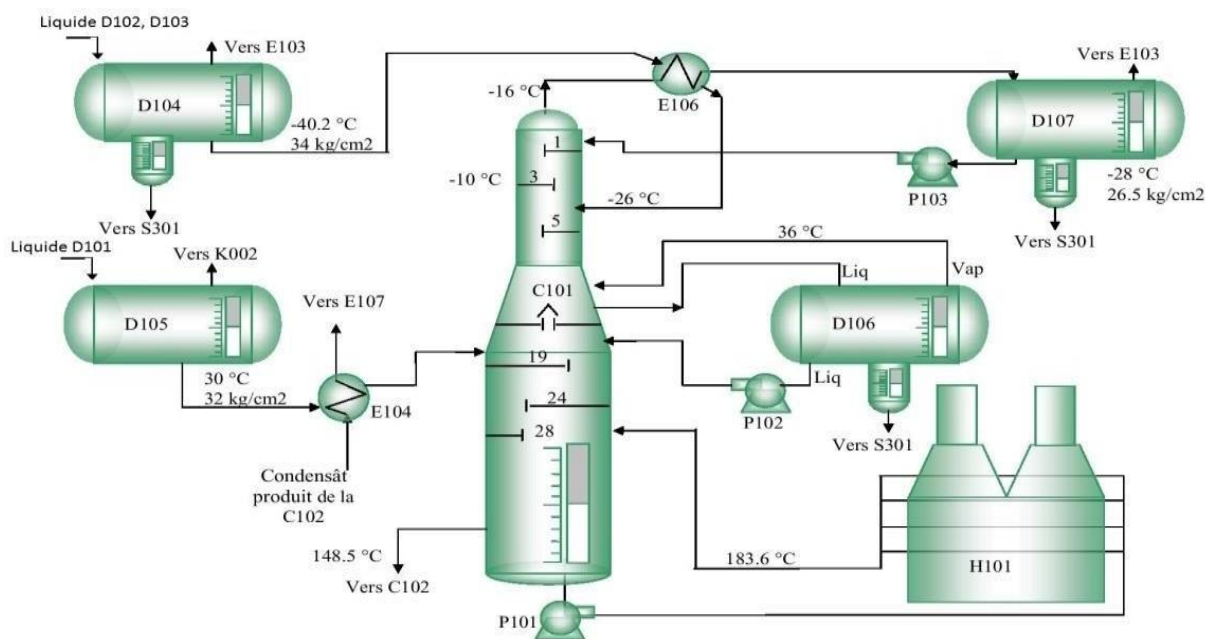


Figure I-3 : Section de stabilisation ; dééthaniseur C101 [2].

□ Colonne de fractionnement C102

Le produit du fond du (C101), va alimenter le 21^{ème} plateau d'une autre colonne appelée **débutaniseur** (C102). Le débutaniseur est une colonne à 32 plateaux qui permet la séparation du liquide en GPL et condensât à $P = 14\text{ Kg/cm}^2$. Les vapeurs fractionnées dans la zone de rectification montent en tête de la colonne (C102) à $T = 67^{\circ}\text{C}$, puis une condensation totale de ces vapeurs est réalisée dans une batterie d'aéroréfrigérant (E108) jusqu'à atteindre une température de l'ordre de 40°C . Cette condensation totale permet de récupérer tout le

GPL dans le ballon de reflux (D108) (Figure I-4) [2].

Remarque : une injection permanente d'une solution de mono éthylène glycol (MEG) à 80 % est effectuée à l'entrée des échangeurs côté tubes E102/E103 et E106 ainsi qu'au côté refoulement des pompes de reflux P103, ce qui empêche la formation de givre (bloc de structure cristalline).

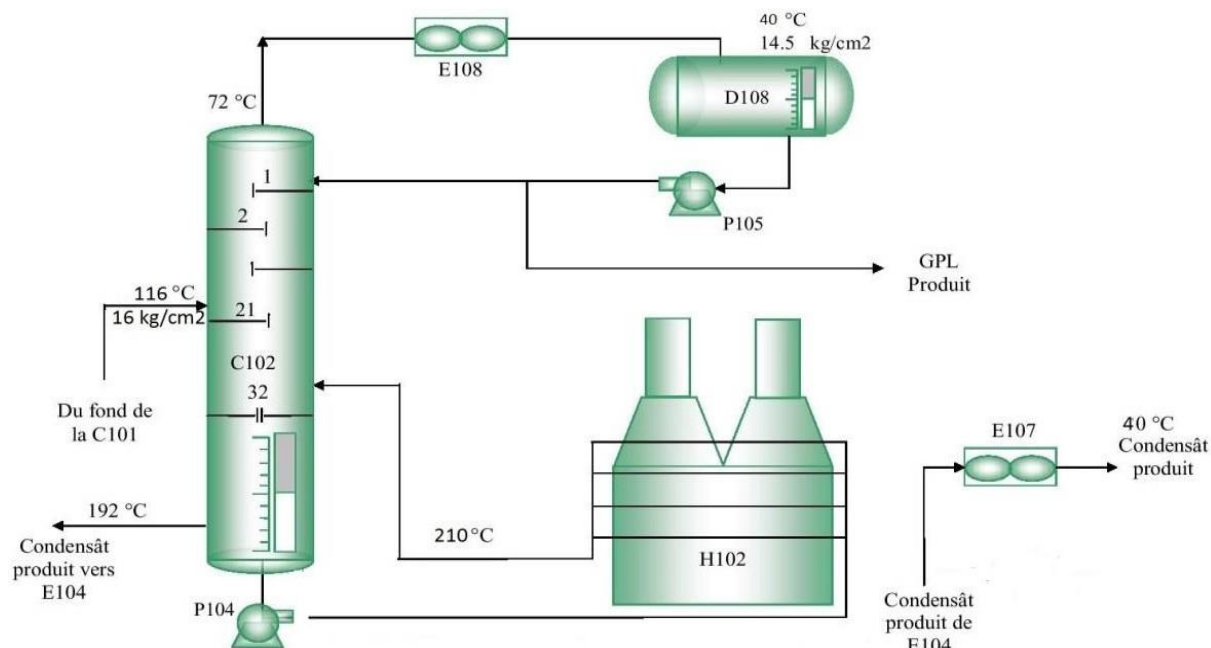


Figure I-4 : Section de fractionnement ; debutaniseur C102 [2].

Le GPL aspiré par la pompe (P105) est refoulé en deux flux. Une partie est utilisée comme liquide de reflux vers la tête de la colonne (C102) afin de maintenir la température de tête. L'autre partie est refoulée vers la Section de Stockage et de Transfert. L'hydrocarbure liquide recueilli au fond de la colonne (C102) est utilisé comme fluide de rebouillage dans un four (H102), ceci permet d'évaporer le GPL dissous et de maintenir la température de fond de l'ordre de 192°C [2].

L'autre partie du liquide du fond est du condensât stabilisé à haute température de l'ordre de 192°C. Ces calories seront cédées au niveau de l'échangeur (E104) coté tube et ressort à la température de l'ordre de 60°C. Son passage à travers une batterie d'aéroréfrigérant (E107) permet d'obtenir une température de condensat de production de l'ordre de 40°C. À cette température, le condensat est évacué vers le ballon de stockage (D003 B), puis vers la section de transfert et stockage (CSTF). Par ailleurs, l'eau recueillie dans le réservoir du D101 est évacuée, vers un ballon (D404), puis vers bassin d'évaporation.

Le GPL non conforme aux spécifications de vente passe dans les deux sphères de stockage (T002 A/B), puis refoulé vers le déethaniseur (C101) afin de subir un traitement. Le

GPL ainsi comprimé jusqu'à la pression de l'ordre de 19 Kg/cm² et la température de l'ordre de 105°C passe à travers une batterie d'aéroréfrigérant (E001A/B) pour être refroidi jusqu'à une température de l'ordre de 54°C, ce qui permet une condensation au niveau du ballon (D007) pour séparer les incondensables qui seront envoyés vers la torche. Le GPL liquide est ensuite recyclé vers les sphères de stockages [2].

Le condensât produit qui répond à la spécification de vente est expédié vers le CSTF et passe dans un ballon de stockage (D003 B) puis vers le bac de stockage (T001 B ou C). Le condensât qui ne répond pas à la spécification de vente est expédié vers le ballon (D003A) puis vers un bac de stockage (T001A). Une opération de retraitement lui est effectuée au niveau du débutaniseur (C102) [2].

I-2.3. Unité de glycol

Cette unité, exploitée pour le traitement du glycol hydraté venant des trains, permet l'élimination de l'eau qu'il a absorbée, dans le but de le réutiliser. A cet effet deux unités sont installées, une d'elles en service et l'autre en stand-by, assurant ainsi le fonctionnement continu du traitement [2].

I-3. Unité des utilités

L'exploitation du module IV, exige la mise en service des utilités suivantes [2] :

□ Traitement des eaux

Cette unité est conçue pour le traitement des eaux brutes pour des utilisations spécifiques, telles que : eau potable, eau de service, eau de refroidissement et eau incendie ;

□ Air instrument et air service

L'unité de production de l'air, produit la quantité d'air instruments et service pouvant satisfaire les besoins du module. L'air service est livré par des compresseurs installés au CSTF, il est utilisé généralement pour le nettoyage des équipements lors de leur révision. L'air instrument est utilisé pour le fonctionnement des vannes automatiques ;

□ Gaz inerte

La méthode utilisée au module IV pour obtenir le gaz inerte est l'adsorption. Après compression de l'air et élimination de la matière en suspension, l'oxygène est adsorbé par des granulés de charbon actif et l'humidité est éliminée par des tamis moléculaires. L'azote sortant à une pureté de 99% est utilisé pour dégazer les équipements lors des révisions.

Chapitre II:

Gaz Naturel et produits de traitement

Chapitre II : Gaz Naturel et produits de traitement

II-1. Gaz naturel

Le gaz naturel est une énergie primaire non renouvelable, bien répartie dans le monde, propre et de plus en plus utilisée. La mise en œuvre de cette énergie repose sur la maîtrise technique de l'ensemble de la chaîne gazière, qui va de l'extraction aux utilisateurs, en passant par le stockage, le transport et la distribution. Le gaz naturel est un mélange dont le constituant principal, de **75 % à 95 %**, est le méthane (CH_4). Il est donc composé majoritairement d'hydrogène et de carbone, d'où son nom : hydrocarbure.

Au stade final de son exploitation, le gaz naturel doit répondre à une norme de caractéristiques, à savoir [4] :

- Pouvoir calorifique supérieur PCS : 9350 à 9450 k cal /Nm³ ;
- Teneur en eau ; moins de 50 ppm
- Point de rosée : - 6°C à une pression de 80 bar ;
- Densité : 0,66.

II-1.1. Différents types de gaz naturel

Le gaz naturel se trouve sous quatre formes [5] :

□ Gaz sec

Au cours de la production d'un tel gaz, il ne se forme jamais de phase liquide. Ceci reste vrai lorsque la pression dans le réservoir décroît avec le temps. Ce type de gaz doit être concentré en méthane et contenir peu d'hydrocarbures plus lourds que lui ;

□ Gaz humide

Ce type de gaz forme une phase liquide en cours de production dans les conditions de surface, il est moins concentré en méthane ;

□ Gaz à condensat

Le gaz à condensat forme une phase liquide dans le réservoir par condensation. Au cours de la remontée dans le puits, le gaz se refroidit avec formation de liquide en surface, ce qui engendre que la phase condensée est riche en constituants lourds ;

□ Gaz associé

Le gaz associé coexiste dans la roche réservoir avec un gisement de pétrole. Il peut

être sous forme de gaz dissous dans l'huile ou sous forme de gaz de couverture (gaz cap) situé au-dessus de réserve de pétrole (huile).

II-1.2. Réserves de gaz naturel

D'après la compagnie britannique British Petroleum (BP), les réserves mondiales prouvées de gaz en 2018 sont de $196,9 \text{ tm}^3$ (augmentation de $0,8 \text{ tm}^3$ par rapport aux autres années). Ces réserves enregistrées peuvent suffire pour répondre à plus de 50 ans de courant de production (50,9 ans). L'Azerbaïdjan ($+0,8 \text{ tm}^3$) et l'Arabie Saoudite ($+0,2 \text{ tm}^3$) ont été les principaux contributeurs à cette croissance. La Figure II-1 illustre la répartition des réserves de gaz naturel dans le monde.

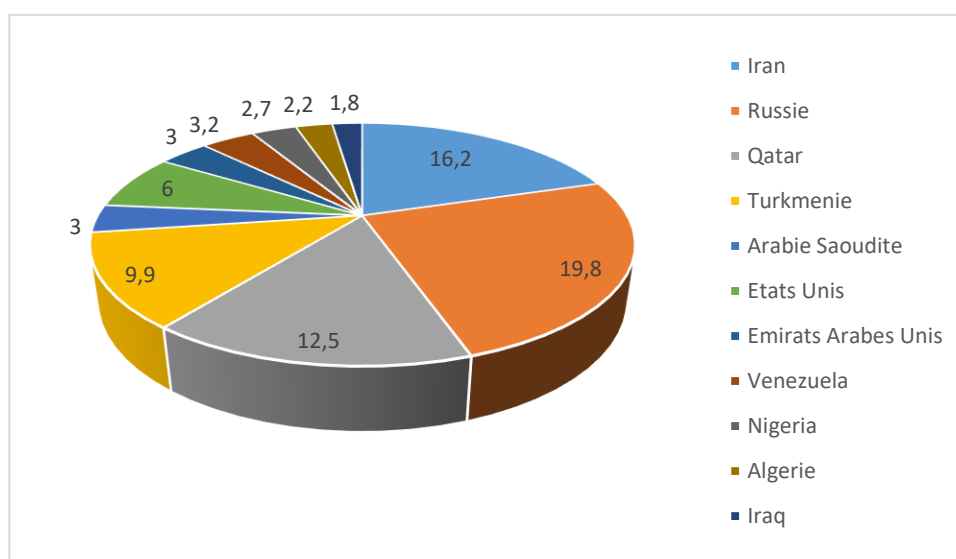


Figure II-1 : Répartition des réserves de gaz naturel en 2018 [6].

Il est à noter qu'un classement par région révèle que le Moyen-Orient détient les plus grandes réserves prouvées ($75,5 \text{ tm}^3$, 38,4% du total mondial), tandis que par pays, la Russie est le plus grand détenteur de réserves ($38,9 \text{ tm}^3$, 19,8 % du total). Sur 57 pays l'Algérie détient la 11^{ème} place dans les réserves mondiales de gaz naturel, avec une production de $4,3 \text{ tm}^3$ ce qui représente 2,2% du total [6].

II-1.3. Production mondiale du gaz naturel

En 2018, d'après British Pétroleum (BP), la production mondiale de gaz naturel n'a augmenté que de 5,2 %. Au fait, la baisse de la production dans un ou plusieurs pays est pratiquement compensée par sa croissance dans d'autre pays pour équilibrer le marché mondial. Selon la Figure II-2, l'Algérie arrive en dixième position avec 92,3 billion de m^3 produit durant l'année 2018, représentant ainsi 1,3 % de la production mondiale [6].

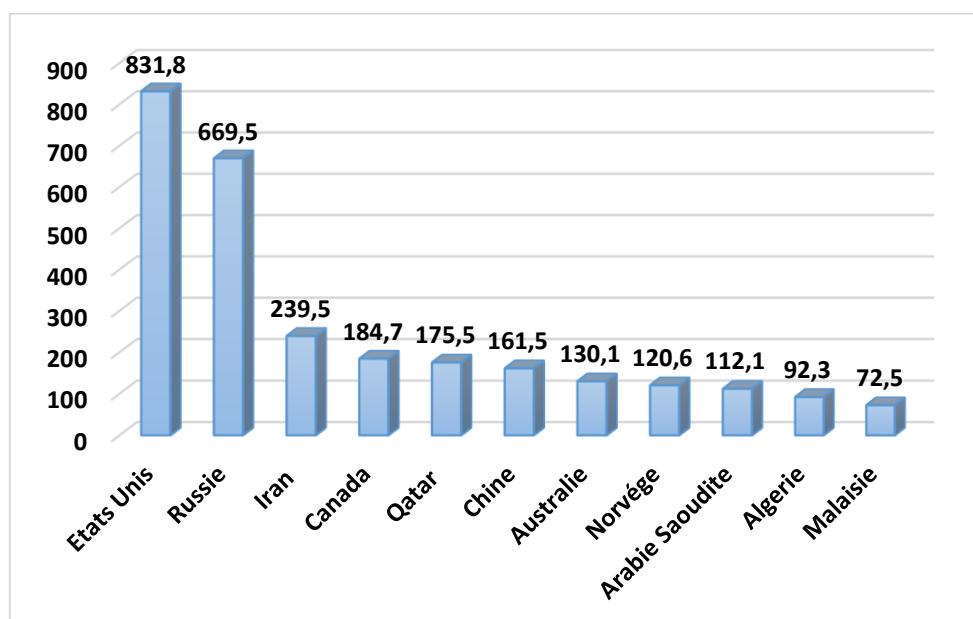


Figure II-2 : Production de gaz naturel en 2018 en billion de mètre cube [6].

II-2. Produits de traitement

II-2.1.GPL

L'appellation : Gaz de Pétrole Liquéfiés est exclusivement réservée au propane et au butane, car ils sont les seuls à être gazeux à pression et température ambiante (1,013 bar et 25°C) et les seuls à se laisser liquéfier sous faible pression (à 7,5 et 1,5 bar respectivement). Les GPL sont issus, à plus de 60%, des champs de gaz naturel. Pour le reste, il provient du raffinage du pétrole brut et il représente entre 2 et 3% des produits raffinés [7].

II-2.1.1. Caractéristiques des GPL

□ Odeur et couleur

Le GPL est inodore et incolore à l'état naturel. Cependant, un odorant, constitué de composés sulfurés tel que le diéthylmercaptane ou le diméthylsulfide, lui y est rajouté pour des raisons de sécurité à des fins de commercialisation [8] ;

□ Tension de vapeur TVR (Tension de Vapeur Reid)

La TVR du GPL à 20°C est de 8 bars pour le propane et 2 bars pour le butane [8] ;

□ Dilatation (expansion volumique de gaz)

À l'état liquide, le GPL a un haut coefficient de dilatation dont il faut tenir compte lors de son stockage (les sphères ne doivent jamais être complètement remplies) [8] ;

□ Densité

Aux conditions normales de température et de pression, le GPL est plus lourd que l'air. à 38°C, sa densité est égale à 0,534 [8] ;

□ Température d'ébullition

À la pression atmosphérique, la température d'ébullition du propane est de -42°C , celle du butane est de -6°C [8] ;

□ Pouvoir calorifique

C'est la propriété la plus intéressante étant donné que le GPL est traditionnellement utilisé pour les besoins domestiques [8] :

- Propane: $PC = 22506(\text{Kcal/Kg})$;
- Iso-butane: $PC = 29460(\text{Kcal/Kg})$;
- Normal butane: $PC = 29622(\text{Kcal/Kg})$.

□ Impuretés

Les impuretés retrouvées dans le GPL sont beaucoup plus le soufre (sa teneur est inférieure ou égale à 0,005 % en masse) et l'eau [8].

II-2.1.2. Domaines d'utilisation du GPL**□ GPL Carburant**

Le GPL est utilisé comme carburant efficace pour les véhicules (GPL/C). C'est un carburant qui produit moins de CO_2 et de CO, et ne contient pas de plomb (Pb). En Algérie, le GPL/C a été introduit dans le marché en 1980 sous le nom commercial SIRGHAZ [9] ;

□ GPL dans la pétrochimie

La demande pétrochimique globale du GPL s'accroît d'année en année, et son utilisation dans ce domaine est variée. A titre d'exemple, il est utilisé comme charge de vapocraqueur afin d'obtenir des oléfines et comme un précurseur (butane) pour la fabrication du MTBE (Méthyl Tert-Butyl Ether) utilisé comme booster des essences en substitution au PTE (Plomb tétraéthyl éther) [9] ;

□ GPL dans la climatisation

Il est utilisé dans l'industrie pour la construction des réfrigérateurs et des climatiseurs (moyenne capacité) grâce à sa détente pour créer le froid [9] ;

□ GPL dans les ménages

Le butane est utilisé principalement dans le secteur domestique pour la cuisine et le

chauffage. De plus, le GPL est utilisé dans d'autres domaines tels que l'industrie en général, l'industrie chimique et dans l'agriculture [9].

II-2.1.3. GPL en Algérie

L'Algérie est l'un des leaders mondial du GPL, avec une production annuelle qui avoisine les 9,0 millions de tonnes en 2016 (contre 5 millions en 1996). Les exportations Algériennes d'hydrocarbures sont orientées globalement vers le marché traditionnel : l'Europe », avec une part de (72%), suivie de l'Amérique (16%), l'Afrique (6%), l'Asie & Océanie (6%) et enfin le moyen orient (1%). Par pays, Ces cinq premiers clients sont l'Italie (31%), suivi par l'Espagne (21%), puis les USA (8%), la France (5,5%) et le Portugal (4,7%). Ces cinq pays représentent (70%) du total des exportations en volume (Figures II-3 et II-4) [10].

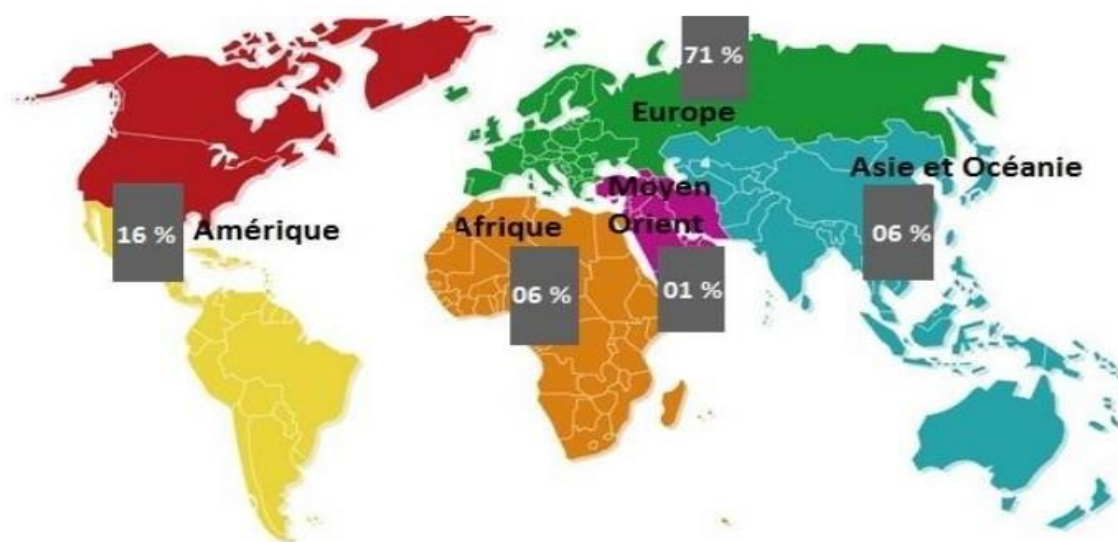


Figure II-3 : Détail des exportations du GPL Algérien par région [11].

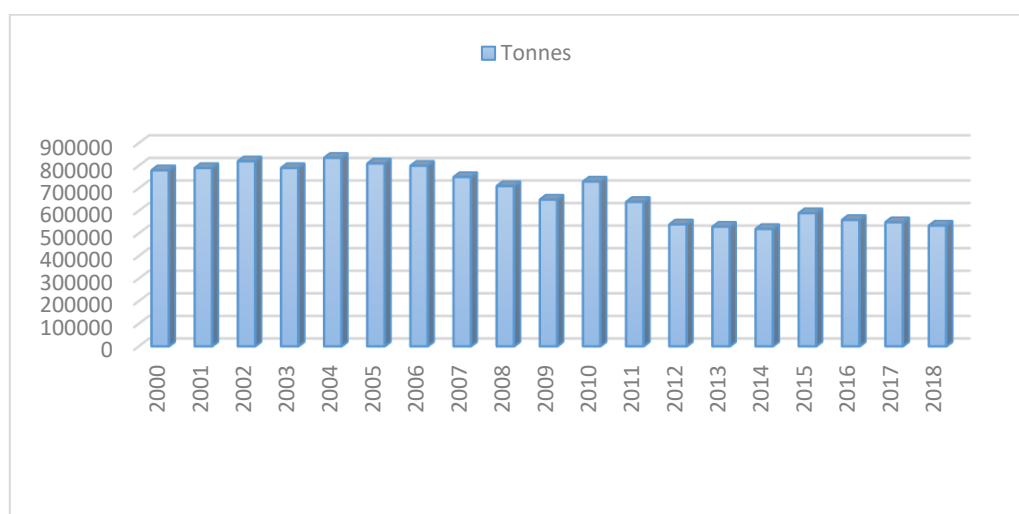


Figure II-4 : Production du GPL au niveau de Hassi R'Mel (module IV) pour la période 2000-2018 (tonnes) [11].

II-2.2. Condensat

Le condensat est constitué d'un mélange d'hydrocarbures paraffinées, de iC_5H_{12} jusqu'au $C_{12}H_{26}$ et plus. Il est sous forme liquide dans les conditions normales de température et de pression.

II-2.2.1. Caractéristiques du condensat

Les principales caractéristiques du condensat sont [12, 13] :

❑ Aspect

C'est un liquide incolore, avec une odeur d'essence ;

❑ Poids spécifique

Le poids spécifique du condensat est compris entre 0,7 et 0,8 ;

❑ Point d'éclair (Temperature d'inflammation)

Son point d'éclair est inférieur à $40^{\circ}C$;

❑ Limites d'inflammabilités

Il est très inflammable. Ses limites d'inflammabilité sont approximativement entre 1, 4 et 7, 6% (dans l'air) ;

❑ Densité de vapeur

Les vapeurs du condensât sont plus lourdes que l'air, leur densité est de 3 à 4 fois plus grande que celle de l'air ;

❑ Explosivité et inflammabilité

Le condensat est un fluide hautement inflammable et évaporable à une température et pression normale. Ses vapeurs constituent un mélange gazeux explosif ;

❑ Toxicité physiologique

Les vapeurs du condensât sont toxiques. Lorsqu'un homme est exposé à ces vapeurs, le premier symptôme constaté sera l'irritation des yeux, qui sera suivie de symptômes névropathies (étourdissement). Lorsque la concentration des vapeurs du condensât est de l'ordre de 0,025% à 0,05% volumique dans l'air, elles ne peuvent pas causer des symptômes sérieux, même après plusieurs heures d'inhalation ;

II-2.2.2. Domaine d'utilisation du condensat

La particularité du condensat réside dans son utilisation dans deux secteurs industriels entièrement stratégiques : la pétrochimie et le raffinage. Dans le domaine de la pétrochimie, le

condensat est principalement utilisé pour la production des oléfines par le vapocraquage, tandis que dans le domaine du raffinage, il est utilisé dans la production des carburants notamment les essences. Leurs prix de revient est plus bas que les essences produites à partir du pétrole brut car la séparation et la transformation du condensât sont moins coûteux, et sa composition chimique est très riche en éléments légers [9-10].

II-2.2.3. Condensat en Algérie

L'Algérie est l'un des premiers producteurs du condensat à l'échelle mondiale. Ces énormes quantités de condensât ne trouvent aucune application dans l'industrie Algérienne. La plus grande quantité de ce produit est expédiée vers l'étranger à l'état brut. La Figure II-5 montre l'évolution de la production du condensat, et la richesse entre les années 2000 et 2017 du site Hassi R'Mel et plus exactement au niveau du module IV [11].

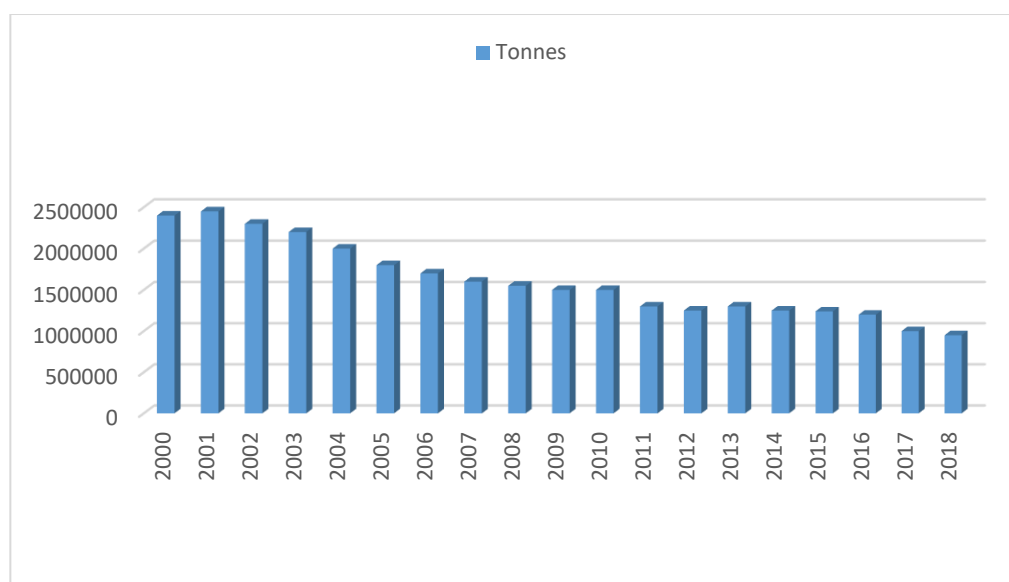


Figure II-5 : Production du condensat au niveau de Hassi R'Mel (module IV) pour la Période 2000-2018 [11].

CHAPITRE III:
Simulation et optimisation par le simulateur
HYSYS et les plans d'expériences

Chapitre III : Simulation et optimisation par le simulateur HYSYS et les plans d'expériences

III-1. Simulation

Les industries exposées à des changements sévères et répétés dans leurs paramètres opératoires, finissent par enregistrer des dégradations multiples dans leurs produits finis et équipements. Prédire le bon fonctionnement de ces industries sous changements accidentels hypothétiques constitue ainsi un enjeu majeur pour garantir la qualité des produits et la sûreté des équipements.

En guise de réponse à ces besoins, plusieurs sociétés ont développé des systèmes de simulation, basés sur des méthodes numériques avancées, qui permettent d'analyser le comportement d'un processus quelconque au moyen d'un modèle matériel dont les paramètres et les variables sont les images de ceux du processus étudié. Actuellement, les simulateurs ChemCAD, Aspen Plus, Pro-II, HYSIM et HYSYS, reconnus mondialement, représentent une alternative majeure pour toute industrie à haut risque.

III-1.1. Description du simulateur HYSYS

Le simulateur HYSYS, développé par le fournisseur Aspen Technologie (AspenTech), est l'un des plus performants logiciels de simulation. Il peut être employé lors de la conception d'un procédé industriel afin d'établir des bilans de matière et d'énergie, et de dimensionner les équipements. Il est aussi utilisé pour le suivi des procédés qui sont déjà installés afin de réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de compositions de l'alimentation ou des conditions de fonctionnement de certains équipements et de déterminer leurs performances (optimisation) [14].

Le simulateur HYSYS, comme tout autre simulateur, dispose d'une base de données qui repose sur des modèles thermodynamiques souvent utilisés pour la détermination des propriétés thermodynamiques et volumiques de la matière ainsi que l'état des composés et des mélanges. En effet, la réussite de la simulation dépend du choix du modèle thermodynamique adéquat. Dans les industries du pétrole et du gaz, le modèle thermodynamique le plus utilisé dans la simulation est celui du Volume Translated Peng Robinson (VTPR). Ce dernier permet de calculer l'équilibre liquide-vapeur des systèmes composés des hydrocarbures. Son équation se présente comme suit [15] :

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2 + 2bV - b^2}$$

Où :

P : la pression du système (psi) ;

T : la température (°C) ;

V : volume molaire du gaz (m³/mol) ;

a: terme d'attraction, ou pression interne des molécules ;

b: paramètre qui prend en compte le volume propre des molécules.

L'équation Peng Robinson est applicable sur une grande gamme de conditions illustrées dans le Tableau III-1.

Tableau III-1 : Domaine d'application du modèle Peng Robinson [15].

Modèle	Paramètres d'application			
	Température (°F)	Température (°C)	Pression (psi)	Pression (KPa)
Peng Robinson	- 456	-271	15000	100000

III-1.2. Environnement de simulation

A l'échelle de l'industrie gazière, plus exactement au niveau des modules de traitement, la simulation des colonnes de distillation est essentielle pour le contrôle et l'optimisation des paramètres opératoires, afin d'aboutir à une qualité optimale des produits spécifiés. Ainsi, l'environnement utilisé par le simulateur HYSYS pour l'optimisation des colonnes est l'environnement **Column**. Ce dernier représente un objet particulier permettant de définir la topologie de l'opération unitaire : colonne à distiller [15].

III-2. Plans d'expériences

Les plans d'expériences sont issus de méthodes mathématiques et statistiques appliquées à l'expérimentation. Ils permettent de prédire, avec le maximum de précision une réponse à partir d'un nombre minimal d'essais liés au modèle postulé. De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherche à déterminer et établir un lien qui existe entre une grandeur d'intérêt y et des variables x_i qui peuvent modifier la valeur de y via la fonction [16-18] :

$$y_i = f(x_j)$$

Avec :

y_i : réponses du système ;

x_j : facteurs ou variables d'entrées du système.

L'utilisation des plans d'expériences dans des systèmes simples ou complexes permet d'éclaircir et de comprendre le fonctionnement des ces derniers en les simulant à une « **boîte noire** » (Figure III-1). Le principe de la boîte noire consiste à imposer aux facteurs d'entrées des variations particulières, à mesurer les variations induites des réponses et à en déduire les relations entre facteurs et réponses sans avoir une connaissance maximale du phénomène étudié [17].

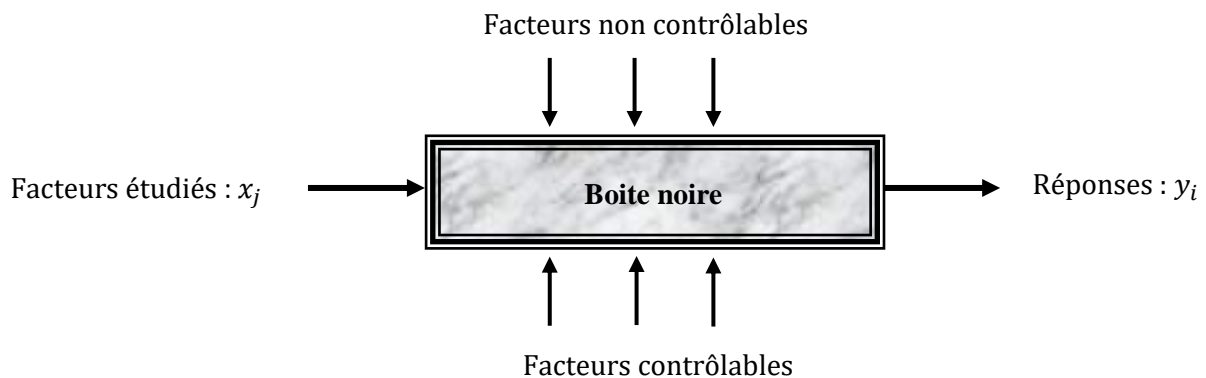


Figure III -1 : Schéma représentatif du contexte de la boîte noire et du principe des plans d'expériences [17].

La méthode des plans d'expériences, définit par le principe « **tous les facteurs à chaque moment** », représente un nombre important d'avantage comparée à la méthode classique définit par « **un facteur à un moment donné** ». Ces avantages sont [19, 20] :

- Diminution du nombre d'essais ;
- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs ;
- Détection des interactions entre les facteurs ;
- Modélisation des réponses étudiées (conception d'un modèle mathématique) ;
- Précision optimale des résultats.

III-2.1. Types des plans d'expériences

Le choix d'un plan d'expériences dépend essentiellement de la nature des questions à traiter, du degré de généralité recherché pour les conclusions et des ressources disponibles (matériau expérimental, personnel, contraintes de temps...). Les plus utilisés sont [21-24] :

- Les plans du premier degré : ces plans dits factoriels ont une grande importance pratique, soit sous forme de plans complet, soit sous forme de plans fractionnaires ;
- Les plans du second degré : ils sont consacrés aux facteurs continus prenant plus de deux niveaux et dont l'interprétation est basée sur des modèles du second degré, il

s'agit des plans composites, Doehlert, Box-Behnken et autres ;

- Les plans des mélanges : ils sont adaptés aux facteurs avec contraintes (dépendants) tels que les concentrations des constituants d'un mélange. Ils ne s'appliquent qu'aux facteurs continus.

III-2.1.1. Plans factoriels complets à deux niveaux (2^k)

Les plans factoriels complets 2^k (PFC) sont les plans les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Ils permettent d'étudier k facteurs à raison de deux niveaux par facteur (niveau supérieur (+1) et niveau inférieur (-1)). Ils sont formés de $N = 2^k$ expériences déterminées par les différentes combinaisons possibles des niveaux minimal et maximal des k facteurs. Pour ces plans, il faut donc calculer M inconnues du modèle (coefficients) correspondants aux [18] :

- k effets principaux (linéaires) ;
- $(2^k) - k - 1$ interactions ;
- une constante représentant la moyenne de la réponse.

Pour un plan factoriel complet à 3 facteurs, dont il faut réaliser un nombre d'expériences : $N = 2^3 = 8$, sa matrice d'expériences représentative sera un tableau (Tableau III-2) traduisant la combinaison des trois facteurs entre leurs niveaux minimum et maximum.

Tableau III-2 : Matrice des expériences d'un plan factoriel complet à trois facteurs (8, 3).

Nombre d'essai N	Valeurs des variables réelles			Valeurs des variables codées			Réponse
	Z_1	Z_2	Z_3	x_1	x_2	x_3	y_i
1	$Z_{1\min}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\min}$	-1	-1	-1	y_1
2	$Z_{1\max}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\min}$	+1	-1	-1	y_2
3	$Z_{1\min}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\min}$	-1	+1	-1	y_3
4	$Z_{1\max}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\min}$	+1	+1	-1	y_4
5	$Z_{1\min}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\max}$	-1	-1	+1	y_5
6	$Z_{1\max}$	$Z_{2\min}$	$Z_{3\max}$	+1	-1	+1	y_6
7	$Z_{1\min}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\max}$	-1	+1	+1	y_7
8	$Z_{1\max}$	$Z_{2\max}$	$Z_{3\max}$	+1	+1	+1	y_8

L'établissement de la matrice d'expérience (Tableau III-2), et par la suite, du modèle exprimant la réponse en fonction des facteurs étudiés, nécessite la transformation des valeurs réelles (z_1, z_2, \dots, z_k) de ces derniers en variables codées (x_1, x_2, \dots, x_k). La formule permettant ce passage est donnée par l'équation suivante [18] :

$$x_j = \left(\frac{z_j - z_j^0}{\Delta z_j} \right), \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Avec :

$$z_j^0 = \frac{z_{jmax} + z_{jmin}}{2} \quad \text{et} \quad \Delta z_j = \frac{z_{jmax} - z_{jmin}}{2}$$

z_j^0 : variable réelle correspondante au centre du domaine d'étude ;

Δz_j : intervalle de variation du paramètre z_j ;

z_{jmax} et z_{jmin} : valeurs maximale et minimale de la variable z_j respectivement.

Chaque point expérimental permet d'obtenir une valeur de la réponse. Cette réponse peut être modélisée par des modèles polynomiaux synergiques, de premier degré qui regroupent tous les facteurs étudiés et s'écrivent sous la forme suivante [18] :

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j x_j + \sum_{\substack{u,j=1 \\ j \neq u}}^k a_{ju} x_j x_u + \sum_{\substack{l,u,j=1 \\ j \neq u \neq l}}^k a_{jul\dots k} x_j x_u x_l \dots x_k \quad (\text{Eq. III - 1})$$

Avec :

\hat{y} : réponse calculée à partir du modèle mathématique adopté ;

x_j : variables codées (variables centrées réduites) ;

$a_0, a_j, a_{ju}, a_{jul\dots k}, a_{jj}$: coefficients du modèle mathématique adopté ;

a_0 : terme constant ou moyenne ;

a_j : effets linéaires ;

$a_{ju}, a_{jul\dots k}$: effets d'interactions.

III-2.1.2. Plans composites centrés

Le plan composite centré fait partie des plans de surfaces de réponse qui sont associés à l'utilisation des polynômes de second degré qui s'écrivent sous la forme générale suivante [18]:

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j x_j + \sum_{j=1}^k \sum_{u \neq j}^k a_{ju} x_j x_u + \sum_{j=1}^k a_{jj} x_j^2 \quad (\text{Eq. III} - 2)$$

Avec :

a_{jj} : effets quadratiques.

Le plan composite centré consiste à réaliser les essais d'un plan factoriel, complété par des expériences au centre du domaine d'étude et des essais en étoile [18]. La Figure III-2 représente un plan composite pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux du plan factoriel $2^{k=2}$. Le point E est le point central. Ce point peut être répété une ou plusieurs fois. Les points axiaux F, G, H et I forment ce que l'on appelle le plan en étoile. De ce fait, le nombre total d'essais N à réaliser est la somme de :

- n_f essais d'un plan factoriel complet ;
- $n_\alpha = 2k$ essais en étoiles sur les axes à une distance α du centre du domaine ;
- n_0 essais au centre du domaine.

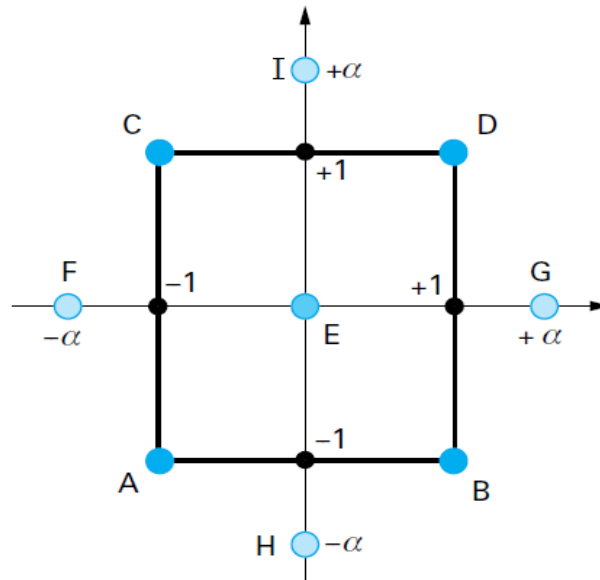


Figure III-2 : Plan composite à deux facteurs ($k = 2$) [18].

Pour un plan composite centré à 2 facteurs, dont il faut réaliser un nombre d'expériences : $N = 10$, sa matrice d'expériences représentative sera un tableau traduisant la combinaison des deux facteurs entre leurs niveaux minimum et maximum, centre et étoile ; soit cinq niveaux au total (Tableau III-3).

Tableau III-3 : Matrice des expériences d'un plan composite centré à deux facteurs (10, 2).

Nombre d'essai N	Valeurs des variables codées		Réponse
	x_1	x_2	y_i
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4
5	$-\alpha$	0	y_5
6	$+\alpha$	0	y_6
7	0	$-\alpha$	y_7
8	0	$+\alpha$	y_8
9	0	0	y_9
10	0	0	y_{10}

Selon les valeurs du paramètre α , le plan composite centré peut être isovariant par rotation, presque orthogonal ou de précision uniforme. Les valeurs du paramètre α et du nombre n_0 de points au centre sont fonction du nombre de facteurs k du plan factoriel de base et du critère d'optimalité rempli par le plan (Tableau III-4).

Tableau III-4 : Valeurs de α et de n_0 selon les critères remplis par le plan composite [24-30].

k	2	3	4	5	$2^{(5-1)}$	6	$2^{(6-1)}$
n_f 2^k (ou 2^{k-p})	4	8	16	32	16	64	32
n_α	4	6	8	10	10	12	12
isovariant par rotation	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1	≥ 1
n_0 précision uniforme	5	6	7	10	6	15	9
ortogonalité	8	12	12	17	10	24	15
α	1,41	1,68	2	2,38	2	2,83	2,38

Le calcul des coefficients des effets linéaires, d'interactions et quadratiques des modèles polynomiaux élaboré (Eq. III-1 et III-2) s'effectue, par une résolution de régression de l'équation matricielle suivante :

$$A = [X^T X]^{-1} X^T Y$$

Avec :

Y : vecteur des réponses ;

X : matrice des effets ;

A : vecteur des coefficients ;

X^T : matrice transposée de X ;

$[X^T X]^{-1}$ est la matrice inverse de la matrice $[X^T X]$.

III-2.2. Tests de signification et validation des modèles : Analyse statistique

L'emploi des principes d'analyse de régression et de corrélation permet de trouver lors du traitement des données expérimentales, la dépendance entre les variables et les conditions optimales. Une fois l'équation de régression obtenue, on procède à l'analyse statistique des résultats.

III-2.2.1. Vérification de la signification des coefficients

- Cas où l'essai au centre est répété n_0 fois

Dans ce cas, la variance des mesures (ou de reproductibilité) est estimée par celle calculée au centre du domaine expérimental [18] :

$$S_{rep}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_i - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1} \quad (Eq. III - 3)$$

Où : \bar{y}_0 : moyenne arithmétique des mesures effectuées au centre du domaine, elle est calculée par :

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} y_i}{n_0} \quad ((Eq. III - 4))$$

La variance de reproductibilité est indispensable pour estimer la signification des coefficients de l'équation de régression par le test de Student :

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_{bj}} \quad (Eq. III - 5)$$

Où :

t_j : suit une loi normale ;

b_j : $j^{\text{ème}}$ coefficient de l'équation de régression ;

S_{bj} : écart quadratique moyen qui est défini dans le cas d'un modèle du premier degré par :

$$S_{bj} = \frac{S_{rep}}{\sqrt{N}} \quad (Eq. III - 6)$$

La table de Student (**Annexe B**) est utilisée pour déterminer la valeur $t_p(f)$ pour le niveau de signification choisi α et le nombre de degré de liberté $f = n_0 - 1$. Ainsi, si t_j est plus grand que la valeur tabulée $t_\alpha(f)$ pour le niveau de signification choisi p et le nombre de degrés de liberté f , le coefficient b_j correspondant est significativement différent de zéro. Les coefficients non significatifs sont exclus de l'équation de régression.

III-2.2.2. Validation de l'équation de régression

Avant d'accepter le modèle postulé, nous devons vérifier l'absence de biais, le modèle doit décrire correctement les variations de la réponse en fonction du temps [18].

- **Recherche de biais du modèle**

Le test de Fisher-Snedecor consiste à comparer la variance résiduelle $S_{rés}^2$ à la variance de reproductibilité S_{rep}^2 par la formule :

$$F = \frac{S_{rés}^2}{S_{rep}^2} < F_{0,95}(N - \ell, n_0 - 1) \quad (Eq. III - 7)$$

Avec :

$$S_{rés}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - \ell} \quad (Eq. III - 8)$$

ℓ : nombre de coefficients significatifs ;

\hat{y}_i : réponses calculées à partir du modèle.

Si cette valeur calculée est inférieure à la valeur $F(0,95, N - \ell, n_0 - 1)$ tabulée (**Annexe C**), alors la variance résiduelle peut être considérée comme non significativement différente de la variance aléatoire au centre du domaine et nous concluons l'absence de biais, ce qui revient à dire que la part des variations de y non expliquée par le modèle est aléatoire.

- **Test de signification globale du modèle**

Lorsque le modèle est sans biais, nous pouvons donc vérifier la signification de la régression via l'équation suivante [18] :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / (\ell - 1)}{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - \ell)} \quad (Eq. III - 9)$$

Avec :

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (Eq. III - 10)$$

Si F est supérieur à la valeur tabulée du test de Fisher ($F_{\alpha}(f_1, f_2)$) pour le niveau de signification α et les nombres de degré de liberté $f_1 = \ell - 1$ et $f_2 = N - \ell$ (**Annexe C**), les variables retenues pour la modélisation ont, dans leur ensemble, un effet significatif sur la réponse y et l'équation est donc adéquate.

III-2.2.3. Coefficient de détermination

Une mesure de la qualité d'ajustement d'un modèle de régression est donnée par le coefficient de détermination [18] :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Eq. III - 11})$$

Plus la valeur de ce coefficient s'approche de 1, plus le modèle est représentatif

III-2.2.4. Analyse des résidus

L'évaluation de la qualité de prévision d'un modèle peut se faire par une analyse des résidus qui consiste à porter ces derniers en fonction des réponses prédites ou en fonction d'autres grandeurs. On peut ainsi détecter s'il existe une relation entre les résidus et la grandeur portée en abscisse. On doit arriver à des diagrammes ne laissant apparaître aucune relation ou tendance entre les grandeurs étudiées [18].

CHAPITRE IV

Etude pratique du débutaniseur C102

Chapitre IV: Etude pratique du débutaniseur C102

Ce chapitre est subdivisé en trois parties :

La première est consacrée à l'étude de la colonne de fractionnement débutaniseur C102 par le simulateur HYSYS. Elle englobe et traite tous les aspects et illustre tous les résultats trouvés lors de la simulation des cas actuel, design et design simulé réalisés dans le but de pouvoir se lancer dans l'expérimentation.

La deuxième met l'accent sur la modélisation et l'optimisation par les plans d'expériences du procédé de distillation/rectification de la colonne de fractionnement débutaniseur C102. Cette partie expose toutes les étapes suivies lors de l'élaboration du modèle de second degré et toutes les interprétations adaptées pour le valider et l'exploiter afin d'obtenir les conditions optimales de fonctionnement.

La troisième partie, quant à elle, met le point sur l'évaluation économique de l'optimisation soutirée de l'étude de planification. Elle traite l'aspect économique du procédé optimisé sur les installations du module IV (four H102 et condenseur E108).

Partie 1: Simulation du fonctionnement du débutanieur C102 par le simulateur HYSYS

Partie 1 : Simulation du fonctionnement du débutaniseur C102 par le Simulateur HYSYS

IV-1.1. Objectifs de la simulation

Comme nous le savons tous, les industries des hydrocarbures représentent la gamme d'industrie sensible et à haut risque. A cet effet, il est très recommandé de simuler d'abord le fonctionnement de ses unités avant de passer au cas réel. Ainsi, dans cette partie de notre travail, nous avons fait appel au simulateur HYSYS, dans le but de simuler le fonctionnement de la section de stabilisation : débutaniseur C102 du module IV du gisement de Hassi R'Mel aux cas actuel et design, en introduisant les variations des paramètres opératoires sélectionnés pour mener à bien notre étude de modélisation et d'optimisation. Au fait, ces variations déterminées par la méthodologie des plans d'expériences, doivent non seulement assurer le bon fonctionnement de la section, mais aussi préserver les spécifications commerciales des deux produits finis (GPL, condensat).

IV-1.2. Etude des paramètres opératoires de la section de stabilisation

Pour réaliser cette étude, nous avons fait varier la température de fond du débutaniseur (colonne de distillation/rectification) et le débit de reflux froid et nous avons, par la suite, examiner d'une part le comportement du procédé sous l'influence de ces deux paramètres et d'autre part l'accessibilité de leurs réajustements par l'opérateur au niveau de la salle de contrôle.

- **Température de fond**

La variation de cette dernière dépend de la charge d'alimentation et de la consommation du fuel gaz que nous voulons minimiser ;

- **Debit de reflux froid**

La variation de ce dernier dépend de la consommation énergétique du condenseur que nous cherchons à réduire.

IV-1.3. Simulation du cas design de la section du débutaniseur

Dans cette première étape, notre objectif était de valider le modèle thermodynamique choisi (Peng Robinson), pour son utilisation ultérieure. La Figure IV-1 illustre la fenêtre du simulateur HYSYS donnant le schéma de simulation du procédé de distillation/rectification étudié dans le débutaniseur C102.

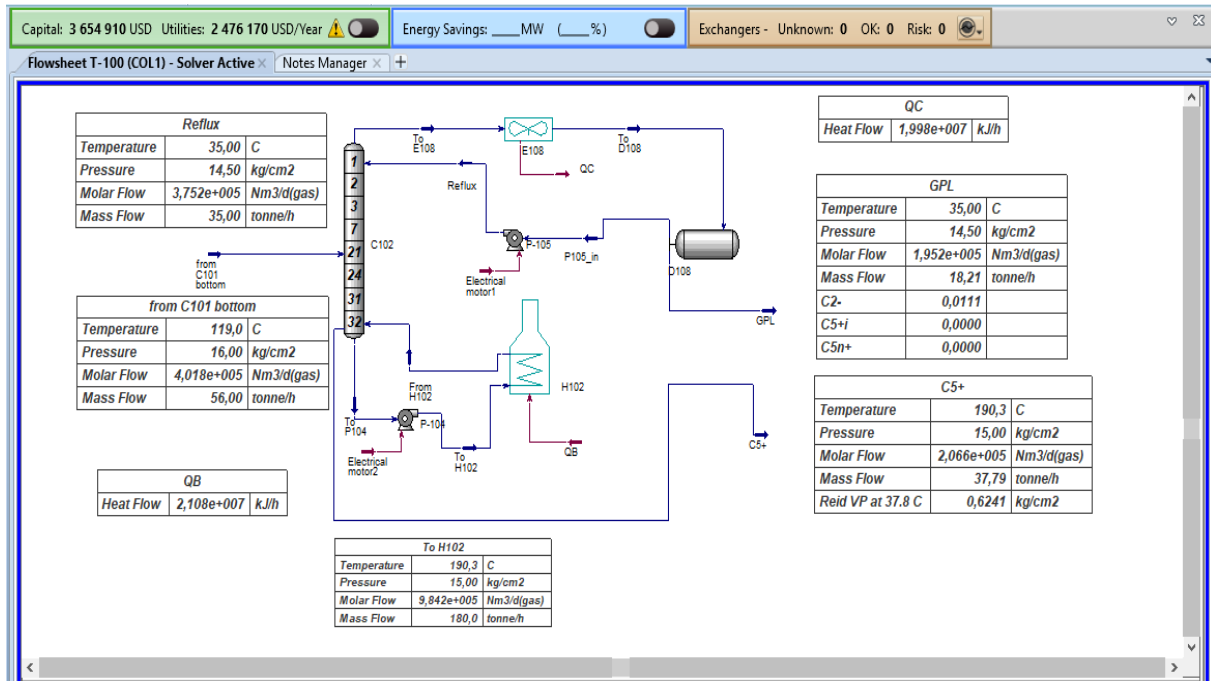


Figure IV-1 : Schéma du débutaniseur C102 retenu par la simulation.

IV-1.3.1. Procédure de la simulation

La procédure de calcul du débutaniseur dans l'environnement HYSYS nécessite les données suivantes :

- Paramètres d'entrée pour converger l'alimentation : composition, débit, température et pression de la charge. La Figure IV-2 représente les fenêtres de contrôle de ces paramètres.

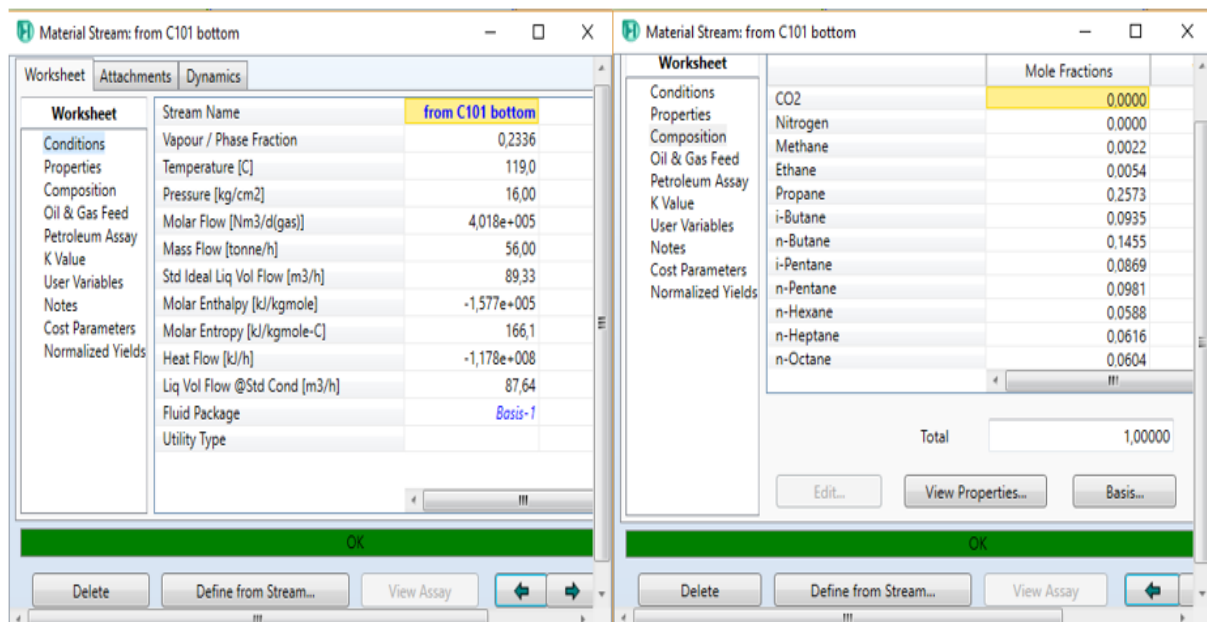


Figure IV-2 : Paramètres d'entrée pour converger l'alimentation.

- Design de la colonne : diamètre, type et nombre total de plateaux (Figure IV-3).

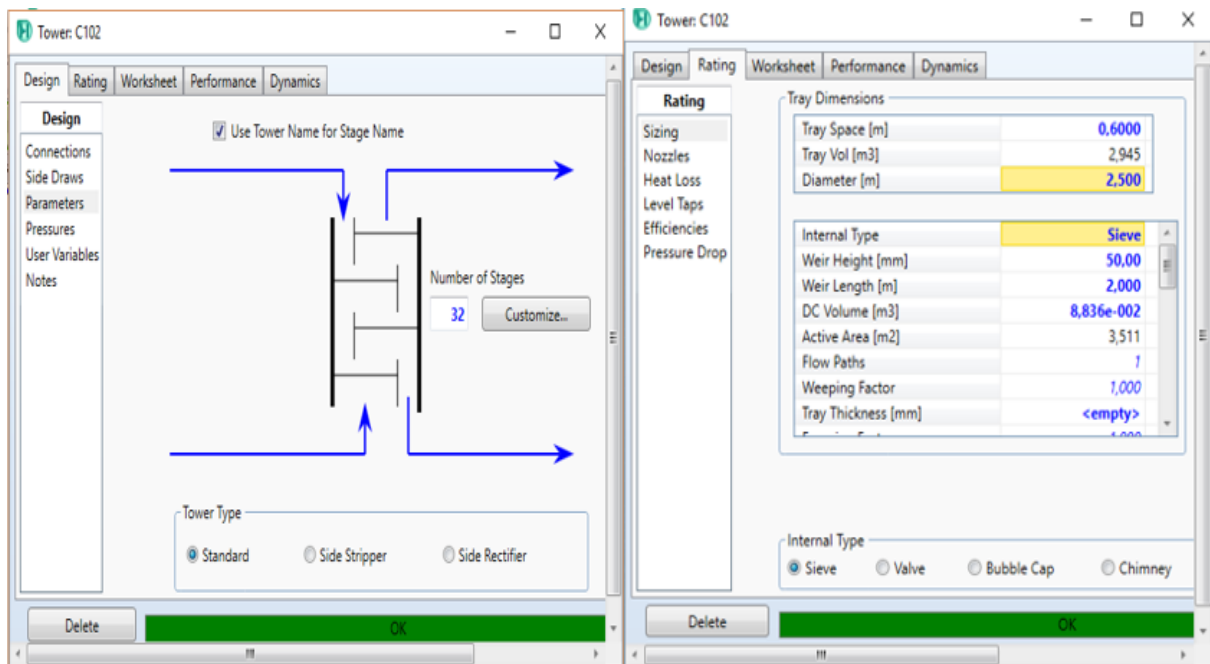


Figure IV-3 : Design de la colonne.

□ Position du plateau d'alimentation (Figure IV-4).

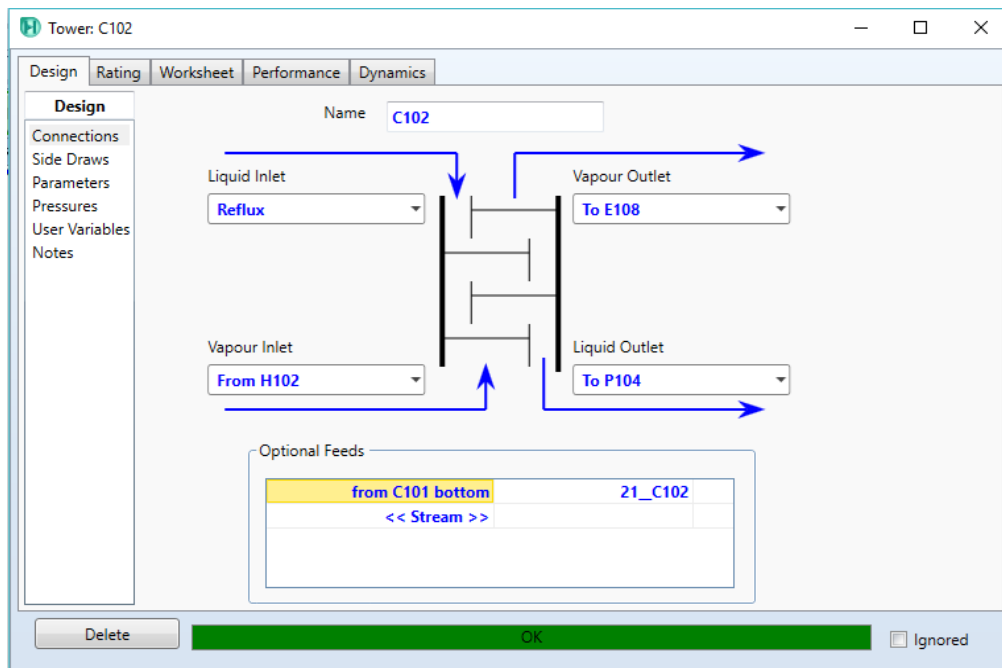


Figure IV-4 : Position du plateau d'alimentation.

Pour le condenseur E108, nous avons utilisé Subcooling, ensuite le subcooling to, pour avoir la température de sortie de l'aéroréfrigérant. La Figure IV-5 illustre la fenêtre représentative donnée par le simulateur HYSYS.

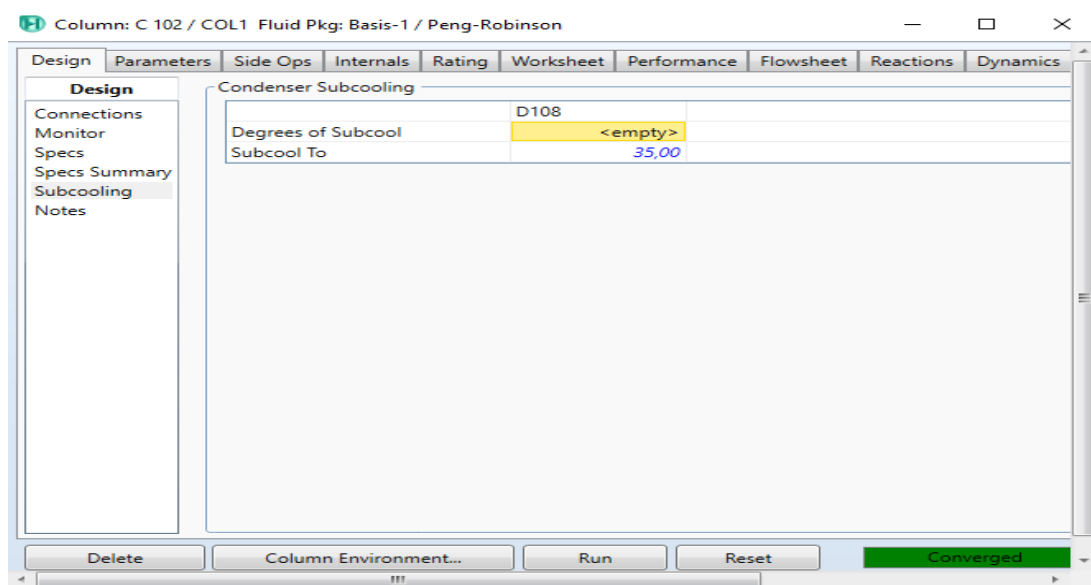


Figure IV-5 : Fenêtre du Subcooling dans l'environnement HYSYS.

Par ailleurs, le simulateur nécessite la spécification de trois autres paramètres opératoires à savoir : la température de sortie du rebouilleur, le débit de reflux froid (reflux de tête) et le débit de reflux chaud (reflux de fond). Ces derniers représentent le degré de liberté de la colonne. La Figure IV-6 illustre la fenêtre représentative de ces paramètres dans l'environnement HYSYS.

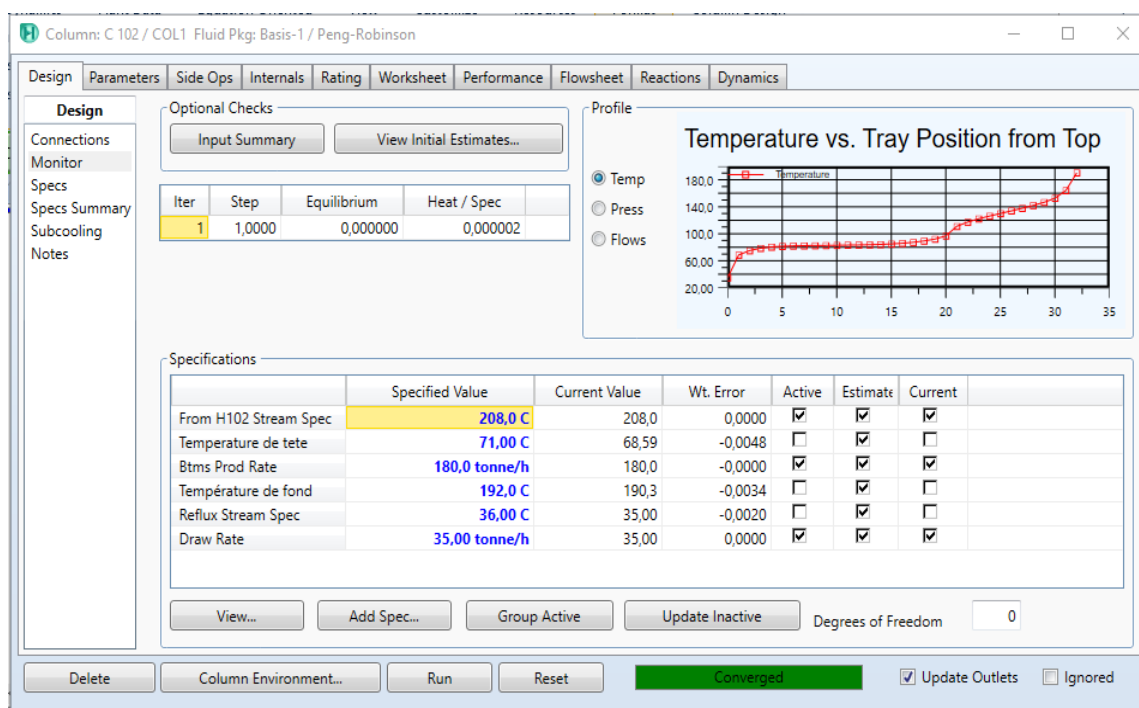


Figure IV-6 : Degrés de liberté de la colonne

IV-1.3.2. Paramètres de fonctionnement et composition de la charge

Dans le module IV, la colonne du débutaniseur C102 est alimentée par le résidu de la colonne du dééthaniseur C101. La composition de cette charge ainsi que ces paramètres design sont répertoriés dans les Tableaux IV-1 et IV-2 respectivement. Cependant, les Tableaux IV-3 et IV-4 regroupent les valeurs des paramètres design de dimensionnement du débutaniseur et de son fonctionnement.

Tableau IV-1 : Composition design de l'alimentation du débutaniseur.

Constituants de la charge	Débits molaire (Kmol/h)	Fractions molaires	Débits massiques (Kg/h)	Fractions massiques
N ₂	0,79	0,0004	22,1303	0,0001
CO ₂	0,01	0,0000	0,4401	0,0000
CH ₄	0,01	0,0000	0,1604	0,0000
C ₂ H ₆	2,06	0,0009	61,9440	0,0003
C ₃ H ₈	391,12	0,1763	17247,2187	0,0856
iC ₄ H ₁₀	139,09	0,0627	8084,4672	0,0401
nC ₄ H ₁₀	289,08	0,1303	16802,4861	0,0834
iC ₅ H ₁₂	112,60	0,0507	8124,2027	0,0403
nC ₅ H ₁₂	160,50	0,0723	11580,2357	0,0575
C ₆ H ₁₄	213,99	0,0964	18441,2093	0,0915
C ₇ H ₁₆	208,31	0,0939	20873,7039	0,1036
C ₈ H ₁₈	168,49	0,0759	19246,9501	0,0955
C ₉ H ₂₀	138,79	0,0625	17801,0670	0,0883
C ₁₀ H ₂₂	101,36	0,0457	14422,0083	0,0716
C ₁₁ H ₂₄	78,82	0,0355	12320,5909	0,0611
C ₁₂ H ₂₆	214,03	0,0965	36457,6571	0,1809
Total	2219,05	1,0000	201486,4720	0,9998

Tableau IV-2 : Spécifications design de la charge.

Spécifications	Valeurs
Débit molaire (Kmol/h)	2219,05
Débit massique (Kg/h)	201490
Pression (Kg/cm ²)	15,03
T (°C)	159,1

Tableau IV-3 : Paramètres design de dimensionnement du débutaniseur

Dimensionnement	Valeur
Diamètre (m)	2,5
Nombre de plateaux	32
Espacement entre plateau (m)	0,6
Position du plateau d'alimentation	21
Efficacité globale de la colonne	0,70

Tableau IV-4 : Paramètres design de la colonne débutaniseur

Paramètres	Valeur
T Rebouilleur (°C)	254
Reflux de tête (t/h)	109,160
Reflux de fond (t/h)	217,450

IV-1.3.3. Comparaison entre le cas design et le cas design simulé

Après avoir simulé la colonne du débutaniseur C102 avec les paramètres opératoires sélectionnés, nous avons comparé les résultats obtenus avec ceux du cas design. L'ensemble des résultats de cette comparaison est regroupé dans les Tableaux IV-5, IV-6 et IV-7.

Tableau IV-5 : Comparaison des paramètres simulés avec ceux du cas design

Paramètres	Design	Design simulé	Écart relatif (%)
Température de tête (°C)	72,10	71,10	1,38
Température de fond (°C)	212,0	211,2	0,37
Température (°C) GPL	57,60	57,83	0,39
Débit de GPL (t/h)	37,060	37, 190	0,35
Température de Condensat (°C)	212,0	211,2	0,37
Débit de condensat (t/h)	164,430	164,520	0,054
Quantité de chaleur QC (kcal/h)	$1,1 \times 10^7$	$1,082 \times 10^7$	1,63
Quantité de chaleur QR (kcal/h)	$1,21 \times 10^7$	$1,206 \times 10^7$	0,33

Tableau IV- 6 : Comparaison des paramètres simulés avec ceux du cas design.

Constituents de la charge	Design		Design simulé	
	GPL	Condensat	GPL	Condensat
N ₂	0,001077	0	0,001075	0
CO ₂	0,000013	0	0,000014	0
CH ₄	0,000013	0	0,000014	0
C ₂ H ₆	0,002810	0	0,002800	0
C ₃ H ₈	0,532954	0,000255	0,531750	0,000167
iC ₄ H ₁₀	0,172641	0,008466	0,175351	0,006872
nC ₄ H ₁₀	0,289563	0,051672	0,288955	0,051674
iC ₅ H ₁₂	0,000818	0,075375	0,00038	0,075864
nC ₅ H ₁₂	0,000191	0,107927	0,0002	0,108153
C ₆ H ₁₄	0	0,144013	0	0,144198
C ₇ H ₁₆	0	0,140191	0	0,140370
C ₈ H ₁₈	0	0,113392	0	0,113538
C ₉ H ₂₀	0	0,093404	0	0,093524
C ₁₀ H ₂₂	0	0,068214	0	0,068302
C ₁₁ H ₂₄	0	0,053045	0	0,053113
C ₁₂ H ₂₆	0	0,144040	0	0,144225
Total	1,000080	0,999994	1,00005	1,000000

Tableau IV-7 : Spécifications des produits finis GPL et condensat

Paramètres	Design	Design simulé
Teneur en C2 ⁻ GPL %	0,2823	0,2817
Teneur en C5 ⁺ GPL %	0,1008	0,058
TVR Condensat (Kg/cm ²)	0,5097	0,5027

Les Tableaux ci-dessus révèlent que les valeurs des écarts relatifs entre le cas design et le cas design simulé sont inférieures à 10 %. De même, la composition des produits finis du cas design simulé est majoritairement identique à celle du cas design (Tableau IV-6), malgré une légère différence au niveau de la teneur des iC₅ et nC₅ contenue dans le GPL. Cette dernière confirme la précision de calcul du simulateur. Ainsi, nous pouvons conclure que les résultats obtenus témoignent que le modèle thermodynamique choisi (Peng Robinson) est

valide et peut-être utilisé dans notre étude.

IV-1.4. Simulation du cas actuel de la section du débutaniseur

IV-1.4.1. Caractéristiques de la charge

IV-1.4.1.1. Vérification des paramètres actuels du débutaniseur

Les compositions chimiques du cas actuel de l'alimentation du débutaniseur C102, sont obtenues par analyse chromatographique du produit de fond du déethaniseur C101 au niveau du laboratoire du Centre de Recherche et du Développement (CRD). Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau IV-8.

Tableau IV-8 : Composition du cas actuel de la charge du débutaniseur C102.

Constituants de la charge	Fractions molaires
N ₂	0,0000
CO ₂	0,0000
CH ₄	0,0022
C ₂ H ₆	0.0054
C ₃ H ₈	0.2573
iC ₄ H ₁₀	0.0935
nC ₄ H ₁₀	0,1455
iC ₅ H ₁₂	0.0869
nC ₅ H ₁₂	0.0981
C ₆ H ₁₄	0.0588
C ₇ H ₁₆	0.0616
C ₈ H ₁₈	0.0604
C ₉ H ₂₀	0.0348
C ₁₀ H ₂₂	0.0955
C ₁₁ H ₂₄	0.0000
C ₁₂ H ₂₆	0.0000
Total	1.0000

Par ailleurs, les paramètres actuels de la charge ainsi que les paramètres opératoires actuels sont répertoriés dans les Tableaux IV-9 et IV-10 respectivement.

Tableau IV-9 : Spécifications actuelles de la charge

Spécifications	Valeurs
Débit massique (t/h)	56
T (°C)	119
P (Kg/cm ²)	16,50

Tableau IV-10 : les paramètres opératoires actuel du débutaniseur C102.

Paramètres	Cas actuel
Température de tête (°C)	72
Température de fond (°C)	192
Température de rebouilleur (°C)	207
Débit de reflux (t/h)	36
Débit de rebouilleur (t/h)	180

IV-1.4.1.2. Etudes comparatives entre le cas actuel et le cas actuel simulé

Les paramètres résultants de la simulation sont comparés avec ceux du cas actuel, et sont regroupés dans les Tableaux IV-11, IV-12 et IV-13.

Tableau IV-11 : Comparaison des paramètres simulés avec ceux du cas actuel.

	Paramètres	Actuel	Actuel simulé	Écart relatif %
Tête de colonne	T (°C)	72	71,6	0,55
Fond de colonne	T (°C)	192	191,6	0,20
GPL	Débit (t/h)	18,17	18,23	0,33
Condensat	Débit (t/h)	37,72	37,61	0,29

Tableau IV-12 : Comparaison des spécifications des produits fini (GPL et condensât)

Paramètres	Cas actuel	Cas simulé
Teneur en C2 ⁻ GPL %	0,0178	0,0125
Teneur en C5 ⁺ GPL %	0,025	0,03
TVR Condensat (Kg/cm ²)	0,58	0,5709

Tableau IV-13 : Comparaison entre les compositions actuelles et simulées des produits finis GPL et condensat.

Composition	Cas actuel		Cas actuel simulé	
	GPL	Condensat	GPL	Condensat
N ₂	0	/	0	0
CO ₂	0	/	0	0
CH ₄	0	/	0,0000	0
C ₂ H ₆	0,0178	/	0,0125	0
C ₃ H ₈	0,5509	/	0,562355	0,000042
iC ₄ H ₁₀	0,1515	/	0,153239	0,002886
nC ₄ H ₁₀	0,2826	/	0,2794475	0,033647
iC ₅ H ₁₂	0,0001	/	0,0001	0,123951
nC ₅ H ₁₂	0,00015	/	0,0002	0,144719
C ₆ H ₁₄	0	/	0	0,198236
C ₇ H ₁₆	0	/	0	0,175084
C ₈ H ₁₈	0	/	0	0,075036
C ₉ H ₂₀	0	/	0	0,074090
C ₁₀ H ₂₂	0	/	0	0,069868
C ₁₁ H ₂₄	0	/	0	0,035348
C ₁₂ H ₂₆	0	/	0	0,066974
Total	1,00000	/	1,00000	1,0000

À partir des Tableaux IV-11, IV-12 et IV-13, nous remarquons que :

- Les températures de fond et de tête de la colonne, ainsi que les débits de production du cas actuel sont bien représentés par le simulateur, avec des écarts relatifs inférieurs à 3% ;
- La composition du GPL donnée par le simulateur HYSYS est très proche de celle du cas actuel, obtenue par analyse chromatographique au niveau du laboratoire du module IV ;
- La teneur en C₂⁻ et C₅⁺ du GPL, ainsi que la TVR du condensat dans le cas actuel simulé est presque identique à celle du cas actuel ;

Par conséquent, nous notons que les paramètres du cas actuel simulé sont conformes à ceux du cas actuel réel de la colonne.

IV-1.4.2. Répartitions des températures du cas actuel dans la colonne

Le profil de températures le long de la colonne est un paramètre représentatif de la stabilité de cette dernière. La Figure IV-7 présente le profil de température pris aux paramètres actuel du débutaniseur C102 qui sont :

- Débit de l'alimentation = 56 t/h ;
- $T_{\text{Alimentation}} = 119^{\circ}\text{C}$;
- $T_{\text{Tête}} = 72^{\circ}\text{C}$;
- $T_{\text{Fond}} = 192^{\circ}\text{C}$.

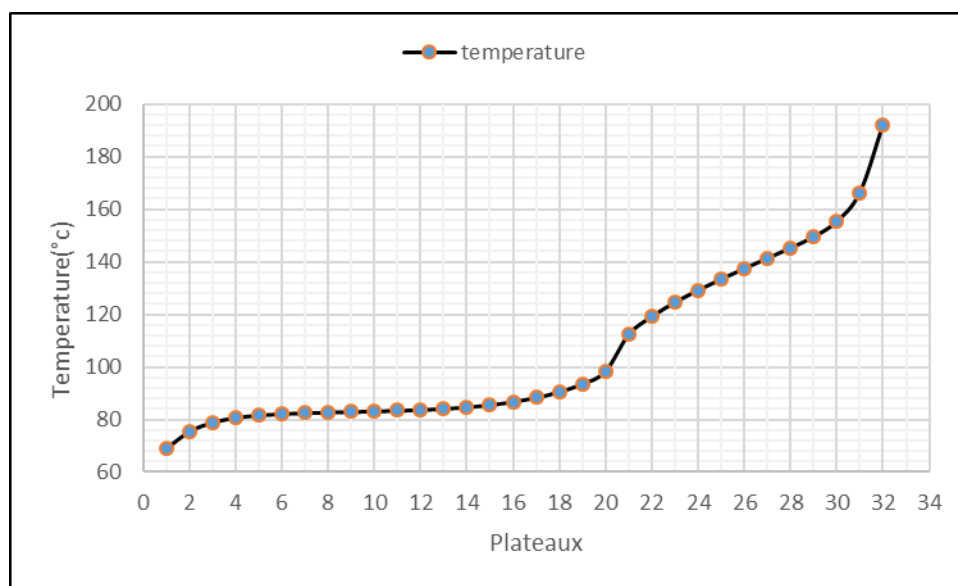


Figure IV-7 : Profil de température pour les paramètres actuels du débutaniseur

Cette courbe de profil de température, obtenue dans les conditions actuelles, est considérée comme une référence pour comparer la répartition des températures dans la suite de la simulation.

Au final de cette partie et après avoir comparé les valeurs des données des cas design et actuel avec ceux résultants du simulateur HYSYS, nous pouvons conclure que le modèle Peng Robinson et le schéma du débutaniseur C102 retenu par le simulateur HYSYS avec les spécifications attribuées (Figure IV-1), sont adéquats pour décrire le comportement des mélanges d'hydrocarbures étudiés dans la colonne de fractionnement C102.

IV-5. Effet de la variation de la température du fond de la colonne sur la qualité des produits finis

La procédure de simulation effectuée dans l'environnement HYSYS en se basant sur les paramètres actuels est décrite comme suit :

Nous avons choisi un intervalle de température entre 180°C et 198°C, au moment où les débits de reflux froid et reflux chaud étaient fixés à leurs valeurs initiales (36 t/h et 180 t/h respectivement), puis, nous avons noté pour chaque variation de température choisie les paramètres suivants :

- Débit des produits finis (GPL, Condensat) ;
- Température de tête et de rebouilleur ;
- Spécifications des produits finis ;
- Énergies fournies par le rebouilleur (Q_r) et récupérées au niveau du condenseur (Q_c).

Les résultats obtenus à partir de cette procédure de simulation sont représentés sous forme de graphes dans les Figures IV-8, IV-9, IV-10, IV-11 et IV-12 et sous forme de tableau récapitulatif en (Annexe D).

IV-5.1. Influence de la température du fond de la colonne sur la teneur en C_5^+

La Figure IV-8 montre que dans l'intervalle de température compris entre 180°C et 186°C, la présence des C_5^+ dans le GPL est quasiment nulle. Cependant, entre 186°C et 198°C, la teneur des C_5^+ s'accroît au fur et à mesure que la température augmente. Au fait, à partir d'une température d'environ 187°C, les C_5^+ commencent à apparaître dans le GPL. Cela est expliqué par le fait que la température d'ébullition des C_5^+ au fond de la colonne est atteinte, donc ils commencent à se vaporiser et montent vers le haut puis apparaissent dans le GPL.

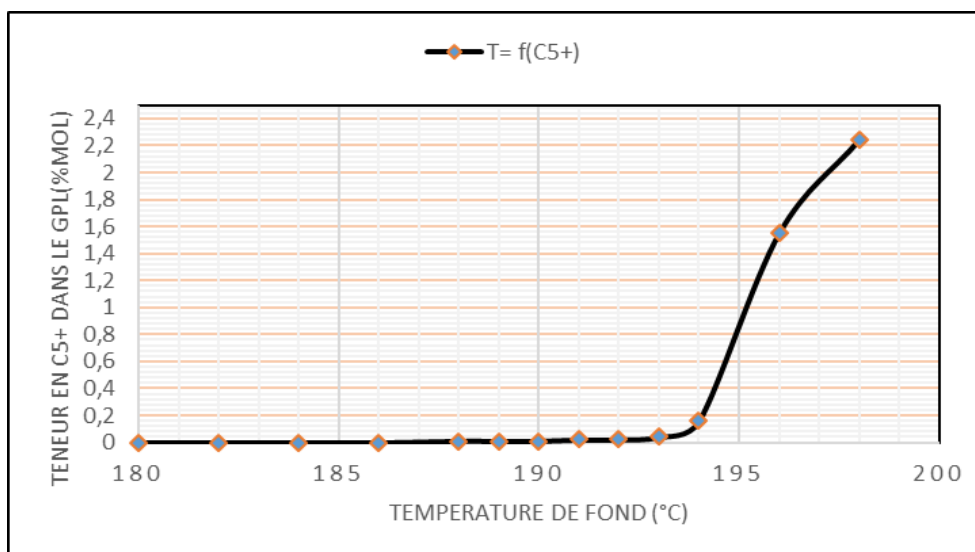


Figure IV-8 : Variation de la teneur en C_5^+ dans le GPL en fonction de la température du fond de la colonne.

IV-5.2. Influence de la température du fond de la colonne sur la TVR

D'après la Figure IV-9, nous pouvons constater que la température est inversement proportionnelle à la TVR du condensat. En effet, l'augmentation de la température du fond pousse les fractions légères présentes dans le condensat à se vaporiser. De ce fait, leur teneur dans ce dernier diminue, par conséquent la TVR diminue aussi.

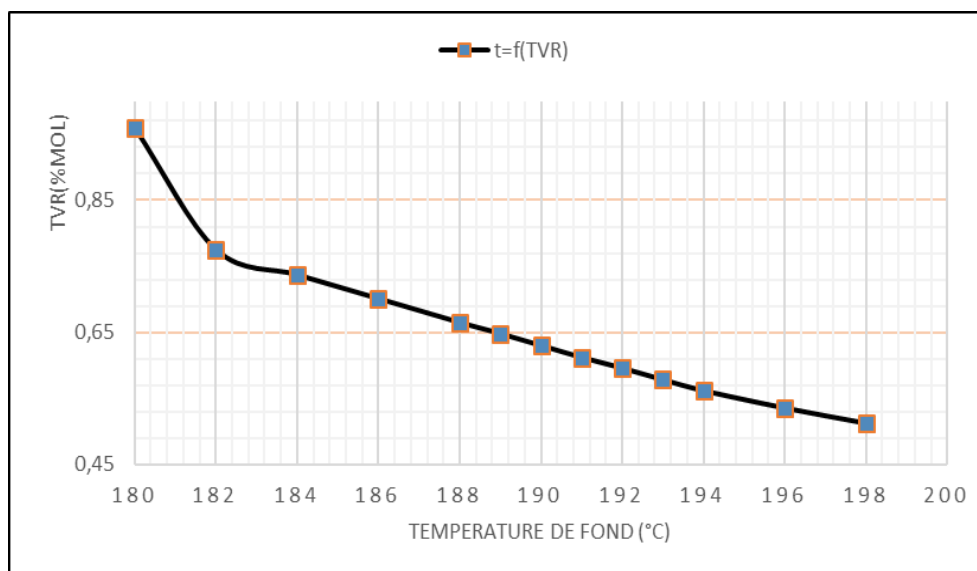


Figure IV-9 : La TVR en fonction de la température du fond de la colonne.

IV-5.3. Influence de la température du fond de la colonne sur le débit du condensat produit

La Figure IV-10 révèle que le débit de condensat produit varie inversement avec la température du fond de la colonne. En effet, l'augmentation de la température du fond de la colonne entraîne les $C5^+$ présents à son niveau vers la tête de la colonne, ce qui provoque une diminution du débit de condensat.

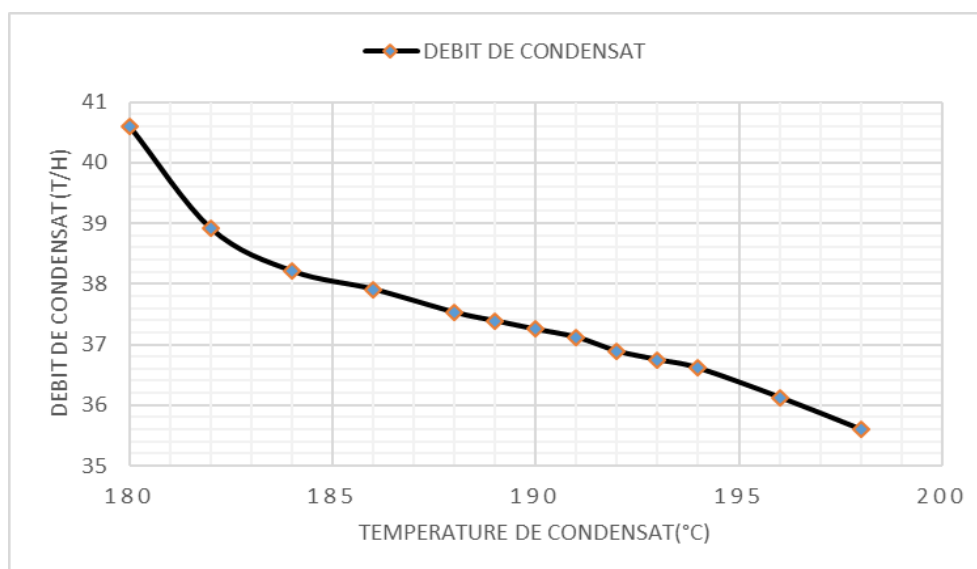


Figure IV-10 : Débit du condensât produit en fonction de la température du fond de la colonne.

IV-5.4. Influence de la température du fond de la colonne sur la consommation énergétique du condenseur E108

La Figure IV-11 montre que la température du fond de la colonne est proportionnelle à la consommation d'énergie du condenseur. Plus la température est élevée au fond de la colonne plus on fournit de l'énergie au niveau du condenseur E108 afin de pouvoir refroidir la tête de la colonne et conserver le profil de température déjà élaboré comme référence (cas actuel du debutaniseur : Figure IV-7). À titre d'exemple une variation de température de 4°C nécessite une consommation énergétique de: $3,8 \cdot 10^4$ kcal/h.

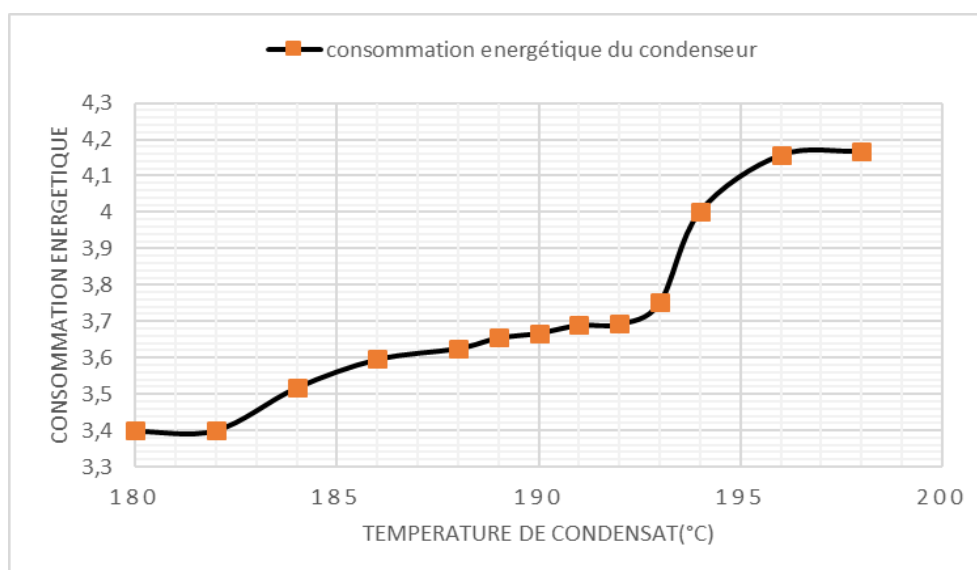


Figure IV-11 : Consommation énergétique du condenseur en fonction de la température du fond de la colonne.

IV-5.5. Influence de la température du fond de la colonne sur la consommation énergétique du rebouilleur

La Figure IV-12 montre que la température du fond de la colonne est proportionnelle à la consommation d'énergie (fuel gaz). L'augmentation de la température du fond nécessite une source d'énergie qui sera fournie par le fuel gaz qui alimente le four. De ce fait, plus on chauffe le fond plus on consomme de fuel gaz. Par exemple, pour une augmentation de température de 4°C une quantité de $1,19 \cdot 10^5$ Kcal/h est consommée.

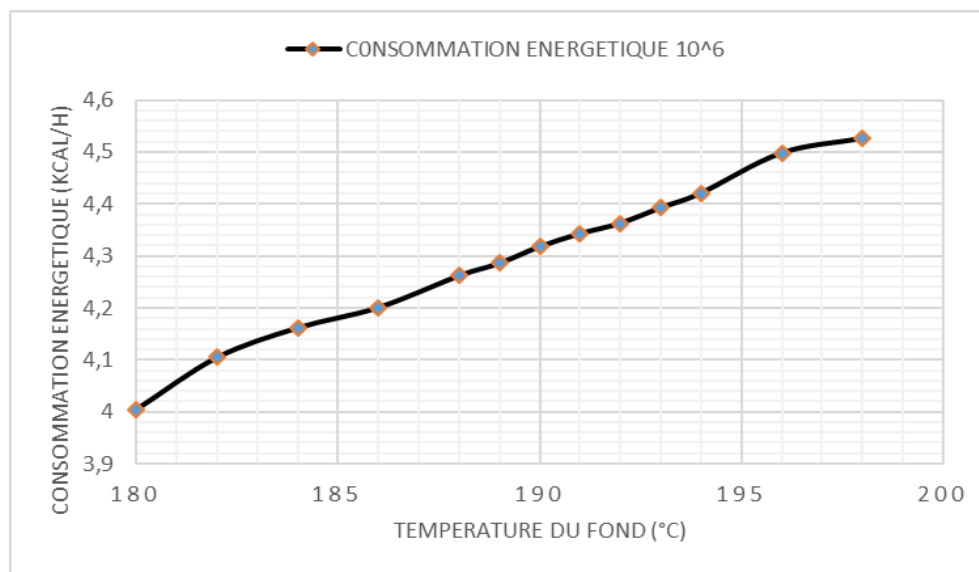


Figure IV-12: Consommation énergétique du rebouilleur en fonction de la température du fond de la colonne.

De cette partie portée sur l'étude de l'influence de la température du fond de la colonne sur le fonctionnement du débutaniseur C102, nous pouvons conclure que l'augmentation de la température du fond engendre :

- L'augmentation de la teneur de C_5^+ dans le GPL ;
- L'élévation de la consommation énergétique (condenseur, rebouilleur).

De ce fait, nous avons choisi l'intervalle des températures optimales qui se situe entre 189 °C et 194°C afin de pouvoir récupérer des produits qui répondent aux spécifications demandées.

IV-6. Effet de la variation du débit de reflux froid sur la qualité des produits finis

Pour réaliser cette étude, nous avons fait varier le débit de reflux froid qui vient du condenseur E108, entre 30 t/h et 40 t/h en fixant la température du fond de la colonne à une valeur de 190°C. Les résultats de cette variation du débit et son effet sur : le débit du condensat, la consommation en énergie (rebouilleur, condenseur), débit théorique de fuel gaz, la teneur de $C5^+$ dans le GPL, et la TVR du condensat sont regroupés dans le tableau (**Annexe E**).

IV-6.1. Influence du débit de reflux froid sur la teneur en $C5^+$ dans le GPL

La Figure IV-13 montre que l'augmentation du débit de reflux froid mène à la diminution de la teneur des $C5^+$ dans le GPL. Cette constatation est due au fait que le reflux froid abaisse la température de la tête de la colonne, ce qui signifie que les fractions lourdes ne sont pas entraînées dans le GPL.

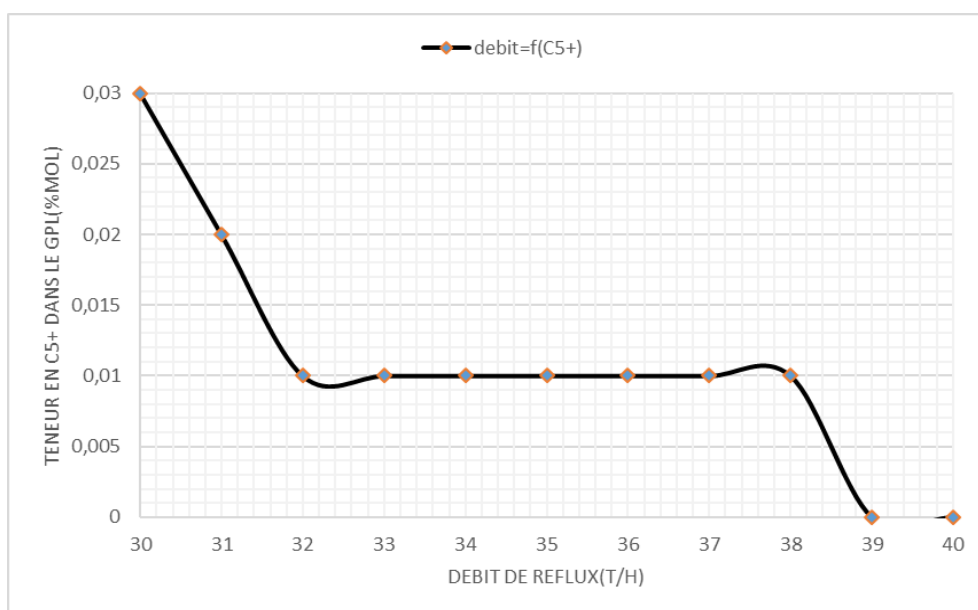


Figure IV-13 : Variation de la teneur en $C5^+$ dans le GPL en fonction du débit de reflux froid

IV-6.2. Influence du débit de reflux froid sur la TVR du condensat

Nous constatons, d'après la Figure IV-14, que la TVR varie inversement avec le débit de reflux froid, ce qui se traduit par le fait que les fractions légères ne soient pas présentes dans le condensat. Au fait, plus le débit de reflux froid augmente, plus la TVR diminue car une TVR élevée est interprétée par la présence des fractions légères dans le condensat.

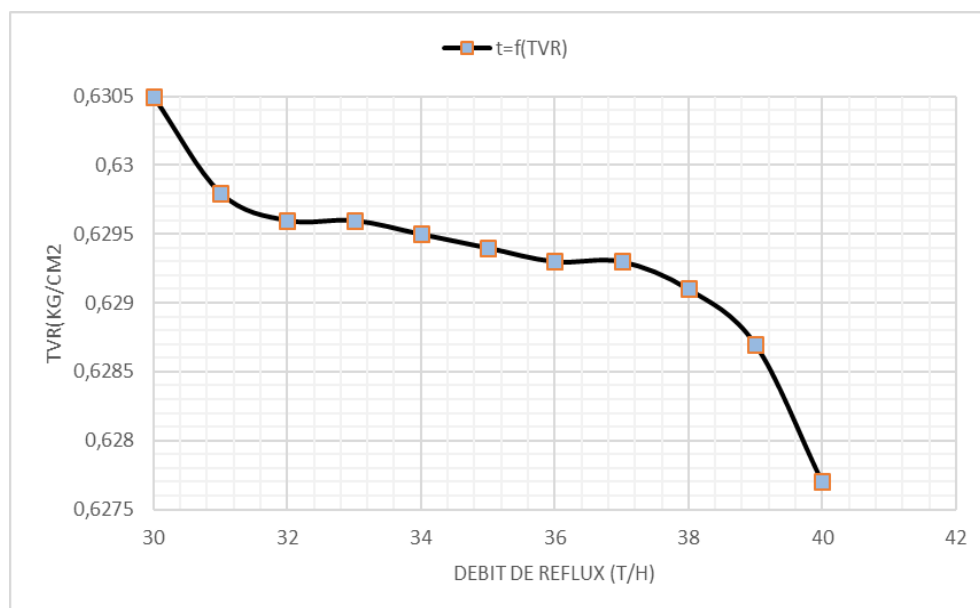


Figure IV-14 : Variation de la TVR du condensat en fonction du débit de reflux froid.

IV-6.3. Influence du débit de reflux froid sur le débit de Condensat

La Figure IV-15 reflète que le débit de reflux froids est proportionnel au débit du condensat produit. L'augmentation du débit de reflux abaisse la température de la tête de la colonne. A cet effet, il n'y a pas d'entraînement des $C5^+$, ce qui signifie que ces derniers restent au fond de la colonne.

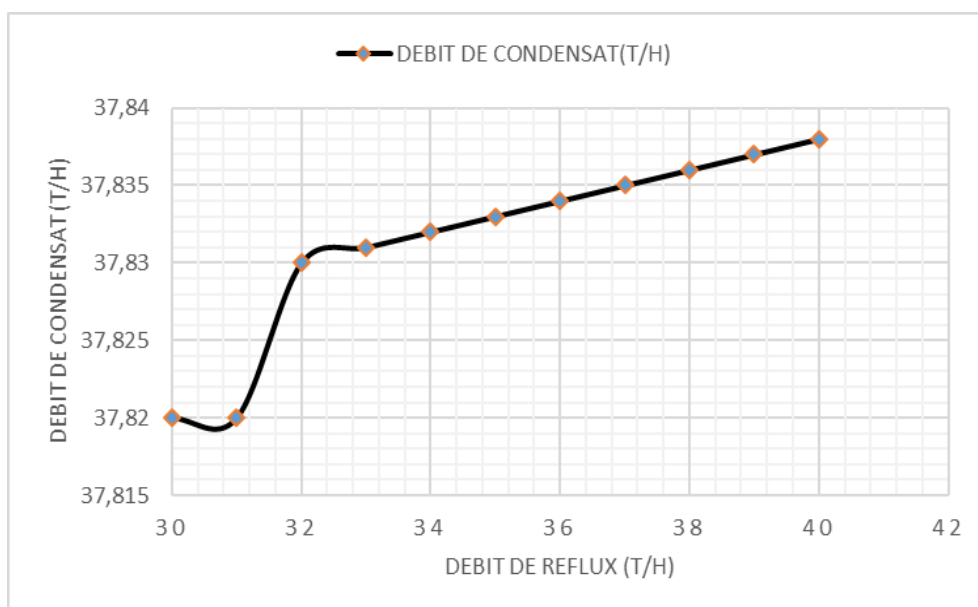


Figure IV-15 : Débit du condensât produit en fonction du débit de reflux.

IV-6.4. Influence du débit de reflux froid sur la consommation énergétique du condenseur

La Figure V-18 montre que plus le débit de reflux froid est important plus l'énergie fournie est importante, ce qui explique la variation proportionnelle du débit de reflux froid avec la consommation d'énergie Q_C . À titre d'exemple pour une augmentation de 2 t/h de reflux une quantité d'environ $6,9 \cdot 10^4$ Kcal/h est consommée.

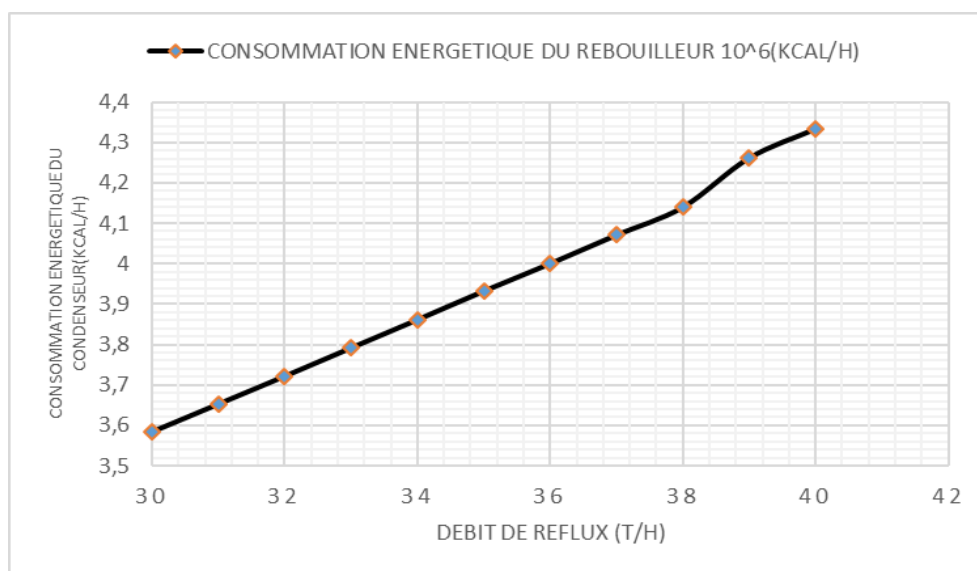


Figure IV-16 : Consommation énergétique du condenseur en fonction du débit de reflux

IV-6.5. Influence du débit de reflux sur la consommation énergétique du rebouilleur

La Figure IV-17 révèle que la consommation énergétique du rebouilleur augmente linéairement avec l'augmentation du débit de reflux froid. Plus le débit de reflux froid augmente, plus la température de la tête de la colonne diminue, plus on fournit de l'énergie au niveau du four H102 afin de pouvoir chauffer le fond de la colonne et conserver ainsi le profil de température déjà élaboré comme référence (cas actuel du débutaniseur : Figure IV-7). Par exemple une quantité d'énergie de $9 \cdot 10^4$ Kcal/h est consommée pour une augmentation de 2 t/h de reflux froid.

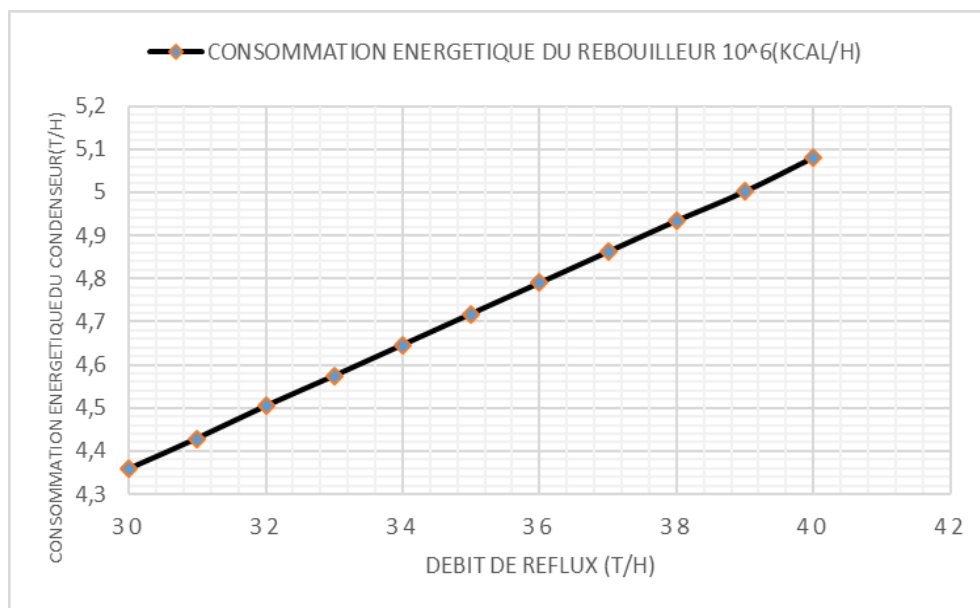


Figure IV-17 : Consommation énergétique du rebouilleur en fonction de la température du fond de la colonne.

De cette partie portée sur l'étude de l'influence du débit de reflux froid récupéré au niveau du condenseur E108 sur le fonctionnement du débutaniseur C102, nous pouvons conclure que l'augmentation du débit de reflux froid engendre :

- L'augmentation du débit de condensat produit,
- L'augmentation de la consommation énergétique au niveau du condenseur E108 et du rebouilleur H102 ;
- La diminution de la TVR.

Au vu de cette tendance nous avons choisi de travailler avec un débit de reflux froid optimal de 32 (t/h) afin de garder un équilibre entre un maximum de condensat produit et une consommation d'énergie minimale tout en respectant les spécifications exigées.

Partie 2 : Etude du débutaniseur C102 par la méthodologie des plans d'expériences

Partie 2 : Etude du débuteur C102 par la méthodologie des plans d'expériences

VI-2.1. Objectif de la méthodologie des plans d'expériences

La méthode des plans d'expériences vise à organiser de façon économique et rationnelle une expérience dépendant de plusieurs paramètres. Cette méthode permet d'assurer la qualité des résultats de l'expérience tout en apportant le maximum de renseignements pour un minimum d'expériences à réaliser. Ainsi, dans cette partie, nous avons fait appel aux plans de surfaces de réponses basés sur le plan composite centré pour définir le fonctionnement de la section de fractionnement débuteur C102 du module IV et optimiser ainsi ses conditions opératoires (température de rebouillage (x_1), débit de reflux froid (x_2) et la température de condensation (x_3)),

VI-2.2. Modélisation des paramètres du débuteur C201 par le plan composite centré

Afin de pouvoir établir l'équation du modèle mathématique représentatif du plan composite centré, adapté pour l'étude de la tension de vapeur Reid (TVR) du condensat produit, calculé d'après le HYSYS, au niveau du débuteur C102, il est recommandé de définir les paramètres expérimentaux constants et ceux qui sont variés au cours des expériences. De ce fait, le débit d'alimentation de la colonne et le taux de rebouillage sont gardés constants alors que la température de rebouillage (four H102), le débit de reflux (condenseur E108) et la température du condensat prennent alternativement les valeurs indiquées dans Tableau IV-14.

Tableau IV-14 : Valeurs des paramètres opératoires à différents niveaux.

Variables réelles	Variables centrées Réduites	Niveau bas		Point central	Niveau haut	
		$\alpha = -1,68$	-1	0	+1	$\alpha = +1,68$
z_1 : T° rebouillage (C°)	x_1	205	206,68	208,5	210,32	212
z_2 : Débit de refflux (m³/h)	x_2	32	33,68	36	38,32	40
z_3 : T° condensation (C°)	x_3	30	31,68	37,5	43,32	45

IV-2. 2.1. Elaboration du modèle de second degré

L'équation du modèle de second degré avec interaction, pour trois paramètres opératoires, associée au plan composite centré orthogonal s'écrit sous la forme :

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (Eq. IV - 1)$$

Pour élaborer le modèle de second degré, nous réalisons les essais du plan factoriel complet à deux niveaux ($2^{k=3}$), les essais au centre du domaine d'étude et les expériences complémentaires en étoile ($2k$). Les valeurs des paramètres correspondants aux essais en étoile sont consignées dans le Tableau IV-1 tandis que la matrice des expériences adaptées pour réaliser ce plan composite de second degré est représentée sur le Tableau IV-15.

IV-2.2.2. Calcul des coefficients du modèle

L'estimation des coefficients de l'équation de régression (Eq.IV-1) se fait par le calcul du produit matriciel suivant: $B = [X^T X]^{-1} X^T Y$. Les résultats de ce calcul sont rassemblés dans le Tableau IV-16.

IV-2.2.3. Analyse statistique de l'équation de régression

IV-2.2.3.1. Vérification de la signification des coefficients

La signification des coefficients de régression du modèle postulé (Eq.IV-1) est vérifiée par le test statistique de Student. Pour cela, il faut déterminer d'abord:

- la variance de reproductibilité (S_{rep}^2); calculée en utilisant les douze essais effectués au centre du domaine d'étude, soit $S_{rep(TC)}^2 = 2,045.10^{-05}$;

l'écart type S_{bj} pour chaque effet, soit :

$$\sqrt[2]{S_{bj}^2} = \sqrt[2]{C_{jj} S_{rep}^2}$$

- (C_{jj} : éléments de la diagonale de la matrice de dispersion $[X^T.X]^{-1}$ (**Annexe F**).

Puis calculer les t_j correspondant à chaque effet. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le Tableau IV.17.

Pour le niveau de signification bilatéral et le nombre de degré de liberté pour $f = n_0 - 1 = 11$, la valeur tabulée du test de Student $t_{p=0,05}(11) = 2,20$. (**Annexe B**). Comme les valeurs de t_{12} , t_{13} , t_{23} et t_{11} , t_{22} sont inférieures à cette valeur, alors les coefficients b_{12} , b_{13} , b_{23} , b_{11} et b_{22} sont donc non significatifs et par conséquent éliminés de l'équation de régression.

Tableau IV-15 : Matrice des expériences correspondant à un modèle de second degré.

N°	Valeurs réelles			Valeurs réduites			Réponse
	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3	y (TVR)
1	206,68	33,68	31,68	-1	-1	-1	0,625
2	210,32	33,68	31,68	+1	-1	-1	0,562
3	206,68	38,32	31,68	-1	+1	-1	0,613
4	210,32	38,32	31,68	+1	+1	-1	0,560
5	206,68	33,68	43,32	-1	-1	+1	0,683
6	210,32	33,68	43,32	+1	-1	+1	0,619
7	206,68	38,32	43,32	-1	+1	+1	0,667
8	210,32	38,32	43,32	+1	+1	+1	0,602
9	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
10	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
11	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
12	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
13	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
14	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
15	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
16	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
17	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
18	208,5	36	37,5	0	0	0	0,6099
19	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
20	208,5	36	37,5	0	0	0	0,610
21	205	36	37,5	-1,68	0	0	0,677
22	212	36	37,5	1,68	0	0	0,553
23	208,5	32	37,5	0	-1,68	0	0,620
24	208,5	40	37,5	0	1,68	0	0,601
25	208,5	36	30	0	0	-1,68	0,568
26	208,5	36	45	0	0	1,68	0,667

Tableau IV-16 : Coefficients du modèle de second degré.

Terme constant		Effets linéaires			
b ₀		b ₁	b ₂	b ₃	
0,609		-0,033	-0,0057	0,028	
Effets d'interactions			Effets quadratiques		
b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃
0,0011	-0,0016	-0,023	0,0020	0,00043	0,0034

Tableau IV-17 : valeurs de t_j .

Terme constant		Effets linéaires			
t ₀		t ₁	t ₂	t ₃	
467,454		27,135	4,724	22,887	
Effets d'interactions			Effets quadratiques		
t ₁₂	t ₁₃	t ₂₃	t ₁₁	t ₂₂	t ₃₃
0,703	1,016	1,485	1,831	0,390	3,111

IV-2.2.3.2. Test de validation de l'équation de régression

- **Recherche de biais**

La valeur calculée de la variance résiduelle $S_{rés}^2$ pour $N=26$ et $\ell=5$ est de l'ordre de $1,889 \cdot 10^{-05}$. Ce qui nous donne un : $F = 0,923$.

La valeur tabulée du test de Fisher-Snedecor, pour le niveau de signification $\alpha = 0,05$ et les nombres de degrés de liberté $f_1 = N - \ell = 21$ et $f_2 = n_0 - 1 = 11$, varie entre 2,61 et 2,65. Cette valeur étant supérieur à la valeur calculée, le modèle est alors considérée sans biais.

- **Test de signification de la régression**

Pour le niveau de signification $\alpha = 0,05$ et les nombres de degrés de liberté $f_1 = \ell - 1 = 4$ et $f_1 = N - \ell = 21$, la valeur du test de Fisher tabulée est égale à 2,84. La valeur de F calculée ($F = 350,709$) étant supérieure à celle tabulée, l'équation de régression est adéquate et le modèle est validé à 95%. L'équation retenue pour le modèle s'écrit donc :

$$\hat{y} = 0,609 - 0,332 x_1 - 0,0057 x_2 + 0,028 x_3 + 0,0034 x_3^2 \quad (Eq. IV - 2)$$

IV-2.2.4. Evaluation de la qualité du modèle

IV-2.2.4.1. Coefficient de détermination R^2

Pour évaluer le degré d'explication de notre modèle par rapport aux réponses mesurées, nous avons fait appel au coefficient de détermination : $R^2 = 0,988$. Sa valeur est pratiquement proche de 1, ce qui signifie que toutes les variations de la réponse (y), dans le domaine d'étude choisi, sont expliquées convenablement par l'équation de régression postulée.

IV-2.2.4.2. Comparaison entre les réponses prédites et les réponses expérimentales

L'évaluation du modèle élaboré peut se faire aussi via le calcul des erreurs relatives données par la différence entre les valeurs des réponses expérimentales et celles prédites par le modèle suivant la relation ci-dessous :

$$\text{Erreurs (\%)} = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \quad (\text{Eq. IV - 3})$$

Avec :

y_i : réponse mesurée expérimentalement ;

\hat{y}_i : réponse calculée à partir du modèle prédit.

Les résultats de la comparaison des réponses obtenues expérimentalement à celles calculées par le modèle sont consignés dans le Tableau IV-18.

L'observation des erreurs relatives répertoriées dans ce Tableau, montre que l'écart maximal entre les TVR mesurées expérimentalement (y_i) et celles données par le modèle mathématique prédit (\hat{y}_i) n'atteint pas 5%, ce qui permet d'avancer que l'équation de second degré retenue pour expliquer la variation de la TVR en fonction de la température de rebouillage, du débit de reflux et de la température de condensation simule très bien l'expérience dans tout le domaine d'étude.

Tableau V-18 : Valeurs des erreurs relatives aux frontières du domaine d'étude.

N°	y	\hat{y}	Erreur (%)
1	0,625	0,6244	0,096
2	0,562	0,5579	0,729
3	0,613	0,6128	0,032
4	0,560	0,5463	2,446
5	0,683	0,6804	0,380
6	0,619	0,6140	0,807
7	0,667	0,6688	0,269
8	0,602	0,6024	0,066
9	0,610	0,6099	0,0163
10	0,610	0,6099	0,0163
11	0,610	0,6099	0,0163
12	0,610	0,6099	0,0163
13	0,610	0,6099	0,0163
14	0,610	0,6099	0,0163
15	0,610	0,6099	0,0163
16	0,610	0,6099	0,0163
17	0,610	0,6099	0,0163
18	0,6099	0,6099	0,0163
19	0,610	0,6099	0,0163
20	0,610	0,6099	0,0163
21	0,677	0,6657	1,669
22	0,553	0,5541	0,198
23	0,620	0,6196	0,064
24	0,601	0,6002	0,133
25	0,568	0,5726	0,809
26	0,667	0,6667	0,044

Dans le même contexte d'évaluation, le tracé des valeurs de TVR mesurées expérimentalement (y_i) en fonction de celles données par le modèle mathématique (\hat{y}_i) révèle une cohérence parfaite qui traduit l'absence de toutes erreurs systématiques.

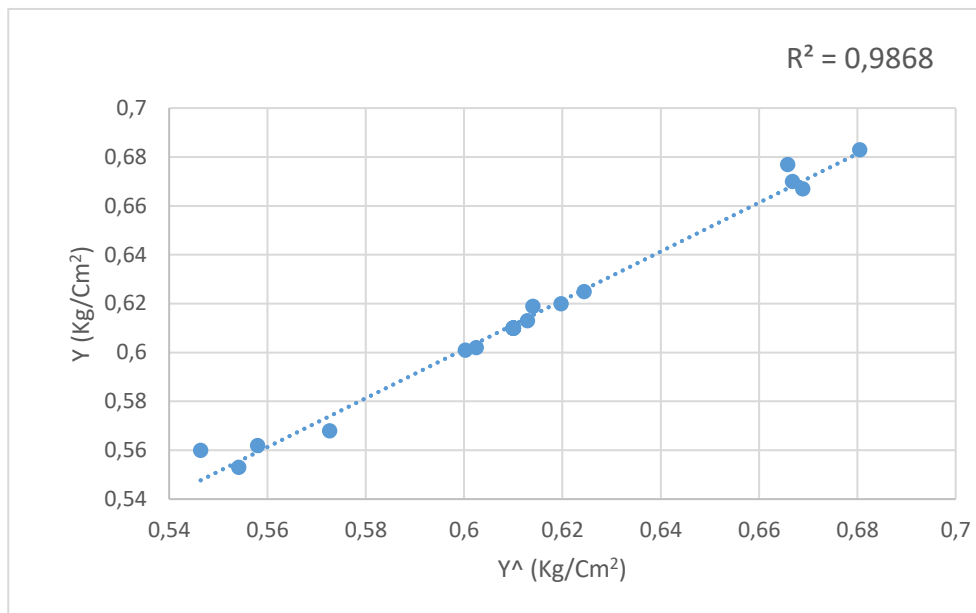


Figure IV-18 : Comparaison entre les valeurs des réponses prédites et celles données par l'expérience

IV-2.2.4.3. Evaluation par les points au centre

Dans ce test d'évaluation, nous comparons la valeur de la TVR calculée à partir du modèle au centre du domaine d'étude $\hat{y}(0, 0, 0) = 0,6099$ à la moyenne des 12 expériences effectuées au centre, soit $\bar{y}_0 = 0,609$. L'écart absolu entre ces deux valeurs étant nul, ce qui confirme que le modèle linéaire du second degré, simule bien le procédé pour le niveau de signification choisi.

IV-2.2.4.4. Analyse des résidus

L'évaluation de la qualité du modèle du second degré peut être faite par une analyse des résidus. Ainsi, le diagramme ci-dessus (Figure IV-19) ne laisse apparaître aucune relation entre les valeurs \hat{y} et les résidus (e_i), car les points semblent disposés aléatoirement. Ce résultat traduit l'absence d'informations dans les résidus, donc toute l'information est expliquée par le modèle de régression choisi. En conclusion, le modèle de second degré obtenu simule parfaitement l'optimisation des paramètres opératoires de débiteur C 102.

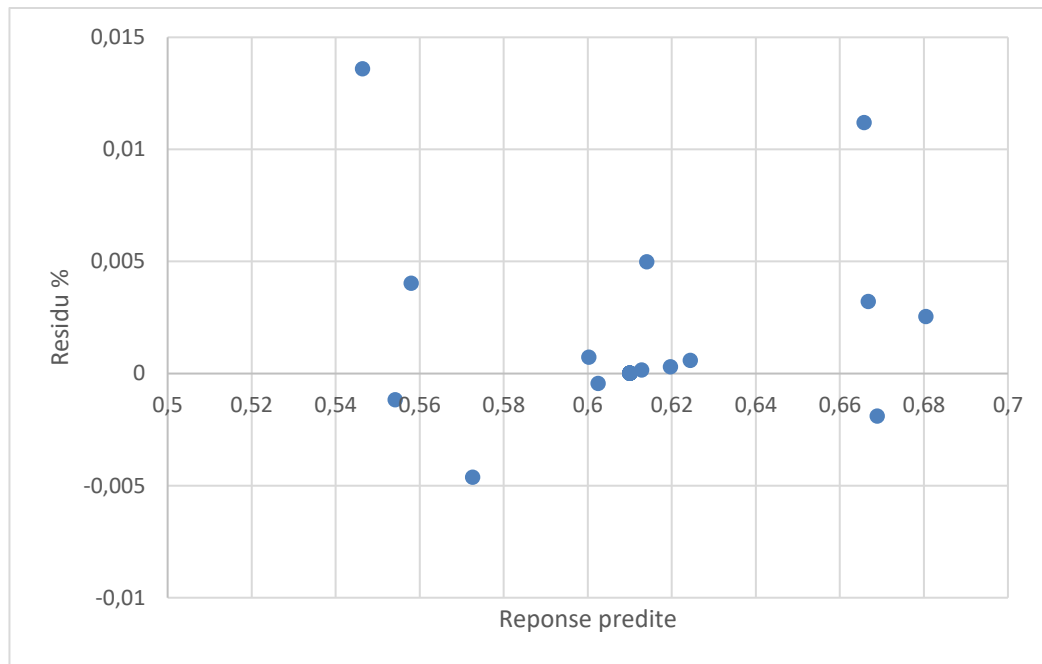


Figure IV-19 : Diagramme des résidus

IV-2.2.5. Exploitation du modèle de second degré

L'analyse du modèle établi précédemment (*Eq.IV-2*) nous indique que le paramètre qui influe beaucoup plus sur la TVR est la température de rebouillage du fond de colonne ($b_1 = -0,332$) avec un effet négatif, puis température de condensation au sommet de la colonne ($b_3 = +0,028$) avec un effet positif. Cependant, le débit de reflux froid ($b_2 = -0,0057$) influent négativement. L'augmentation de la température de rebouillage et du débit de reflux froid induit la diminution de la TVR. Aucune interaction n'est enregistrée dans le domaine d'étude (FigureVI-20).

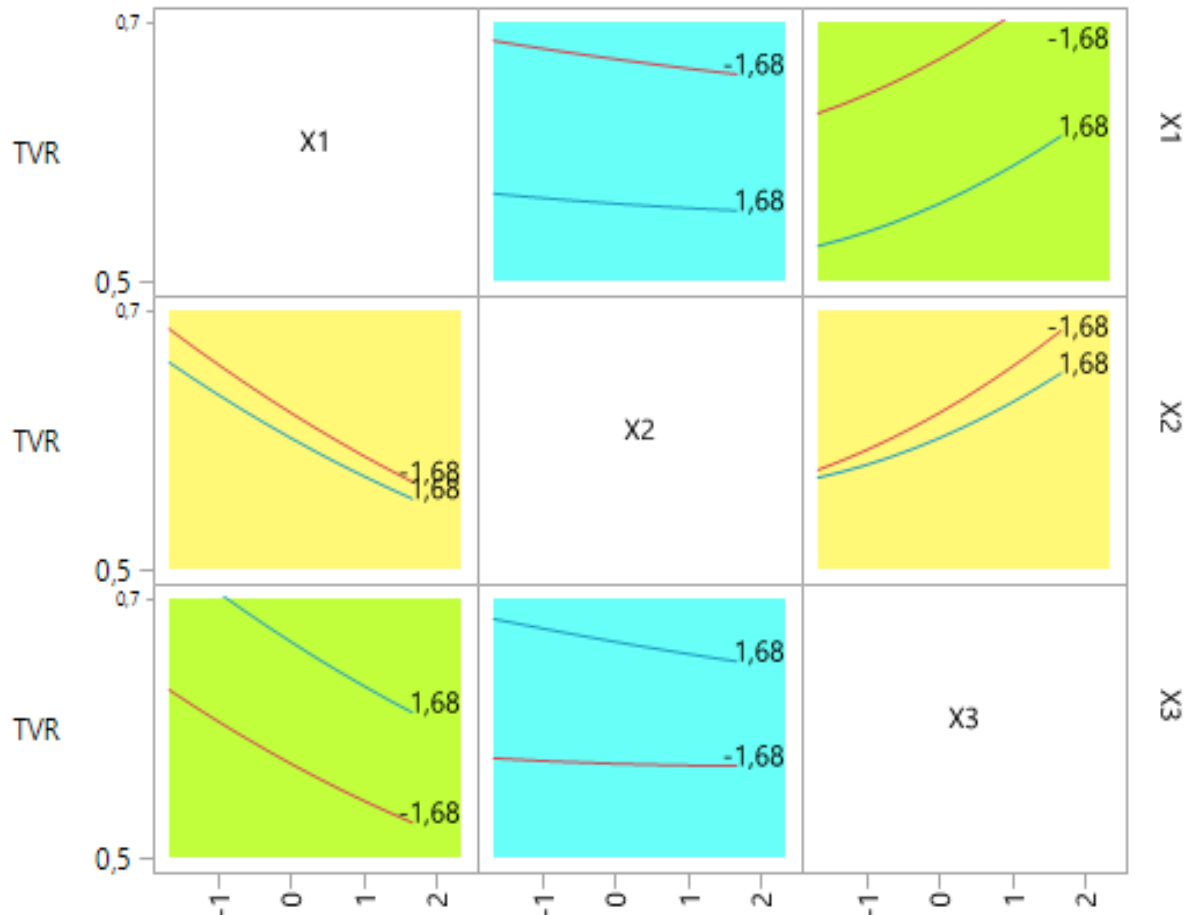


Figure VI-20 : Courbes d'interactions tracées par le JMP.

VI-2.3. Optimisation des paramètres du débutaniseur C201

L'utilisation du modèle de second degré précédemment établi pour l'étude de la variation de la TVR dans le débutaniseur C102 (*Eq.IV-2*), permet d'accéder à la combinaison des trois paramètres opératoires conduisant à la meilleure réponse désirée. Cette recherche d'optimum se fait par une résolution graphique en utilisant le tracé des courbes de surfaces de réponses et d'iso-réponses.

- **Courbes de surfaces de réponses**

La surface de réponses obtenue en traçant la TVR dans le plan $x_1 - x_2$: Température de rebouillage - Débit de reflux froid pour $x_3 = -0,41$, est représentée sur la Figure IV-21. Le tracé est réalisé à l'aide du logiciel JMP.

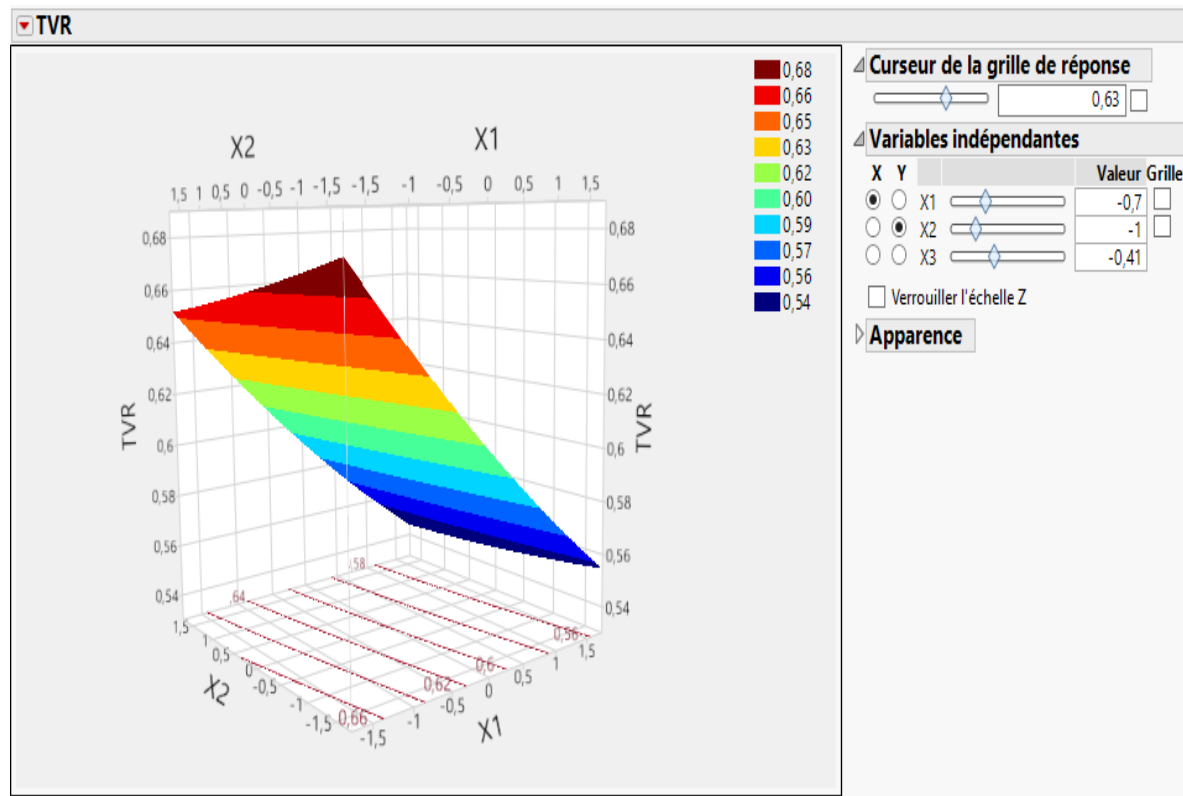


Figure VI-21 : Courbe de Surface de réponses de la TVR dans le plan $x_1 - x_2$: Température de rebouillage - Débit de reflux froid pour $x_3 = -0,41$.

Ce tracé n'exhibe aucun extremum dans le domaine d'étude ce qui confirme que l'optimum recherché sort du domaine expérimental considéré.

- **Courbes isoréponses**

Vue leur importance, le tracé des courbes des isoréponses doit accompagner les courbes de surfaces de réponses afin de visualiser l'optimum et de cerner la zone où se situent les meilleures réponses. La Figure IV-22 représente la projection de la courbe de surfaces de réponses de la Figure IV-21. Elle laisse apparaître des courbes de niveaux correspondants à différentes valeurs de la TVR. Pour une réponse donnée, il est facile alors de choisir les conditions opératoires appropriées et qui sont données par le couple Température de rebouillage - Débit de reflux froid, pour $x_3 = -0,41$.

L'examen de cet abaque permet de déduire que la meilleure TVR est de $\approx 0,63 \text{ Kg/cm}^2$ est obtenue pour; $x_1 = 207,24^\circ\text{C}$, $x_2 = 33,68 \text{ t/h}$, $x_3 = 35,11^\circ\text{C}$ correspondant respectivement au température de rebouillage, débit de reflux froid et température de condensation

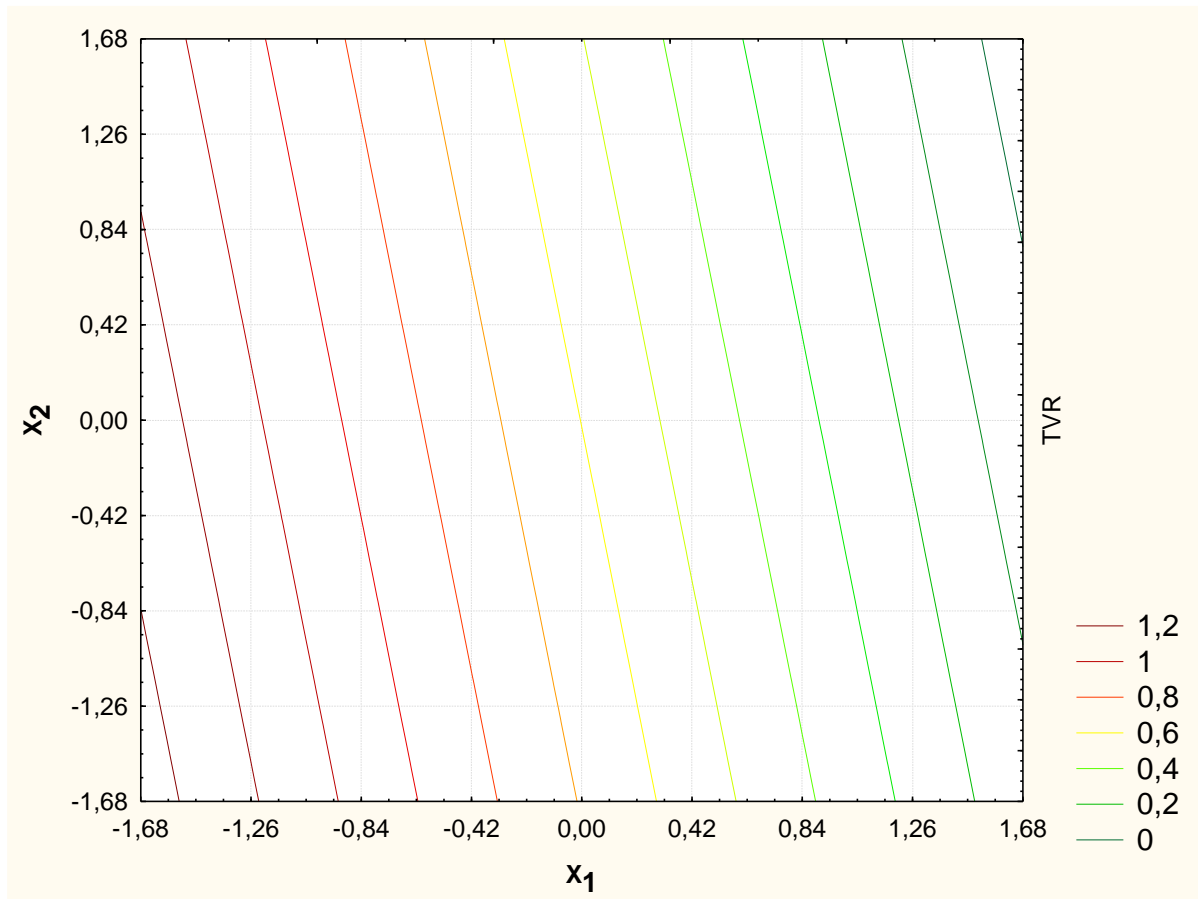


Figure VI-22 : Courbe isoréponses de la TVR dans le plan $x_1 - x_2$: Température de rebouillage - Débit de reflux froid pour $x_3 = -0,41$.

IV-2.4. Résultats de simulation après optimisation

IV-2.4.1. Comparaison entre le cas actuel et le cas actuel optimisé

Les résultats du cas optimisé et ceux du cas actuel sont regroupés dans les Tableaux IV-19 et IV-20.

Tableau VI-19 : paramètres avant et après optimisation.

Paramètres	Avant optimisation	Après optimisation
Temperature de fond (°C)	192	190
Temperature de rebouillage(°C)	209	207,24
Débit de reflux de tête (t/h)	36	33,68
Temperature de condensation (°C)	40	35,11

Tableau VI-20 : Comparaison entre les cas actuel et optimisé

Paramètres	Cas actuel	Cas optimisé
Température de fond (°C)	192	190
Débit de Condensât (t/h)	37,72	37,83
Débit de GPL (t/h)	18,17	18,13
Teneur en C2 ⁻ du GPL (% mol)	1,78	1,11
Teneur en C5 ⁺ du GPL (% mol)	0,025	0,01
TVR Condensat a 37,8°C (Kg/cm ²)	0,58	0,63
Énergie du rebouilleur $Q_R \cdot 10^6$ (Kcal/h)	4,900	4,504
Énergie du condenseur $Q_C \cdot 10^6$	4756	4244

D'après les résultats obtenus figurants dans le Tableau VI-20 nous remarquons que :

- la température du fond optimisée est légèrement inférieure à celle du cas actuel ;
- le débit du reflux froid optimisé est réduit par rapport au débit du reflux du cas actuel ;
- le débit du condensât produit dans le cas optimisé est légèrement supérieur à celui du cas actuel. Cette différence peut être expliquée par la présence d'une légère quantité de Condensât (C5⁺) dans le GPL dans le cas actuel tout en respectant les spécifications en étant inférieur à 0,4% ;
- le débit de GPL est proche du cas optimisé ;
- La TVR du condensât est légèrement supérieure à celle du cas optimisé ;
- la consommation énergétique dans le cas optimisé est inférieure à celle consommée actuellement.

En guise de conclusion à cette étude, on peut déduire que les paramètres optimaux que nous avons trouvés ont un effet favorable sur le fonctionnement du débiteur C102.

IV-2.5. Profils des paramètres opératoires le long de la colonne

IV-2.5.1. Profil des débits liquide-vapeur

La Figure VI-24 et par référence à la Figure VI-23 (cas design) montre que les profils des débits molaires liquides et vapeurs, présentent une stabilité dans la colonne avant et après le plateau d'alimentation. Les lignes parallèles expliquent l'équilibre liquide-vapeur dans chaque plateau. Une rupture du profil est enregistrée au niveau du plateau d'alimentation (21^{ème} plateau), chose qui est due aux conditions d'entrée de la charge.

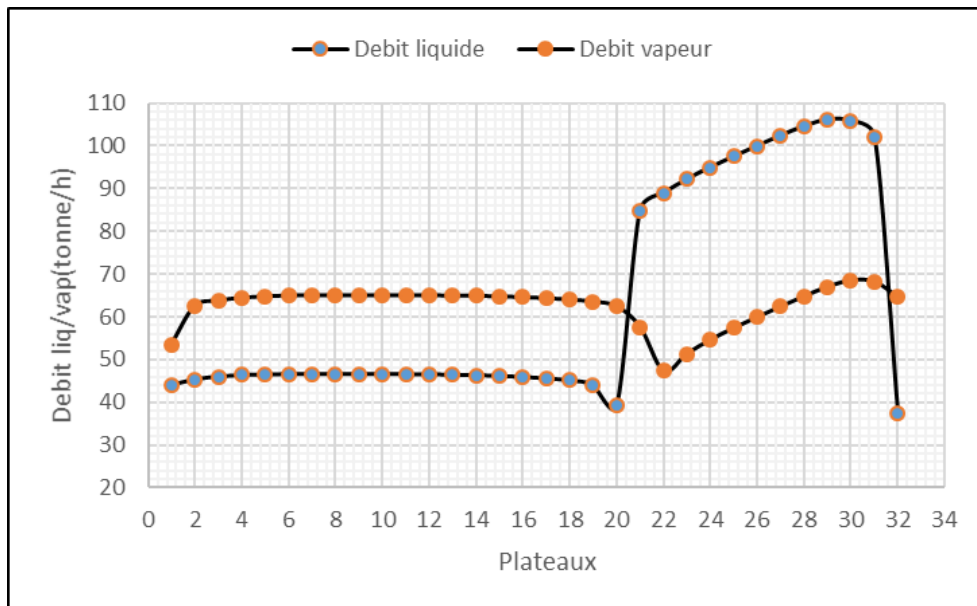


Figure VI-23 : Profils des débits liquide-vapeur dans le cas design simulé

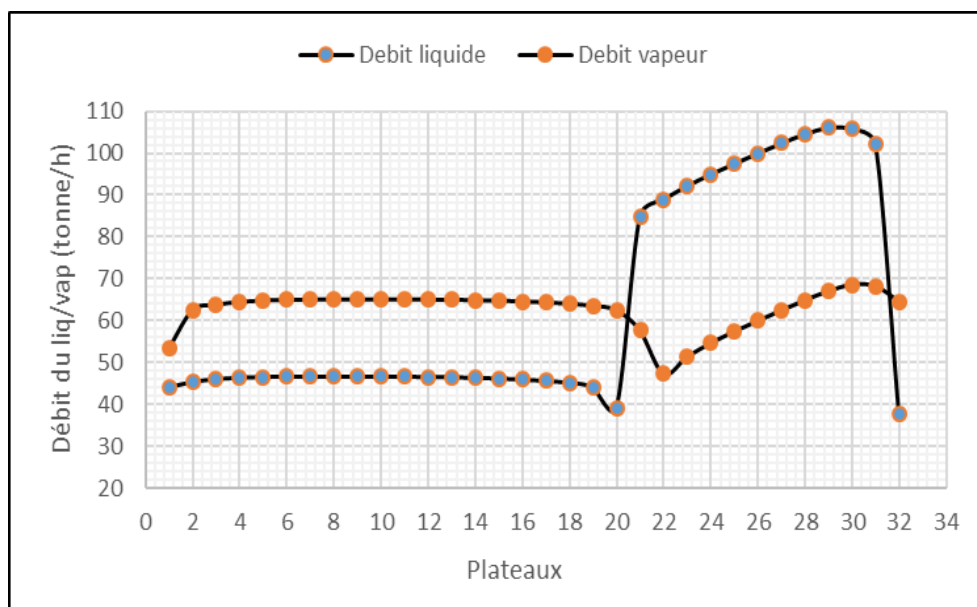


Figure VI-24 : Profils des débits liquide-vapeur dans le cas actuel optimisé

IV-2.5.2. Profil des pressions

Les Figures VI-25 et VI-26 témoignent, encore une fois de plus, la stabilité de la colonne dans le cas actuel optimisé, en montrant une élévation progressive de la pression du haut (1^{er} plateau) vers le bas de la colonne (32^{ème} plateau), ce qui est nécessaire à la montée des vapeurs du fond vers la tête, et donc au bon fonctionnement de la colonne.

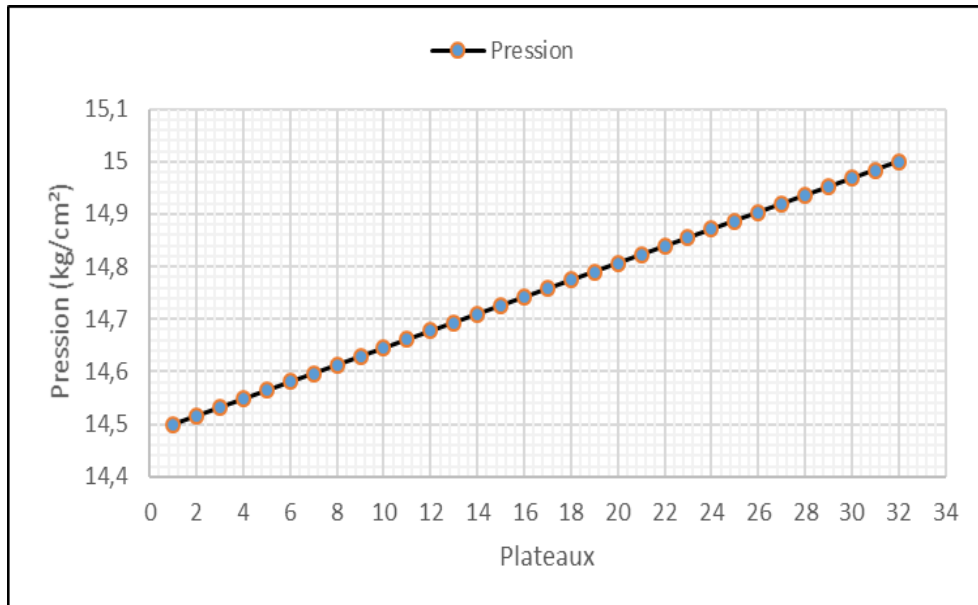


Figure VI-25 : Profils de pression dans le cas design simulé

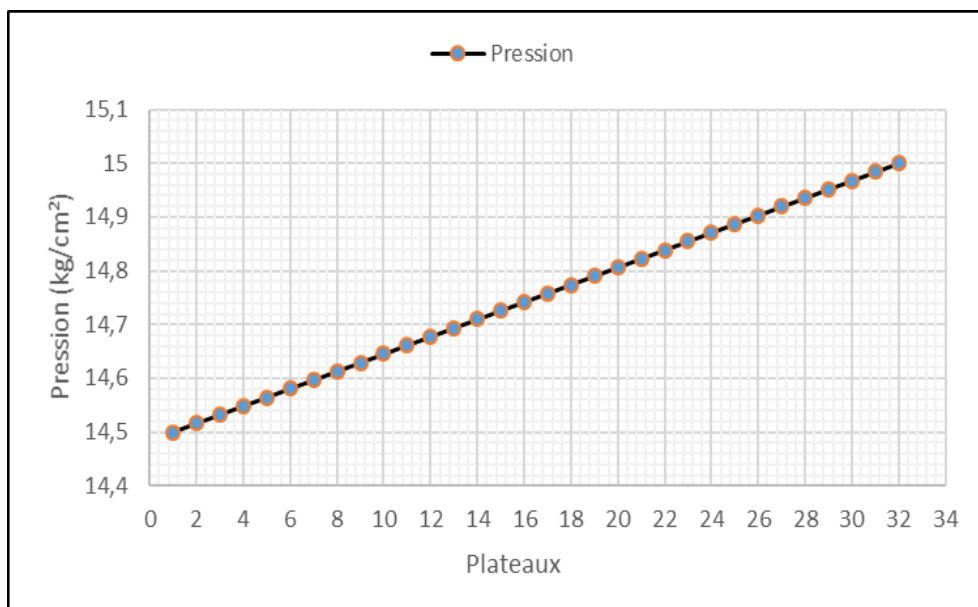


Figure VI-26 : Profil de pression dans le cas actuel simulé optimisé

IV-2.5.3. Profil des températures

La Figure VI-27 et VI-28 montre l'allure de la répartition des températures pour le cas actuel optimisé. Sachant que :

- la température de rosée de la vapeur de tête est de $68,37^{\circ}\text{C}$;
- la température d'ébullition du liquide est de 190°C .

le gradient de température est vérifié tout au long de la colonne fonctionnant sous les conditions design et optimales. La température intermédiaire au 24^{ème} plateau (température de bulle) est toujours maintenue à $131,8^{\circ}\text{C}$ dans le cas optimal, ce qui confirme l'évaporation du GPL.

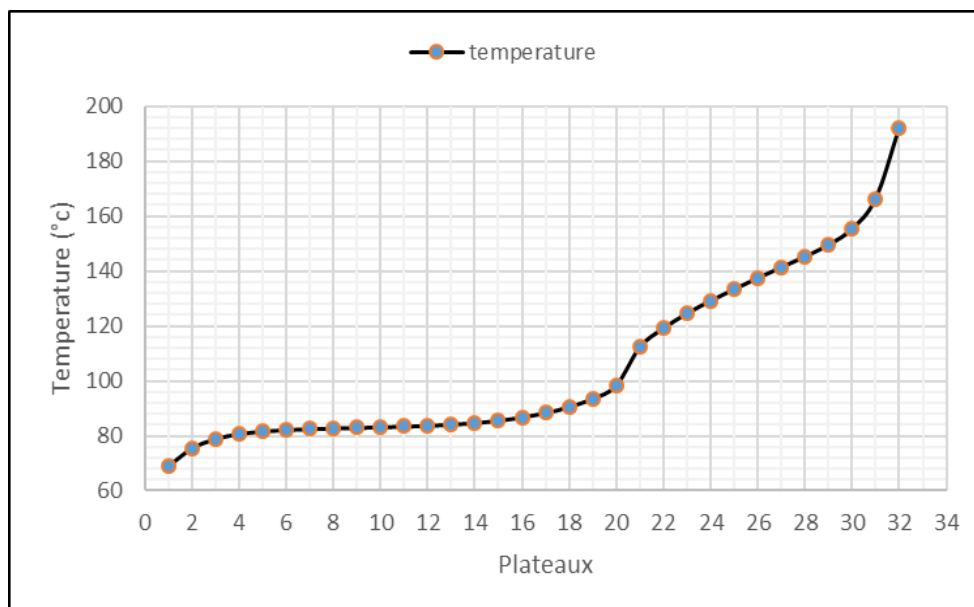


Figure VI-27 : Profils de température dans le cas design simulé

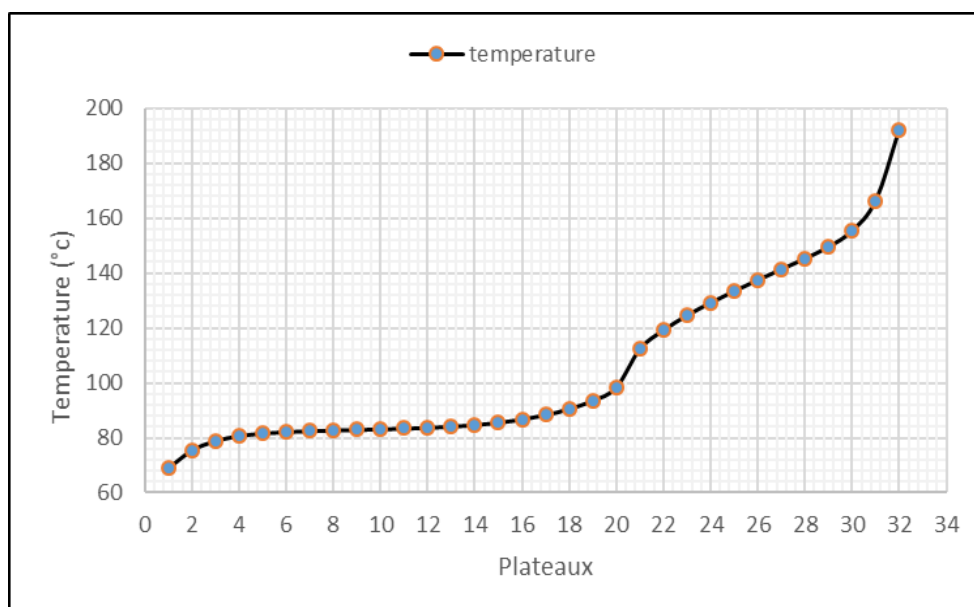


Figure VI-28 : Profils de température dans le cas optimisé

Partie 3 : Évaluation économique de l'optimisation proposée

Partie 3 : Évaluation économique de l'optimisation proposée

IV-3.1. Objectifs de l'évaluation économique

Après avoir réalisé une étude de modélisation et d'optimisation dans la section de stabilisation (débutaniseur C102) du module IV du complexe gazier de Hassi R'Mel, nous avons voulu pousser notre étude plus loin pour voir l'impact des paramètres d'exploitation optimisés sur l'économie de gestion des installations du modules IV (four H102 et condenseur E108) et le cout de revient du traitement de gaz. Il est à signaler que cette partie de travail est réalisée en se référant aux résultats donnés par le simulateur HYSYS.

IV-3.2. Quantité de gaz économisée au niveau du four H102

À partir des résultats donnés par le simulateur HYSYS, nous avons calculé le débit de fuel gaz consommé au niveau du four H102 avant et après l'optimisation des paramètres de marche du débutaniseur C102. Le calcul de debit se fait via la relation suivante :

$$\beta = \frac{Q_r}{PCS}$$

Avec :

β : débit du fuel gaz consommé (Nm³/h) ;

Q_r : quantité de chaleur fournie par le rebouilleur pour chauffer la charge de rebouillage (Kcal/h) ;

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur du fuel gaz utilisé ; $PCS = 9300 \text{ Kcal/Nm}^3$.

Le Tableau IV-21, exprime l'énergie nécessaire au four H102 en (Kcal/h), ainsi que le débit de fuel gaz consommé par ce dernier, avant et après l'optimisation.

Tableau IV-21 : Consommation énergétique du rebouilleur avant et après optimisation

Paramètres	Avant optimisation	Après optimisation	Ecart
Q_r fournie 10 ⁶ (Kcal/h)	4,900	4,504	0,396
β (Nm ³ /h)	526	484,30	41,7

IV-3. 3. Evaluation économique de l'optimisation réalisée au niveau du four H102

IV-3.3.1. Évaluation du gain

A partir des résultats du Tableau IV-21, nous remarquons que la quantité de fuel gaz utilisée par le four est passée de 526 Nm³/h à 484,30 Nm³/h après l'optimisation. L'écart entre ses deux quantités; soit 41,7 Nm³/h ; représente le débit de fuel gagné pour un seul train du module IV dans les conditions normales, ce qui fait que le gain en fuel gaz par année pour un

seul train est de :

$$\text{débit fuel} = 41,7 \times 24 \times 365 = 365292,0 \text{ Nm}^3/\text{an}$$

A partir de ces observations, nous avons illustré dans le Tableau IV-22 la quantité du fuel gaz économisée par heure et par an au niveau d'un seul train, ainsi qu'au niveau du module IV constitué de trois trains identiques A, B et C.

Tableau IV-22 : Quantité du fuel gaz économisée

Fuel gaz économisé au niveau d'un seul four	Débit en (Nm ³ /h)	41,7
	Débit en (Nm ³ /an)	365292 = 365 K
Fuel gaz économisé au niveau de trois fours	Débit en (Nm ³ /an)	1095876 = 1M

IV-3.3.2. Calcul de l'énergie économisée

Le calcul de l'énergie économisée en Kcal et en BTU par année dans le module IV est donné comme suit :

- **En kcal**

$$\text{Energie (Kcal)} = \text{Débit du fuel gaz (m}^3/\text{an)} \times \text{PCS (Kcal/ m}^3\text{)}$$

$$\text{Energie (Kcal)} = 10,1916468 \times 10^9 = 10G$$

- **En BTU**

$$\text{Energie (BTU)} = \text{Energie (Kcal)}/0,25$$

$$\text{Energie (BTU)} = 40,7665872 \times 10^9 = 40G$$

En million de BTU (million British Thermal Unit) (MBTU), l'énergie économisée est de :

$$\text{Energie (MBTU)} = 40K$$

IV-3.3.3. Estimation de l'économie réalisée en Dollars et en DA

Le Tableau IV-23 résume l'économie réalisée dans les trois fours en dollars.

Tableau IV-23 : Economie réalisée en dollars

MBTU économisés dans un seul four H102	13588,8624 = 14K
MBTU économisés dans le module IV (3 × H102)	40766,5872 = 41K
Prix du MBTU sur le marché international en Dollars \$	2,67
Economie en Dollars \$ au niveau d'un seul four H102	36282,26261 = 36K
Economie en Dollars \$ au niveau du module IV (3× H102)	108846,7878 = 109 K

Pour le mois de mars 2019, et qui correspond à notre période de stage au sein du module IV, le million de BTU a enregistré sur le marché international une valeur égale à 306,78 DA. A partir de là nous pouvons dire que :

- l'économie en DA réalisée au niveau d'un seul four H102 est estimée à 4168791,20 DA/an ; soit 4 M DA/an ;
- l'économie en DA réalisée au niveau des trois fours du module IV est estimée à 12506373,62; soit 12,5 M DA/an.

IV-3.4. Quantité d'énergie économisée au niveau du condenseur E108

Dans le Tableau IV-24 sont répertoriées les énergies consommées au niveau du condenseur E108 avant et après l'optimisation.

Tableau IV-24 : Consommation énergétique du condenseur avant et après optimisation.

Paramètre	Avant optimisation	Après optimisation	Ecart
Q Condenseur (kw/h)	4756	4244	512

IV-3.5. Evaluation économique de l'optimisation réalisée au niveau du condenseur E108

IV-3.5.1. Evaluation du gain

A partir des résultats du Tableau IV-4, nous remarquons que l'énergie consommée par le condenseur est passée de 4756 KW/h à 4244 KW/h après l'optimisation. L'écart entre ses deux quantités ; soit 512 KW/h ; représente l'énergie électrique gagnée pour un seul condenseur du module IV, ce qui fait que le gain en énergie électrique par année pour un seul condenseur est de :

$$Q_{condenseur} = 512 \times 24 \times 365 = 4485120 \text{ kw/ans}$$

Pour un prix du Kilowatt/heure équivalent à 1,3694 DA sur le marché national. A partir de là nous pouvons dire que

- l'économie en DA réalisée au niveau d'un seul condenseur E 108 est estimée à 6141923, 328 DA/an ; soit 6 M DA/an ;
- l'économie en DA réalisée au niveau des trois condenseurs du module IV est estimée à 18425769,984 DA/an soit 19 M DA/an.

L'évaluation économique que nous avons réalisée sur certaines unités du module de traitement IV (débutaniseur C102, four H102 et condenseur E108), dans les conditions optimales soutirées après modélisation de la TVR à la sortie du débutaniseur C102 en

fonction de la température de rebouillage, le débit de reflux et la température du condensat, prévoit que :

- la quantité de fuel gaz économisée au niveau d'un seul four sera de : $41,7 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Sachant que chaque module dispose de trois fours (H102), d'où l'économie de $1 \text{ M Nm}^3/\text{an}$ dans un seul module ;
- une économie d'environ 12,5 millions de DA/an au niveau du module IV ;
- 19 millions de DA/an seront économisés grâce à la baisse de la consommation électrique des trois condenseurs E108 du module.

Au final de cette étude, l'industrie gazière de Hassi R'Mel peut disposer d'une économie qui s'élève à 31,5 millions de DA chaque année. Ce gain en économie présente seulement la partie d'évaluation que nous avons effectuée au niveau du module IV, après avoir optimisé les paramètres de fonctionnement de sa section de stabilisation (débutaniseur C102). Sachant que le gisement de Hassi R'Mel est constitué, au total, de cinq modules de traitement, donc, il faut voir ce que ce site peut enregistrer comme gain par an lorsque toutes ses installations seront optimisées.

Conclusion

Conclusion générale

Le stage effectué au niveau des unités de traitement de gaz (module IV) de Hassi R'Mel a été très bénéfique puisqu'il nous a permis d'une part de nous familiariser avec le milieu industriel lié aux hydrocarbures et d'autre part de mettre en application les bases théoriques acquises durant notre cursus pour la résolution de problèmes réels soumis par ces unités de production. Par ailleurs, cette formation nous a également permise de voir de près les différents équipements industriels tel que : les colonnes, les condenseurs, les échangeurs de chaleur, les pompes, les compresseurs....etc.

Ce travail de Master a eu pour objectifs de simuler, modéliser et optimiser, par la suite, la colonne de fractionnement débutaniseur C102 du module IV en adoptant le simulateur HYSYS et les plans d'expériences basés sur le plan composite centré (PCC) pour les surfaces de réponses.

L'étude portant sur la simulation de la colonne de fractionnement débutaniseur C102 par le simulateur HYSYS nous a permis, non seulement, de comparer le cas design aux cas actuels sélectionnés pour la réalisation de l'étude de la modélisation, mais aussi de repérer les points de disfonctionnement dans la section du débutaniseur et l'influence des paramètres simulés sur le process. Cependant, l'étude réalisée par les plans d'expériences dans le but de concevoir un modèle mathématique de deuxième degré, qui traduit l'évolution de la tension de vapeur Reid (TVR) en fonction des paramètres opératoires étudiés (facteurs), à savoir : la température de rebouillage (x_1), le débit de reflux froid (x_2) et la température de condensation (x_3), nous a donné la possibilité de cerner la plage optimale de variation de ces derniers. De façon générale, et dans le domaine d'étude choisi, le bon fonctionnement de la colonne (TVR de $\approx 0,63$) est enregistré pour

- une température de rebouillage de 207,24 °C ; soit $x_1 = -0,70$;
- un débit de reflux froid de 33,68 t/h ; $x_2 = -1$;
- une température de condensation de 35,11 °C ; soit $x_3 = -0,41$.

Par ailleurs, la variation de la température de fond de la colonne débutaniseur C102 pour un débit de reflux froid du condenseur E108 fixe (33,7 t/h) a révélé un bon fonctionnement du débutaniseur lorsque la température de son fond est optimisée à 190°C. De même, la variation du débit de reflux froid pour cette température de fond optimale a estimé la valeur optimale du débit de reflux froid du condenseur E108 à 32 t/h. En effet, l'ensemble de ses conditions ainsi optimisées permet d'obtenir des produits conformes aux spécifications commerciales et de

réduire sensiblement l'émission des gaz à effet de serre (CO_2 , CO) et autres polluants (NOX) avec une diminution de la consommation d'énergie au niveau du rebouilleur (four H102) et du condenseur (E108), ce qui offre à l'industrie gazière de Hassi R'Mel la possibilité d'économiser environ 31,5 millions de DA chaque année.

Au final de cette étude, il est possible de proposer les recommandations suivantes :

- adopter les paramètres opératoires optimisés déterminés au cours de cette étude pour apporter un gain d'énergie appréciable au module IV ;
- dans le but de minimiser la consommation de fuel gaz (consommation énergétique), faire une distribution des liquides des ballons de séparation D104 et D105 qui alimentent la section basse pression du train A, vers la section basse pression des deux trains B et C à tour de rôle, tout en laissant la section basse pression du train A en stand-by. Nous tenons à signaler que ce problème est devenu un sujet d'actualité et de là l'adoption d'une solution définitive par la réalisation de ce projet est primordiale pour les exploitants) ;
- dans le but de récupérer le maximum de liquide, implanter une nouvelle station Boosting phase 3, qui fonctionnerait avec des unités de compression de 10 Kg/cm^2 au minimum et qui soutiendrait la station Boosting phase 2 qui elle, ne fonctionne pas au-dessous d'une pression de 56 Kg/cm^2 .

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Manuel opératoire, Traitement de gaz naturel module processing plant IV, vol. 3, Editions Juillet 1978, JGC corporation, Japan.
- [2] Manuel opératoire définitif, Traitement de gaz naturel module processing plant IV, vol. 1, Editions mars 1980, JGC corporation, Japan.
- [3] Manuel opératoire, SBC, Editions juin 2004, JGC corporation, Japan.
- [4] Rojey, A., Cornot-Gandolphe, S., Jost, J., Durand, B., Hemptinne, J., Le gaz naturel : Production, traitement, transport, Editions Technip, Paris, 1994.
- [5] Rojey, A., Cornot-Gandolphe, S., Jost, J., Durand, B., Hemptinne, J., Le gaz naturel : De la production aux marchés. Editions Technip, Paris, 2013.
- [6] British Petroleum Statistical Review of World Energy, June 2019. BP, UK, 68^{eme} Edition 2019.
- [7] Reece, M., Gikas, A., questionnaire annuel 2010 révision et rétrospectives, Revue de l'Agence International de l'Energie (AIE/OCDE), vol. 01, juillet 2011.
- [8] SONATRACH, document de Conférence sur le GPL, Janvier 2000, Hassi Messaoud.
- [9] Bilan des réalisations du secteur, Ministère de l'Energie, site web : <http://www.energy.gov.dz>, 2017.
- [10] Benmounah, A., Stockage des produits pétroliers destinés pour le groupe oil and gas processing. Document de cours, IAP Boumerdes, 2006.
- [11] Rapport annuel du module processing plant 4, Décembre 2000-2017.
- [12] Résumé des Journées Scientifiques et Techniques, Alger, Avril 1998.
- [13] Fiche de sécurité des produits du module IV, Editions juillet 1978, JGC corporation, Japan.
- [14] HYSYS, Manuel Reference Hypotech, Version 1.0, 1995.
- [15] Rebai, N., Initiation au simulateur HYSYS, Document de cours de l'Institut Algérien du Pétrole, IAP.

- [16] Djoudi, W., Optimisation et modélisation du procédé de cémentation du cuivre dans un réacteur tubulaire à électrode volumique, Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2005.
- [17] Ziani, S., Modélisation de la réponse d'un biocapteur ampérométrique à base de pâte de carbone modifiée, Mémoire de Magistère, Université de Bejaia, 2007.
- [18] Yahiaoui, I., Les plans d'expériences initiation à la construction et l'analyse des plans factoriels complets à deux niveaux et du plan composite centré, Document de Cours, Université de Bejaia, 2014/2015.
- [19] Goupy. J., Introduction aux plans d'expériences, Edition DUNOD, Paris, 2001.
- [20] Goupy. J., Plans d'expériences pour surfaces de réponses, Edition DUNOD, Paris, 1999.
- [21] Sadou. G., Sadou. M .C., Les plans d'expériences et l'expérimentation à l'assurance qualité. Edition AFNOR Technique, 1991.
- [22] Ozil. P., Plans d'expériences : Méthode de Tagushi, Ecole Nationale Supérieure d'Electrochimie et d'Electrometallurgie, INPG, 1997.
- [23] Goupy. J., Les plans d'expériences, Revue Modulad, 2006.
- [24] Goupy. J., Modélisation par les plans d'expériences, Techniques de l'Ingénieur, R275, 2000.
- [25] Adjabi. S., Méthodes statistiques de la prévision. Edition LAMOS, Université de Bejaia, 2003.
- [26] Easton.V., J. Coll., J. M., Statistics Glossary, Edition IAN JACKSON, 1984.
- [27] Kimouche. K., Etude de quelques plans d'expériences associés aux surfaces de réponse, Mémoire de Master, Université de Constantine, Algérie, 2008.
- [28] Karem, S., Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 2004.
- [29] Rabier. F., Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 2007.

[30] Britel. O., Modélisation et optimisation par la méthodologie des plans d'expériences de la synthèse : de l'hydroxyapatite phosphocalcique ; du phosphate tricalcique apatitique ; du phosphate de calcium apatitique carbonaté, Thèse de Doctorat, Université d'Agdal, Maroc, 2007.

[31] Vivier. S., Stratégie d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrochimiques modélisés par les éléments finis. Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, 2002.

Annexes

Simplified Process Flow Diagram for MPP-4

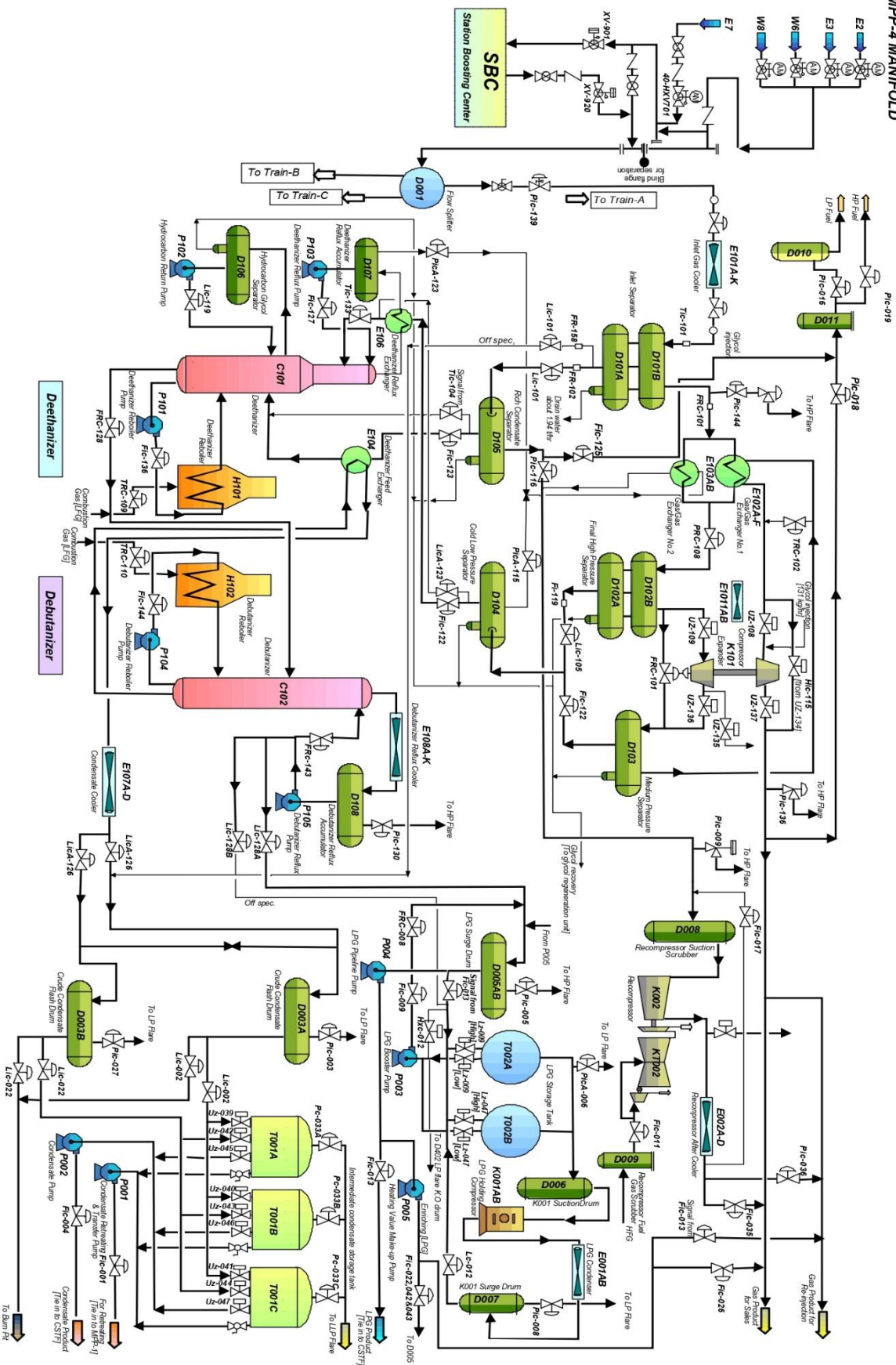


Table de Student

Unilateral	0,01	0,05	0,025	0,01	0,005
Bilateral	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	3,08	6,31	12,7	31,8	63,7
2	1,89	2,92	4,30	6,97	9,92
3	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
4	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
5	1,48	2,02	2,57	3,37	4,03
6	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
7	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
8	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
9	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
10	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17
11	1,36	1,80	2,20	2,72	3,10
12	1,36	1,78	2,18	2,68	3,06
13	1,35	1,77	2,16	2,65	3,01
14	1,35	1,76	2,15	2,62	2,98
15	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
16	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92
17	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90
18	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88
19	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86
20	1,33	1,73	2,09	2,53	2,85
21	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83
22	1,32	1,72	2,07	2,51	2,82
23	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81
24	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80
25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79
26	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78
27	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76
29	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76
30	1,31	1,70	2,04	2,46	2,75
40	1,30	1,68	2,02	2,42	2,70
∞	1,28	1,65	1,96	2,33	2,58

Table de Fischer senedecor pour $p = 0,95$

Valeurs des 95 ièmes centiles (niveaux 0,05)

F0, 95 pour la distribution F

ν_1 degrés de liberté au numérateur

ν_2 degrés de liberté au dénominateur

$\nu_1 \rightarrow$ $\nu_2 \downarrow$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	244	246	248	249	250	251	252	253	254
2	18,5	19,0	19,2	19,20	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,7	8,66	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,3	3,27	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,8	2,75	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,7	2,65	2,60	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,1	2,06	2,01	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99	1,95	1,9	1,85	1,8	1,75	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,2	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00

Tableau: Influence de la température du fond sur le fonctionnement de la colonne C102.

Température du fond (°C)	180	182	184	186	188	189	190	191	192	193	194	196	198
C ₂ ⁻ (% mol)	1,28	1,18	1,16	1,14	1,13	1,12	1,11	1,11	1,10	1,09	1,09	1,07	1,04
C ₅ ⁺ (%mol)	0	0	0	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,16	1,55	2,24
Débit de GPL (t/h)	15,41	16,69	16,99	17,29	17,57	17,71	17,85	17,98	18,11	18,25	18,39	18,87	19,40
Débit de condensat (t/h)	40,59	38,91	38,21	37,91	37,53	37,39	37,25	37,12	36,89	36,75	36,61	36,13	35,60
TVR (kg/cm ²)	0,959	0,775	0,737	0,701	0,665	0,648	0,630	0,612	0,5958	0,5783	0,5617	0,5355	0,5124
Q _R (kcal/h).10 ⁶	4,005	4,105	4,162	4,201	4,262	4,286	4,318	4,343	4,363	4,393	4,421	4,498	4,526
Q _C (kcal/h).10 ⁶	3,399	3,401	3,518	3,596	3,626	3,655	3,668	3,690	3,693	3,751	4,002	4,157	4,168
Débit de fuel gaz (m ³ /h)	516,77	529,67	537,03	542,09	549,93	553,03	557,16	560,38	562,92	566,83	570,45	580,38	590,45
T ^{re} de tête (°C)	63,70	66,62	67,15	67,65	68,11	68,33	68,55	68,77	68,97	69,19	69,50	71,28	73,29
T ^{re} du rebouilleur (°C)	195,2	197,1	199,2	201,2	203,2	204,1	205,2	206,2	207,1	208,1	209,1	211,3	213,5

Tableau: Influence du débit de reflux froid.

Débit de reflux(t/h)	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
C ₂ - (% mol)	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
C ₅ +(%mol)	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Débit de GPL (t/h)	18,18	18,18	18,17	18,17	18,17	18,17	18,17	18,17	18,17	18,17	18,17
Débit de condensat (t/h)	37,82	37,82	37,83	37,831	37,832	37,833	37,834	37,835	37,836	37,837	37,838
TVR (Kg/cm ²)	0,6305	0,6298	0,6396	0,6297	0,6295	0,6294	0,6293	0,6293	0,6291	0,6287	0,6277
Q _R (Kcal/h).10 ⁶	4,358	4,429	4,504	4,574	4,646	4,718	4,790	4,862	4,934	5,002	5,081
Q _C (Kcal/h).10 ⁶	3,583	3,652	3,721	3,791	3,861	3,932	4,000	4,071	4,140	4,262	4,334
T ^{re} de tête (°C)	68,42	68,40	68,37	68,35	68,33	68,33	68,32	68,32	68,32	68,32	68,31
T ^{re} de rebouilleur (°C)	205,3	205,6	205,8	206,2	206,4	206,6	206,9	207,1	207,4	207,7	207,9

Matrice inverse $[X^T.X]^{-1}$ pour le modèle de second ordre

0,08324566	0	0	0	0	0	0	-0,028445	-0,028445	-0,0284452
0	0,07328	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0,07328	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0,07328	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0,125	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,125	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0,125	0	0	0
-0,0284452	0	0	0	0	0	0	0,0599121	-0,002855	-0,0028550
-0,0284452	0	0	0	0	0	0	-0,002855	0,0599121	-0,0028550
-0,0284452	0	0	0	0	0	0	-0,002855	-0,002855	0,05991214

TP: Plans d'expériences

Problème : *Optimisation des paramètres de la colonne débutaniseur C102 du champ gazier de SONATRACH - HASSI R'MEL*

Afin de régler certains problèmes de fonctionnement au niveau du champ gazier de Hassi R'Mel, les industriels cherchent à optimiser les paramètres opératoires de la section de séparation condensat /GPL (débutaniseur C102). Leur intérêt majeur est :

- étudier l'influence de certains paramètres sur le comportement de la colonne C102 (fonctionnement stable) de façon à avoir un condensat d'une TVR stable (tension de vapeur Reid);
- trouver les conditions de réglage dite optimales pour avoir une TVR de condensat qui ne dépasse pas $0,7 \text{ kg/cm}^2$.

Les industriels proposent pour effectuer cette étude de faire varier les paramètres suivants :

1. la température de rebouillage ; $T_R \in [206,68-210,32]^\circ\text{C}$.
2. Le taux de reflux froid du condenseur $R \in [33,68-38,32]\%$.
3. la température de condensation ; $T_C \in [31,68-34,32]^\circ\text{C}$.

Questions :

- 1) Quel est l'objectif de l'étude ?
- 2) Définir la réponse et les facteurs de l'étude ?
- 3) Proposer les plans d'expérimentations qui répondent convenablement aux intérêts recherchés ?
- 4) Définir les modèles mathématiques qui les représentent ?
- 5) Etablir les matrices d'expériences correspondantes ?
- 6) Donner les matrices des effets X ?
- 7) Inscrire les réponses dans la feuille de travail puis :
 - a) déterminer les coefficients des modèles mathématiques proposés dans la question 4 ?
 - b) valider les modèles trouvés ?
 - c) évaluer la qualité des modèles trouvés ?
 - d) exploiter les modèles trouvés selon l'intérêt de chacun d'eux ?

Résumé

Suite à la chute conséquente de la pression du gisement de Hassi R'Mel, la composition de la charge tend vers un changement graduel et significatif avec une diminution de la richesse, qui induit ainsi une baisse de la charge d'alimentation et par la suite influe sur les paramètres de fonctionnement. Ce problème primordial a été résolu par la mise en service d'une station Boosting, en septembre 2004, pour permettre aux installations de fonctionner dans de bonnes conditions selon le design. Néanmoins, cette résolution n'a pas été radicale, ces variations persistent et induisent souvent une déstabilisation de la section de fractionnement et du débutaniseur qui est la partie la plus sensible du train. A cet effet, nous avons essayé, dans ce travail, d'optimiser les paramètres d'exploitation de débutaniseur C102 du champ gazier de Hassi R'Mel via les plans d'expériences et le HYSYS, afin de pouvoir régler le problème de la diminution de la charge d'alimentation et répondre aux exigences des cahiers de charge des installations de traitement de gaz in situ.

Mots clés : débutaniseur, logiciel hysys, optimisation, surface de réponse,

Abstract

Following the consequent fall in the pressure of the Hassi R'Mel deposit, the composition of the load tends towards a gradual and significant change with a decrease in the richness, which thus induces a drop in the feed load and subsequently influences the operating parameters. The commissioning of a Boosting station in September 2004, to allow the installations to function in good conditions according to the design, solved this fundamental problem. However, this resolution was not radical; these variations persist and often induce destabilization of the fractionation section and the debutanizer, which is the most sensitive part of the train. To this end, we have tried, in this work, to optimize the operating parameters of the C102 debutanizer of the Hassi R'Mel gas field via the experimental design and the HYSYS, in order to be able to solve the problem of the reduction of the feedstock and meet the requirements of the specifications for in situ gas treatment installations.

Keywords: optimization, debutanizer, hysys software, central composite design

المخلص

الانخفاض الكبير في ضغط خزان الثروة الغازية المتواجدة في باطن الأرض بحاسي رمل ، يؤدي لتغيرات تدريجية و كبيرة مع انخفاض في الثروة وبالتالي يؤثر على معايير التشغيل. تم حل هذه المشكلة الأساسية من خلال تشغيل محطة للضغط في سبتمبر 2004 ، للسماح للمنشآت بالعمل في ظروف جيدة وفقاً للتصميم ومع ذلك ، فإن هذا الحل لم يكن جذرياً ، فهذه الاختلافات مستمرة وغالباً ما تؤدي إلى زعزعة استقرار قسم الاستقرار و التجزئة ، خاصة عمود إنتاج غاز البترول المميع و الذي يعتبر هو الجزء الأكثر حساسية في القطر. تحقيقاً لهذه الغاية ، حاولنا في هذا العمل تحسين معايير التشغيل في حقن غاز حاسي رمل وذلك باستخدام الخطط التجريبية و من أجل أن نكون C102 لعمود إنتاج غاز البترول المميع قادرين على حل مشكلة التخفيض من المواد الخام وتلبية متطلبات المواصفات للمنشآت معالجة الغاز في الموقع.

الكلمات الدالة: الخطط التجريبية، عمود إنتاج غاز البترول المميع ، برنامج hysys