

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed Bougara Boumerdes
Faculté des Sciences
Département de Mathématiques



Mémoire Présenté

Pour L'Obtention Du Diplôme De Master

En Recherche Opérationnelle

Option : Recherche Opérationnelle et Mathématique de gestion (ROMAG)

Par : GUELLAL Z'hor

Et : GACI Yacine

**Optimisation du transport de gaz naturel
par le gazoduc GZ1 Hassi R'mel-Arzew
TRC-SONATRACH**

Soutenu à l'UMBB, le 20/06/2016, devant le jury composé de :

Président : Mr CHEURFA Fateh UMBB.

Examineur : Mme CHEIKH Asma UMBB.

Encadreur : Mr ASLI Larbi UMBB.

Co encadreur : Mr ISSADI Badreddine UMBB.

Année Universitaire 2015 – 2016

Tous sous le ciel, connaissant le beau comme le beau : voici le laid !

Tous connaissant le bien comme le bien : voici le mal !

C'est ainsi que l'être et le non-être naissent l'un de l'autre,

Que le difficile et le facile s'accomplissent l'un par l'autre,

Que mutuellement le long et le court se délimitent,

Le haut et le bas se règlent,

Le ton et le son s'accordent,

L'avant et l'après s'enchaînent.

C'est pourquoi le sage s'en tient à la pratique du non-agir.

Il enseigne sans parler.

Tous les êtres agissent et il ne leur refuse pas son aide.

Il produit sans s'approprier,

Travaille sans rien attendre,

Accomplit des œuvres méritoires sans s'attacher,

Et, justement parce qu'il ne s'y attache pas, Elles subsistent.

- LAO-TSEU, De la Voie et de sa vertu, II.

Table des matières

Introduction générale

1 Présentation de la Sonatrach

1.1	Description du groupe pétrolier SONATRACH	
1.2	Organisation de la SONATRACH	
1.2.1	Structures opérationnelles	
1.2.2	Structures fonctionnelles	
1.3	Présentation de l'Activité transport par canalisation TRC	
1.3.1	Le transport par canalisation	
1.4	Organisation de l'Activité TRC	
1.5	Missions de l'Activité TRC	
1.6	Patrimoine de l'Activité TRC	

2 Généralités sur les hydrocarbures

2.1	Définition des hydrocarbures	
2.2	Mode de transport des hydrocarbures	
2.2.1	Définition d'une canalisation	
2.2.2	Les caractéristiques de la canalisation	
2.2.3	Les types de canalisation	
2.3	Gaz naturel	
2.4	Description du réseau de transport du gaz	
2.4.1	Les gazoducs	
2.4.2	Terminal de départ et d'arrivée	
2.4.3	Les types de montage des gazoducs	
2.5	Stations de compression	
2.5.1	Les aéroréfrigérants	
2.5.2	Contrôle à distance	

- 2.6 Les compresseurs
 - 2.6.1 La compression du gaz naturel
 - 2.6.2 Compresseur centrifuge
 - 2.6.3 Principe de fonctionnement d'un compresseur centrifuge
 - 2.6.4 Applications
 - 2.6.5 Les turbines à gaz
- 2.7 Centres de dispatching
 - 2.7.1 Présentation du Champ de Hassi R'mel
- 2.8 Calculs hydrauliques
- 2.9 Formule d'écoulement du gaz
 - 2.9.1 Équation de chute de pression (perte de charge)
 - 2.9.2 Équation de calcul du débit Q

3 Problématique et Modélisation

- 3.1 Position du problème
- 3.2 Données et paramètres du problème
 - 3.2.1 Système de Transport par Canalisation GZ1/GZ2/GZ3
 - 3.2.2 Présentation de la ligne GZ1
- 3.3 Etude de la station de compression
 - 3.3.1 Régime de fonctionnement d'une station de compression
 - 3.3.2 Régime de fonctionnement des compresseurs
 - 3.3.3 Modélisation des courbes caractéristiques des compresseurs
 - 3.3.4 Estimation des valeurs de la hauteur adiabatique et du rendement adiabatique
- 3.4 Formulation mathématique du problème
 - 3.4.1 Les hypothèses du problème
 - 3.4.2 Définition des données
 - 3.4.3 Paramètres du modèle
 - 3.4.4 Variables de décision
 - 3.4.5 Contraintes
 - 3.4.6 La fonction objectif
 - 3.4.7 Evaluation du modèle
- 3.5 L'état de l'art
 - 3.5.1 Les différentes approches de modélisation et de résolution de "Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem (GPFCMP)"

4 Méthodes de résolution

4.1	Méthodes d'optimisation	.....
4.2	La programmation non linéaire mixte en nombres entiers	.....
4.2.1	Qu'est ce qu'un programme MINLP ?	.....
4.3	Les méthodes déterministes	.....
4.4	Les méthodes approchées (stochastiques)	.....
4.4.1	Technique de résolution	.....
4.4.2	Les heuristiques classiques	.....
4.5	Les métaheuristiques	.....
4.5.1	Méthode du recuit simulé	.....
4.5.2	Principe de RS :	.....
4.5.3	Algorithme général du Recuit simulé	.....
4.6	Les algorithmes génétiques	.....
4.6.1	Présentation de la méthode	.....
4.6.2	Principe de la méthode	.....
4.7	Démarches Hybrides	.....

5 Résolution du problème

5.1	Résultats obtenus par l'approche déterministe	.....
5.2	Adaptation d'une heuristique au problème	.....
5.2.1	Principe de l'heuristique	.....
5.2.2	Procédure de l'heuristique	.....
5.2.3	Organigramme de l'heuristique	.....

6 Implémentation informatique

6.1	C'est quoi le MTLAB ?	.....
6.2	Résultats de l'application	.....
6.3	Comparaison des résultats obtenus avec les données réelles	.....

Table des figures

1.1	Schéma organisationnel et fonctionnel de la SONATRACH.
1.2	Le processus du transport des hydrocarbures
1.3	Organigramme de l'Activité TRC
1.4	Réseau de transport par canalisations
2.1	La production de gaz naturel en 2014
2.2	Carte du Réseau de Transport du Gaz naturel
2.3	Chaîne de transport par gazoduc
2.4	Un gazoduc de l'amont vers l'aval
2.5	Une station de compression avec quatre machines(turbocompresseurs)
2.6	Un compresseur centrifuge
2.7	Schéma synoptique d'un Turbocompresseur
2.8	Turbine à gaz General Electric
2.9	Centre National de Dispatching Gaz - Hassi R'mel
2.10	Situation géographique du site de Hassi R'Mel
2.11	Schéma d'un tube
2.12	Schéma d'un tronçon ij
3.1	Schéma descriptif du Système de Transport par Canalisation
3.2	Profil Altimétrique des gazoducs GZ1/GZ2/GZ3
3.3	Présentation de la ligne GZ1
3.4	Chaque station de compression de GZ1 a 4 TC
3.5	Courbe de la hauteur adiabatique d'un compresseur centrifuge
3.6	Courbe de rendement d'un compresseur centrifuge
3.7	Résultats obtenus par estimation
3.8	Représentation de la ligne étudiée GZ1
3.9	Schéma de la ligne

4.1	Le processus de l'analyse du système
4.2	Classes des problèmes d'optimisation.
4.3	Vue d'ensemble des problèmes d'optimisation.
4.4	Méthodes classiques de résolution de problèmes MINLP.
4.5	Schéma des méthodes approchées
4.6	Schéma d'un algorithme génétique
4.7	Sélection par roulette
4.8	Sélection par tournoi (entre deux individus)
4.9	Croisement en un point
4.10	La mutation
4.11	Schéma d'hybride de bas niveau
4.12	Schéma d'hybride de Haut niveau
5.1	Structure de l'environnement GAMS pour la résolution d'un problème MINLP. .
5.2	Organigramme de l'heuristique
6.1	Execution sur Matlab
6.2	Comparaison des résultats obtenus avec les données réelles
6.3	Evolution en terme de nombre de stations (2005-2014)
6.4	Courbe caractéristique d'un compresseur centrifuge

Remerciements

Premièrement, nous remercions Dieu le Miséricordieux, qui nous a éclairés sur le chemin du savoir pour nous avoir donné la volonté et la force pour accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères à notre promoteur M. ASLI Larbi pour avoir accepté de nous encadrer, et son exigence critique, la confiance et le soutien qu'il nous a accordés.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants du Département des Mathématiques et spécialement spécialité Recherche Opérationnelle.

Nous tenons ensuite à remercier le personnel de SONATRACH TRC Siège. A ce titre, nous citons Mesdames BOHRI Samia, NOUNE Hassiba et BOUTERFA Fatiha, Messieurs LEFGOUNE Madjid, BOURERSA Mohamed, AZZI Khaled, DAOUED, YAYCI Farid, BENZAOUI Ahmed pour leurs suivi et conseils, aussi pour la documentation qu'ils ont mis à notre disposition et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury : Mr. CHORFA Fateh et Mme. CHEIKH Asma, Mr ISSADI Badreddine. d'avoir accordé de leurs temps précieux pour expertiser notre travail, nous espérons qu'ils en soient satisfaits. Nos remerciements chaleureux s'adressent également à nos familles, pour leur patience et leur encouragement ainsi que leur sacrifice.

Merci pour tous.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mon père, qui était et sera toujours mon école exemplaire, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés, qui a veillé, tout au long de ma vie, à ce que je n'eusse besoin de rien, qui m'a encouragé à continuer mes études avec tout le soutien nécessaire et inconditionnel, je reste certain que sans lui, je ne serais jamais arrivée à ce point. J'espère que sa fierté ne sera pas que celle de ce titre obtenu, mais surtout d'avoir fait de moi ce que je suis, que Dieu le protège.

Ma chère mère, qui par sacrifice m'a mit au monde, qui par sacrifice a fait de moi ce que je suis. . . celle qui m'a donnée le sens de vie, celle qui a toujours été là pour moi, et qui n'a pas cessé de prier pour moi et de m'encourager, je lui remercie pour tous ses efforts, ses souffrances et son sacrifice irréfutable, que Dieu me la garde.

A toute ma grande famille.

A tous mes voisins et mes voisines.

A ma chère soeur Manel que j'adore.

A mon binôme Yacine et sa famille.

A youcef djeddi pour son aide.

A tous mes chers amis

Yasmine, Nora, Rania, Dalia, Lyna, Samia, Saida, Sylia, Ghizlane, Hadia

Sofiane, Bilel, Rahma, toufik, Ossama, Ikram.

A tous mes camarades de la promotion sortante 2016 Recherche Opérationnelle.

A tous ceux qui me sont chers.

Zohor

Dédicaces

*Du profond mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers :
A Ma mère et mon père Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect,
mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez
consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis
mon enfance. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant
formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices.*

*A mes chères sœurs nassima et djamila et mon frere Younes que j'adore, et qui
je souhaite un avenir radieux plein de réussite.*

A toute ma grande famille.

*A Mme Fadila Kourta, pour vos soutiens et motivations les plus précieux dans
mes études et ma vie, merci pour votre grand cœur toutes vos qualités qui
seraient trop longues à énumérer, vous resteriez toujours mon exemple.*

*A ma PRINCESSE Ton encouragement et ton soutien étaient la bouffée
d'oxygène qui me ressourçait dans les moments pénibles, de solitude et de
souffrance. Merci d'être toujours à mes côtés, par ta présence, par ton amour
dévoué que je suis aujourd'hui là,*

A ma coéquipière ZOHOR et sa famille,

A tous mes camarades de la promotion sortante 2016 Recherche Opérationnelle.

A tous mes amis,

*mes petites familles (Eureka, Ciub,) les Bouchawistes (Békis, Hamama, Chihab,
Sonia, Fateh, Hjila, Mourad, Tintine, Mehdi), Nordine, Yahia, Juba, Hani ...
en Souvenir des plus beaux instants qu'on a passé ensemble.*

Yacine

Introduction générale

Le gaz naturel est la source d'énergie fossile qui a connu la plus forte progression depuis les années 70. En effet, elle représente la cinquième position dans la consommation énergétique mondiale. En raison de ses avantages économiques et écologiques, le gaz naturel devient chaque jour plus attractif pour beaucoup de pays. Il représente la deuxième source d'énergie la plus utilisée après le pétrole.

Pour transporter des quantités de plus en plus importantes sur des distances toujours plus grande, le système de transport de gaz naturel par canalisation reste le mode le plus utilisé à travers le monde. La compagnie sonatrach s'intéresse, d'une manière régulière, à réduire les coûts d'investissement et les charges d'exploitation pour le développement et le maintien de leur réseaux.

Dans notre étude, nous nous intéressons à la minimisation des charges d'exploitation dans le transport du gaz naturel de Hassi R'mel à Arzew. En effet, l'acheminement du gaz dans le réseau passe par divers dispositifs de la conduite. le gaz perd en pression suite aux frottements avec la paroi de la canalisation, cette perte en pression est compensée par les stations de compression qui élèvent la pression de gaz.

Pour comprimer le gaz à travers les stations, ces dernières ont besoins de consommer une quantité de gaz prélevée à partir de la canalisation. Dans notre pays, elles consomment beaucoup de gaz naturel, plus de 600 millions de m^3 /an, soit un coût de 130 millions de dollars par an.

L'objectif de notre étude, est donc de chercher une meilleure solution qui permet de minimiser la quantité de gaz consommée par les stations de compression de telle sorte à satisfaire la demande en transport à l'aide des méthodes de la recherche opérationnelle.

Pour mener à bien notre projet nous avons élaboré le plan suivant :

- *Le premier chapitre servira à faire une brève présentation de l'entreprise SONATRACH, ses activités ses objectifs, ainsi que la branche TRC.*
- *Dans le deuxième chapitre, nous donnons quelques généralités sur le gaz naturel et les termes techniques utilisés dans ce mémoire.*
- *Le troisième chapitre propose la problématique et l'objectif assigné à notre travail, ainsi que la modélisation du problème.*
- *Le quatrième chapitre est réservé aux méthodes de résolution du problème proposé.*
- *Le cinquième chapitre porte sur la résolution du problème étudié.*
- *Le sixième chapitre porte sur la description générale de l'application informatique.*
- *Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale portant sur ce qui a été élaboré.*

Avant Propos

Le travail présenté dans ce rapport rentre dans le cadre du stage de deux éme et dernière année de formation Master en Recherche Opérationnelle de l'Université M'hamed bougara (UMBB)

Ce stage s'est déroulé à la Direction de Transport par Canalisation (TRC), au sein de la société SONATRACH (Sidi Arcine), et plus précisément à la Direction Etude et Planification.

Ce travail a été possible grâce aux différents équipes des services de la SONATRACH qui par leur diversité, complémentarité et compétences nous ont permis de bien mener nos travaux.

Résumé : Ce travail est une modeste contribution à la formulation mathématique d'un problème qui répond à la détermination d'un régime de fonctionnement d'un gazoduc. Ce modèle a été appliqué au gazoduc GZ1 Hassi R'mel- Arzew, l'optimisation des régimes de de fonctionnement consiste à minimiser la consommation du gaz naturel par les stations de compression qui ont pour but de compenser la perte de charge en déterminant les stations à mettre en marche, ainsi que le nombre de turbocompresseurs en service dans chacune de ces stations. Une heuristique de type amélioratif a été proposée pour déterminer une configuration optimale. Cette heuristique représente une alternative intéressante pour l'optimisation du régime de fonctionnement d'un gazoduc.

MOTS CLÉS : optimisation du transport du gaz naturel, perte de charge, modélisation mathématique, programmation non linéaire mixte en nombre entier, estimation, heuristique, métaheuristique, hybridation, moindres carrées, algorithme génétique, recuit simulé.

Abstract : This thesis presents mathematical formulation proposed for determining gas pipeline operation, gas pipeline operation optimization consists in minimize the fuel consumption by compression stations which are designed to compensate pressure drop, the principal decisions variables are chosen to be the operating compression station and the number of operating turbo compressors in each of these stations. An ameliorative heuristic was proposed to determine a feasible solution.

KEYWORDS : Gas transport, Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem, pressure drop, mathematical modeling, Mixed Integer Nonlinear Programming, estimation, heuristic, metaheuristic, hybridization, least squares, genetic algorithm, simulated annealing

Chapitre 1

PRÉSENTATION DE LA SONATRACH

Introduction

Sonatrach est une compagnie étatique algérienne et un acteur international majeur dans l'industrie des hydrocarbures.

La société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures Sonatrach a été créée par le décret N°63/491 du 31 décembre 1963 paru au journal officiel du 10 novembre 1964. Ces missions ont été élargies le 22 Septembre 1966 pour s'étendre à tous les domaines de l'industrie pétrolière, la recherche et le transport des hydrocarbures.[1]

La nationalisation des hydrocarbures le 24 février 1971 a poussé sonatrach à prendre en main le destin pétrolier et gazier du pays.

Sonatrach a fait l'objet d'un découpage qui a donné naissance à d'autres entreprises telles que NAFTAL, ASMIDAL, ENPE...etc.

Aujourd'hui et après sa restructuration en 1981, sonatrach garde les principales fonctions du secteur des hydrocarbures à savoir :[1]

- L'exploitation, le forage et la production.
- Le transport des hydrocarbures.
- Le traitement et la liquéfaction du gaz naturel.
- La commercialisation des hydrocarbures liquides et gazeux.

1.1 Description du groupe pétrolier SONATRACH

Elle a pour missions de valoriser de façon optimale les ressources nationales d'hydrocarbures et de créer des richesses au service du développement économique et social du pays.

- Forme juridique : Société par action (SPA) .
- Effectif de SONATRACH : 59 304 agents en 2014 [3] .
- Chiffre d'affaires à l'exportation en 2014 : 58.4 milliard de dollars, contre 63.5 en 2013, soit une baisse de 8% .
- Production totale d'hydrocarbures en 2014 : 195,2 millions TEP [2].
- La production de gaz naturel en 2014 : 130,9 milliards de m³ [2].
- Dettes envers Groupe et Associés : Elles s'établissent à 2 379 milliards de DA contre 2 157 milliards de DA en 2013, soit une progression de 10 % .
- Position du groupe Sonatrach sur le plan international [1] :
 - Le groupe pétrolier et gazier est classé 1er en Afrique et 12ème dans le monde en 2013 .
 - Quatrième exportateur mondial de Gaz Naturel Liquéfié (GNL).
 - Troisième exportateur mondial de Gaz Pétrole Liquéfié (GPL).
 - Cinquième exportateur de Gaz Naturel (GN).

1.2 Organisation de la SONATRACH

1.2.1 Structures opérationnelles

Les activités opérationnelles exercent les métiers du groupe et développent son potentiel d'affaires tant en Algérie qu'à l'étranger. Les activités opérationnelles, qui sont placées sous l'autorité d'un vice-président sont :

- **L'Activité Exploration – Production (E&P)** : ouvre les activités de recherche, d'exploration, de développement et de production d'hydrocarbures. Elles sont assurées par Sonatrach seule, ou en association avec d'autres compagnies pétrolières.
- **L'Activité Liquéfaction, Raffinage et Péetrochimie (LRP)** : couvre le développement et l'exploitation des complexes de liquéfaction de gaz naturel, de séparation de GPL, de raffinage et des gaz industriels.
- **L'Activité Transport par Canalisations (TRC)** : assure l'acheminement des hydrocarbures (pétrole brut, condensat, GPL et gaz naturel) et dispose d'un réseau de canalisations de près de 19 623 km en 2015 contre 14 915 en 2005, soit une augmentation de 4 708 km.

- **L'Activité Commercialisation (COM)** : a pour missions l'élaboration et l'application de la stratégie de Sonatrach en matière de commercialisation des hydrocarbures sur le marché intérieur et à l'international par les opérations de trading et des hipping. Ces opérations sont menées en coopération avec les filiales NAFTAL pour l'approvisionnement du marché national en produits pétroliers et gaziers (GPL), HYPROCSC pour le transport maritime de ces produits et COGIZ pour la commercialisation des gaz industriels.

1.2.2 Structures fonctionnelles

- **Direction Coporate** :
 - Stratégie, Planification & Économie (SPE) ;
 - Finances (FIN) ;
 - Ressources Humaines (RHU) ;
- **Direction Centrale** :
 - Filiales & participations (FIP) ;
 - Activités Centrales (ACT) ;
 - Juridique (JUR) ;
 - Informatique & Système d'Information (ISI) ;
 - Marchés et Logistique (MLG) ;
 - Santé, sécurité & environnement (HSE) ;
 - Business Développent (BSD) : nouvelle direction chargée de détecter des opportunités de croissance, d'évaluer et de lancer des nouveaux projets dans les activités de base de l'entreprise ;
 - Recherche & Développement (RDT) : nouvelle direction chargée de promouvoir et de mettre en œuvre la recherche appliquée et de développer des technologies dans les métiers de base de l'entreprise.

Les structures opérationnelles et structures fonctionnelles de sonatrach sont schématisées par l'organigramme suivant.

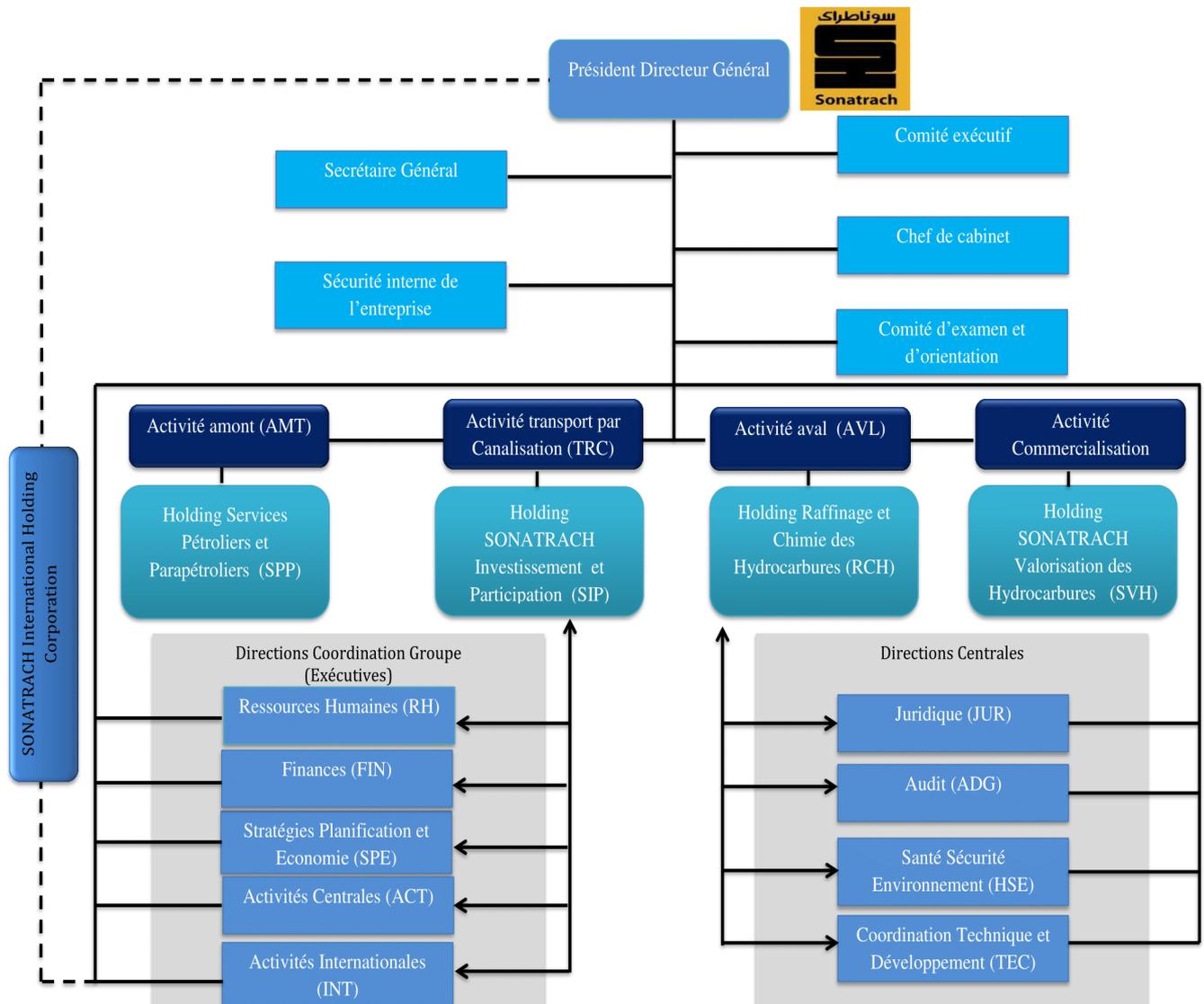


FIGURE 1.1 – Schéma organisationnel et fonctionnel de la SONATRACH.

1.3 Présentation de l'Activité transport par canalisation TRC

L'activité Transport par Canalisation est en charge de l'acheminement des hydrocarbures, de pétrole brut, de gaz, de GPL et de condensat, à partir des zones de production vers les zones de stockage, les complexes GNL et GPL, les raffineries, les ports pétroliers ainsi que vers les pays importateurs.

Elle constitue le noyau dynamique de la chaîne pétrolière du Groupe Sonatrach.

Elle dispose d'un réseau de canalisations de près de 19 623 km en 2015 contre 14 915 en 2005, soit une augmentation de 4 708 km [4] :

- Des gazoducs d'une longueur de 9 677 km, avec des diamètres variant principalement entre 40" et 48" ;
- Des oléoducs d'une longueur de 9 946 km, avec des diamètres variant principalement entre 20" et 34".

1.3.1 Le transport par canalisation

Le Transport par Canalisation constitue le maillon intermédiaire entre l'Amont de l'activité pétrolière et gazière et les activités en Aval en matière de transformation, de traitement des hydrocarbures et leur commercialisation.

Le transport par canalisations est une étape charnière dans la chaîne des hydrocarbures.

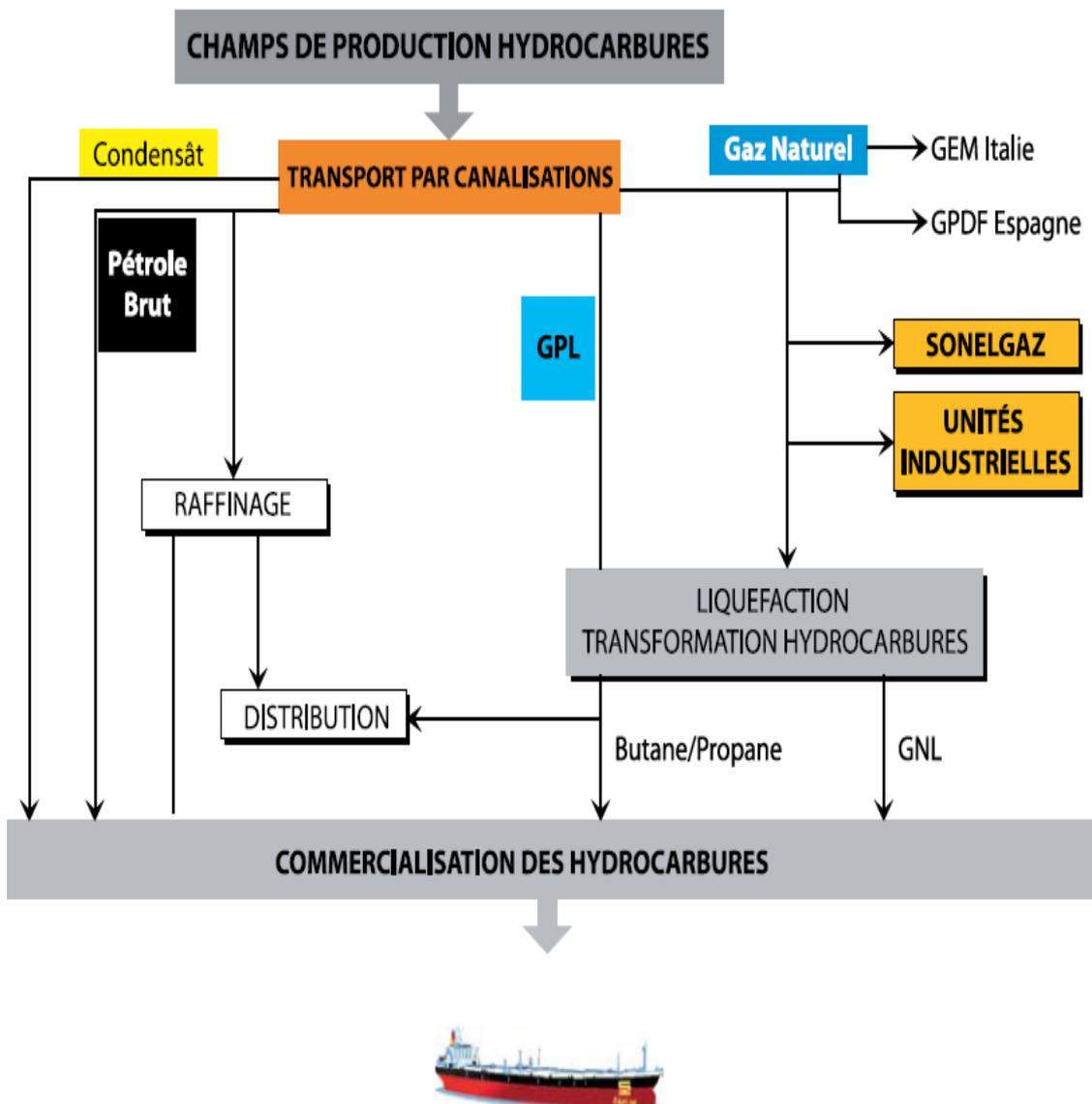


FIGURE 1.2 – Le processus du transport des hydrocarbures

1.4 Organisation de l'Activité TRC

l'activité Transport par Canalisation est organisée autour des Structures Opérationnelles et des Structures Fonctionnelles [4].

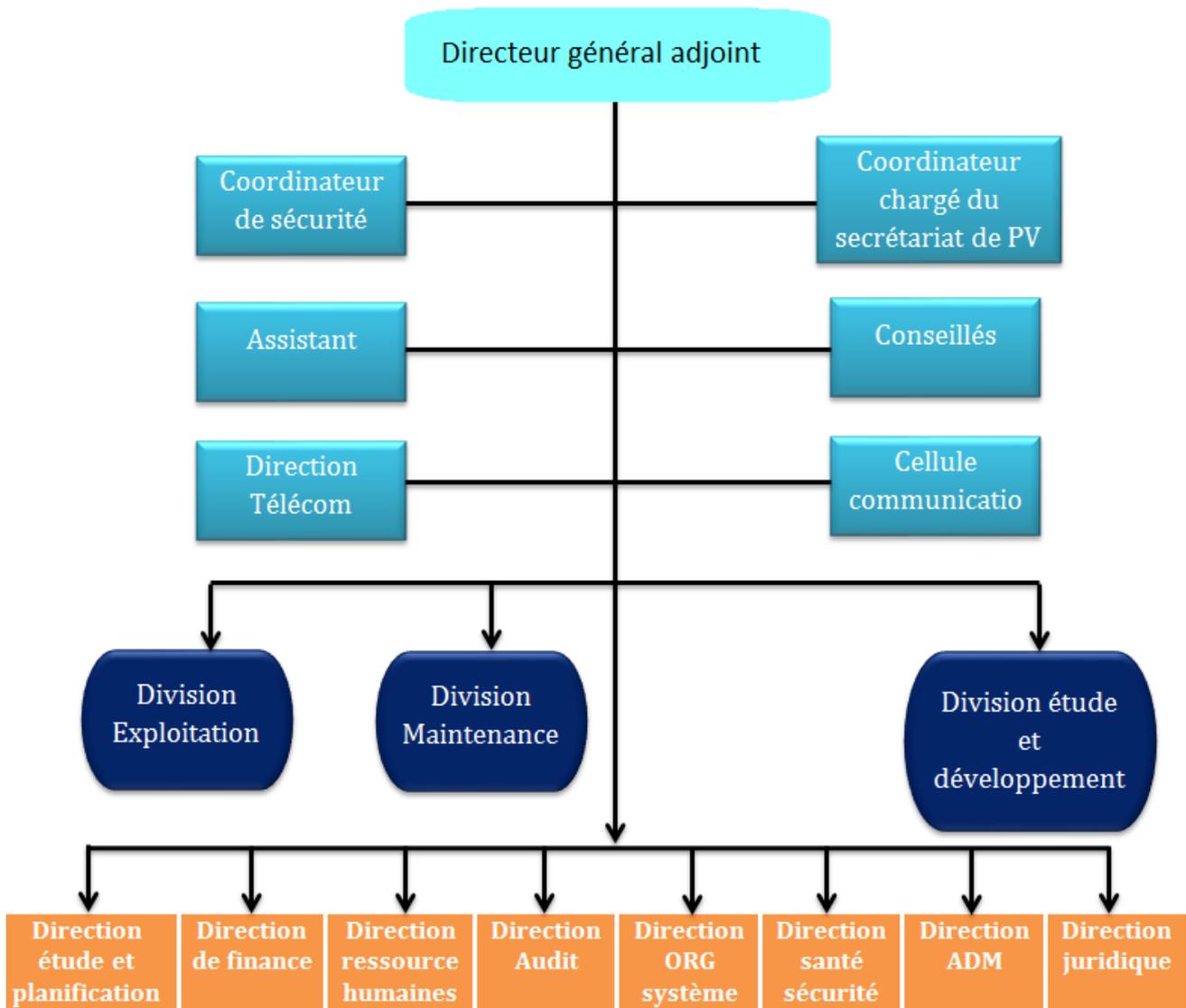


FIGURE 1.3 – Organigramme de l'Activité TRC

1.5 Missions de l'Activité TRC

La branche de transport par canalisation a pour mission :

- La gestion et l'exploitation des ouvrages concentrés et les canalisations de transport des hydrocarburs.
- La coordination et le contrôle de l'exécution des programmes de transport arrêtés en fonction des impératifs de production et de commercialisation.
- La maintenance, l'intervention et la protection des ouvrages concentrés et canalisation de transport des hydrocarburs.
- La conduite des études, la réalisation et la gestion des projets de développement du réseau.

1.6 Patrimoine de l'Activité TRC

- TRC dispose de 34 canalisations dont 11 sont réservées au pétrole brut, 3 pour le condensât, 4 pour le GPL et 16 pour le gaz naturel.
- 357 millions TEP en Pétrole.
- 82 stations de pompage et de compression.
- 127 bacs de stockage d'une capacité de design de 4.3 millions TEP .
- 03 ports pétroliers d'une capacité opérationnelle de 320 MTA.
- 03 bases principales de maintenance.
- 21 oléoducs d'une longueur de 9 946 km, avec une Capacité de transport de 198,51 Millions TM/an ;
- 16 gazoducs d'une longueur totale de 9 677 km, avec une Capacité de transport de 165,7 milliards de Sm³/an ;
- 01 Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) Hassi R'mel.
- 01 Centre de Dispatching des Hydrocarbures Liquides (CDHL) Haoud El Hamra.
- 01 Centre de Stockage et Transfert des Huiles (CSTH).[1]

Sonatrach assure l'acheminement et le transport des hydrocarbures via l'activité TRC.

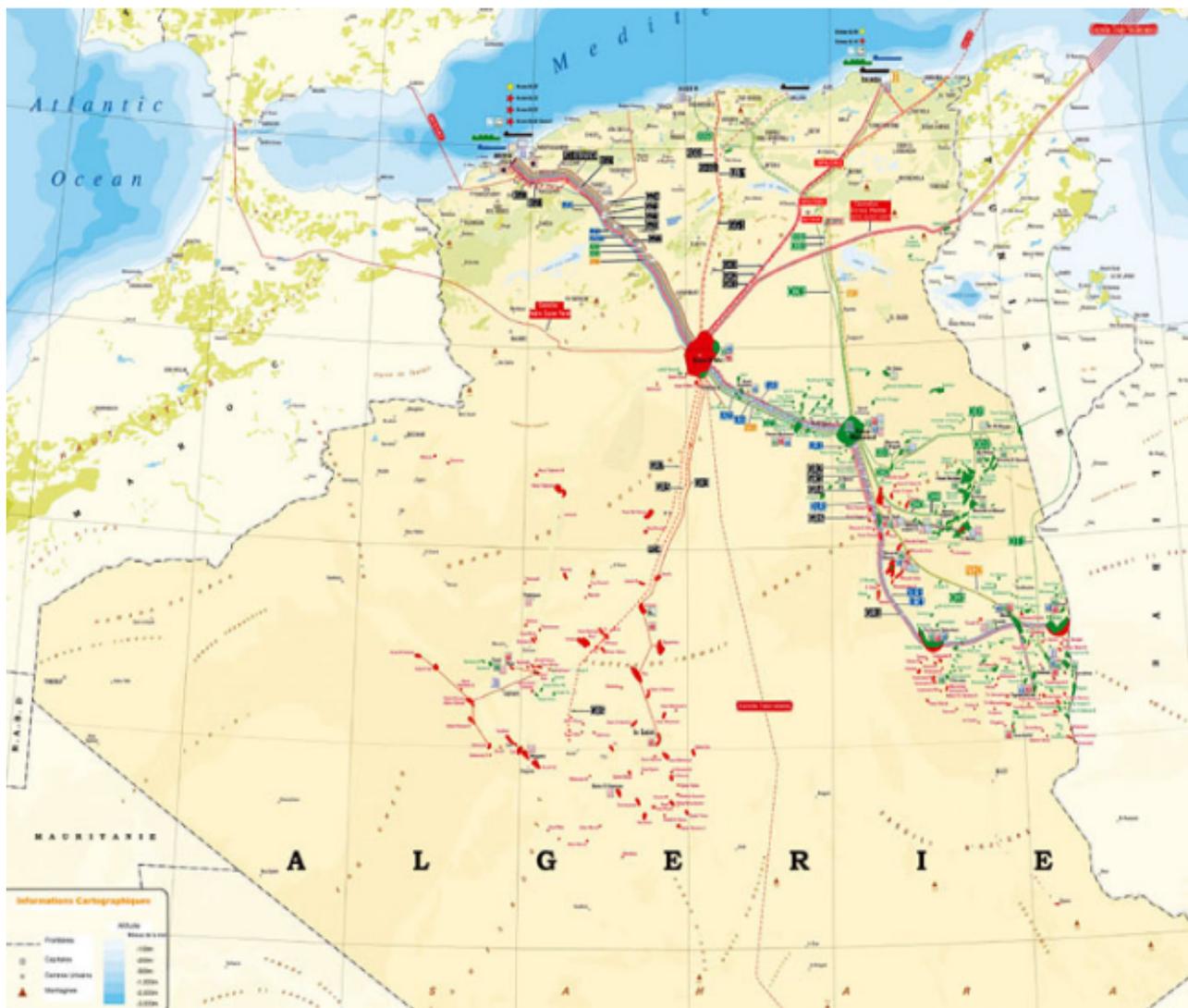


FIGURE 1.4 – Réseau de transport par canalisations

Chapitre 2

GÉNÉRALITÉS SUR LES HYDROCARBURES

Introduction

Confrontées à une problématique d'optimisation liée au transport des hydrocarbures, plus précisément les stations de compression, nous présenterons dans ce chapitre la terminologie nécessaire avant de décrire la problématique et ses facettes.

2.1 Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des molécules organiques exclusivement composées de carbone et d'hydrogène. Ils sont inflammables, à l'image du pétrole et du gaz naturel, deux carburants importants. Par ailleurs, ils ne se mélangent pas à l'eau.

2.2 Mode de transport des hydrocarbures

Pour le transport des hydrocarbures il existe plusieurs moyens permettant de satisfaire cette instance, parmi ces moyens il y a :

- Le transport routier.
- Le transport par voie ferrée.
- Le transport par voie navigable.
- Le transport par canalisation.

2.2.1 Définition d'une canalisation

Une canalisation ou un pipeline(en anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, ou poly-phasiques, d'un endroit à un autre.

Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'aciers soudés de bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol.

Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés (c'est le cas sous l'eau).

2.2.2 Les caractéristiques de la canalisation

Les caractéristiques de la canalisation ainsi définies, diamètre et épaisseur permettant de fixer pression de service et perte de charges, conduisant à la détermination de l'énergie de pression à fournir au fluide par pompage ou par compression, le problème simple pour les fluides incompressibles, pour lesquels la perte de charges est proportionnelle à la distance, devient évidemment plus complexe pour les gaz, pour lesquels la perte de charge dépend de la pression moyenne dans le tronçon de la canalisation, donc l'espacement des points d'injection de puissance, c'est-à-dire des station de compression.

2.2.3 Les types de canalisation

Le nom et le type d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de **gazoduc**.
- Pour le pétrole, on parle **d'oléoduc**.
- Pour l'eau on parle **d'aqueduc**.
- Pour l'eau salée, on utilise le terme de **saumoduc**.
- Pour l'oxygène, on utilise le terme d'oxygénoduc ou **d'oxyduc**.
- Pour l'hydrogène, on utilise le terme **d'hydrogénoduc**.

2.3 Gaz naturel

Le gaz naturel est une énergie primaire bien répartie dans le monde, propre et de plus en plus utilisée. Elle dispose de nombreuses qualités abondance relative, souplesse d'utilisation, qualités écologiques, prix compétitifs. La mise en oeuvre 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.[5]

Description du gaz naturel

Le gaz naturel est incolore, inodore, insipide, sans forme particulière et plus léger que l'air. Il se présente sous sa forme gazeuse au dessus de -161°C . Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures légers comprenant du méthane, de l'éthane, du propane, des butanes et des pentanes. Cependant, son composant principal est le méthane (au moins 84,87%).

Issu de la dégradation d'anciens organismes vivants, il est souvent présent dans les mêmes zones de production que le pétrole à des profondeurs allant de 1000 à 6000 mètres sous terre, il est extrait par forage [5].

Les Caractéristiques principales du gaz naturel sont les suivantes :

- Densité : 0.656 par rapport à l'air.
- Masse volumique : 0.78 kg/ m³.
- La capacité énergétique du gaz naturel est appelée Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) : 9482 Kcal= m³.

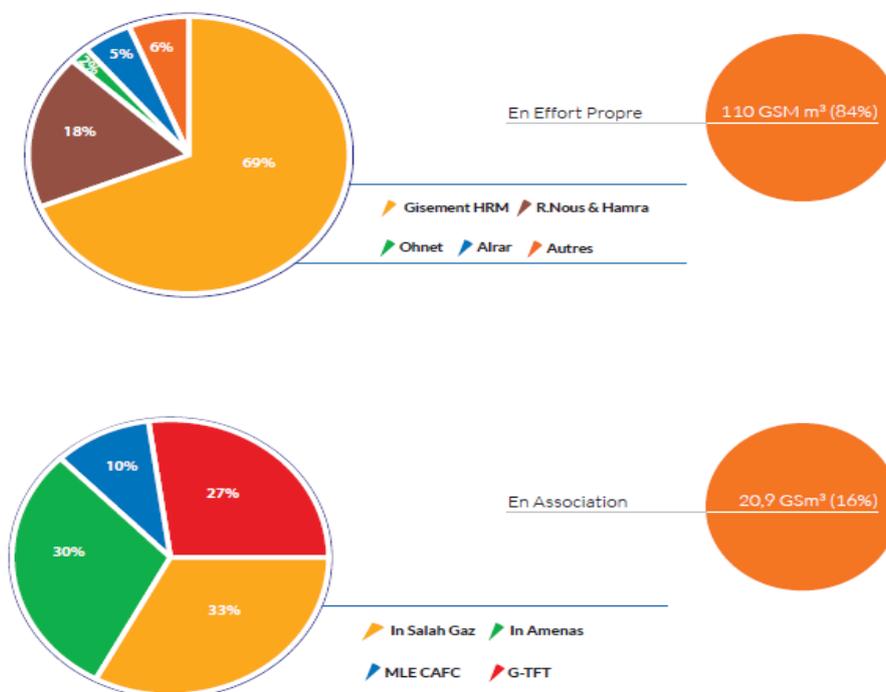


FIGURE 2.1 – La production de gaz naturel en 2014

2.4 Description du réseau de transport du gaz

Le transport du gaz consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution.

A l'échelle nationale ou internationale, le transport du gaz relie les gisements aux réseaux de distribution de manière efficace, généralement invisible et en toute sécurité, les moyens de transport du gaz doivent parfois couvrir de longues distances et traverser plusieurs frontières afin de relier les pays producteurs aux pays consommateurs. Il existe deux moyens complémentaires pour transporter le gaz efficacement [5] :

- les gazoducs.
- la transformation en gaz naturel liquéfié (GNL).

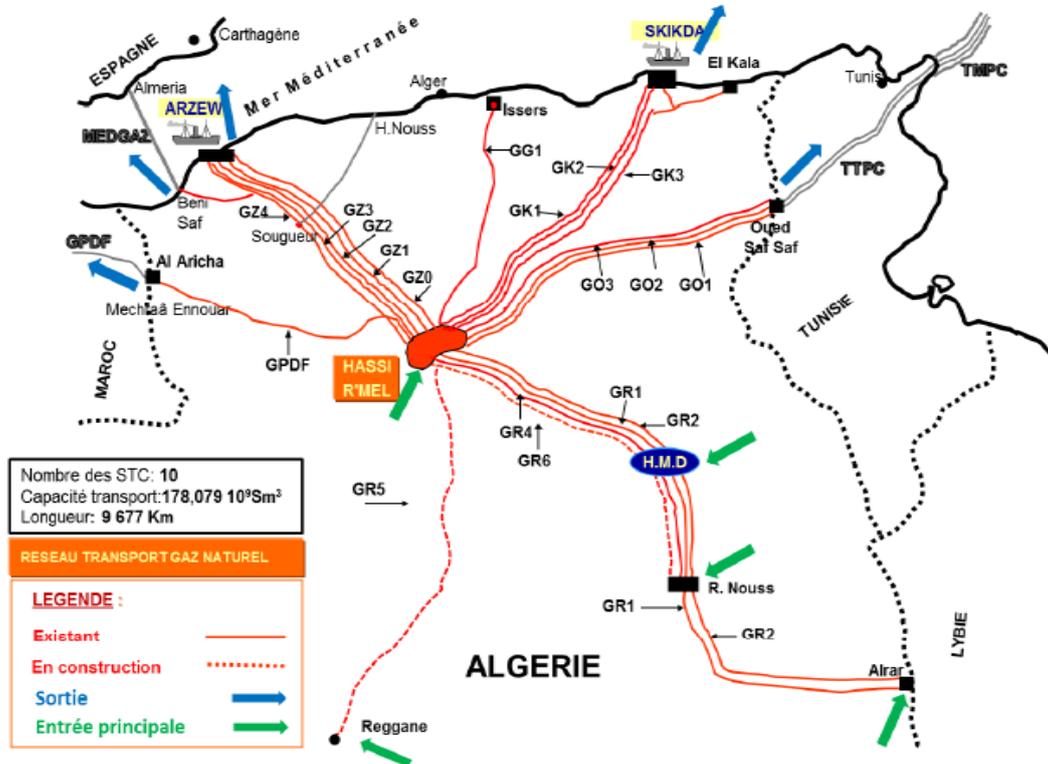


FIGURE 2.2 – Carte du Réseau de Transport du Gaz naturel

2.4.1 Les gazoducs

Ils sont le moyen de transport du gaz naturel le plus utilisé car ils sont fiables et rentables. Des tubes d'acier sont soudés pour former une canalisation pouvant atteindre plus de 3 000 kilomètres de long. Le diamètre de ces tubes varie entre 20" à 48" (1"pouce"=2.54cm). Pour des raisons de sécurité et d'environnement, les gazoducs sont le plus souvent enterrés (de 1 à 1.5 mètre).

Cependant, dans les régions désertiques ou lorsque le sol est gelé (ex : pergélisol), le gazoduc est installé à même le sol.

Les gazoducs sous-marins sont posés au fond de l'océan.

Chaque gazoduc à sa particularité c'est pour cela qu'il faut affecter à chaque conduite ses propres caractéristiques tels que :

- Les tronçons.
- La longueur en kilomètres.
- Le diamètre en pouce.
- le produit qu'il transporte.
- Le nombre de stations de compression.
- La provenance et la destination.

Il existe deux types de gazoducs :

– **Gazoducs Amont :**

Les lignes amont transportent le gaz produit par les gisements vers les Centres de Dispatching.

– **Gazoducs Aval :**

Les lignes Aval transportent le gaz acheminé par les Gazoducs Amont vers les principales installations gazières nationales au nord ainsi que les clients de Sonatrach (Espagne, Italie).

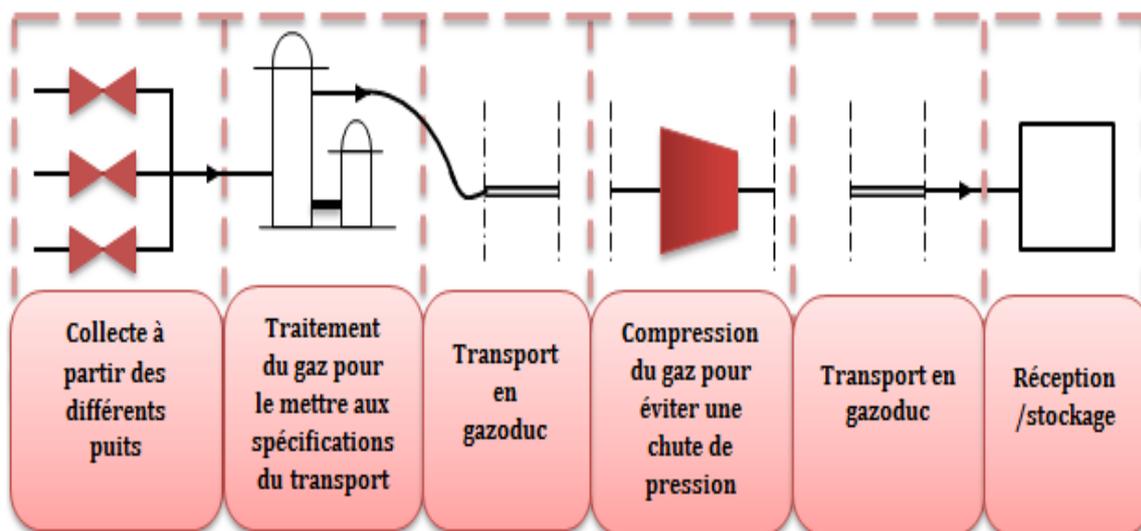


FIGURE 2.3 – Chaîne de transport par gazoduc

2.4.2 Terminal de départ et d'arrivée

Terminal de départ

Un terminal de départ est un point source sert à exploiter le gaz via le réseau principal, il est essentiellement constitué de :

- Une gare de lancement de racleur pour nettoyer périodiquement la conduite,
- Un réseau de tuyauterie,
- Un banc de filtration,
- Un banc de régulation qui a pour but de régler la pression au départ du gazoduc pour permettre l'exploitation à des valeurs basses de débits,
- Un banc de comptage.

Terminal arrivée

Un terminal arrivée est un point de livraison où se terminent un ou plusieurs gazoducs principaux, il est constitué principalement de :

- Une gare de réception de racleur de nettoyage,
- Un réseau de tuyauterie,
- Un terminal d'arrivé peut également comporter un bacs de stockage.



FIGURE 2.4 – Un gazoduc de l'amont vers l'aval

2.4.3 Les types de montage des gazoducs

Il en existe deux types :

1. Montage en parallèle

Une station est dite montée en parallèle si le fluide qui arrive est dérivé sur plusieurs compresseurs qui à leur tour, l'injection dans la canalisation. Le débit de sortie sera égal à la somme des débits évacués par chaque compresseur mais avec une pression constante.

2. Montage en série

Une station est dite en série si le fluide qui arrive est injecté par le premier compresseur vers le deuxième, puis le troisième et ainsi de suite. A la sortie de la station, on aura ainsi une forte pression qui permettra au fluide d'avoir une force accrue de progression dans la canalisation.

2.5 Stations de compression

Les stations de compression servent à compenser les pertes de pression dues au déplacement du gaz naturel, situées sur des intervalles réguliers sur les gazoducs (tous les 120 à 150 km), En effet, en circulant dans les canalisations, le gaz naturel est ralenti par le frottement sur les parois, entraînant une baisse de pression.[6]

Les stations de compression permettent de redonner de la pression au gaz naturel afin que celui-ci soit transporté sur de grandes distances et dispose d'une pression suffisante pour être livré aux points de cession (réseaux de distribution et industriels).

Elles rassemblent plusieurs compresseurs qui aspirent le gaz à basse pression pour le rejeter à une pression importante .

Une station de compression est constitué principalement de :[6]

- Plusieurs turbocompresseur (un compresseur entraîné par une turbine à gaz).
- Des aéroréfrigérateurs .
- Deux turbogénérateur .
- Un bâtiment de contrôle .
- Un bâtiment de service et de logistique .
- Une base de vie.
- Un bac d'eau et une pompe d'incendie .



FIGURE 2.5 – Une station de compression avec quatre machines(turbocompresseurs)

2.5.1 Les aéroréfrigérants

Les aéroréfrigérants sont des échangeurs de chaleur servant à baisser la température du gaz à la sortie des compresseurs jusqu'à 60 , afin de prévenir la détérioration du gazoduc. Il est prévu un nombre de deux aéroréfrigérants par compresseurs.

2.5.2 Contrôle à distance

Les stations de compressions sont entièrement t l command es,leur gestion est assur e par le SMG (service mouvement du gaz)basé à billi re.

2.6 Les compresseurs

2.6.1 La compression du gaz naturel

La pression d'arriv e du gaz naturel à une station de compression est appel e **pression d'aspiration**, et la pression de gaz sortante d'une station est appel e **pression de refoulement**. On les notera respectivement P_{asp} et P_{ref} .

La compression du gaz est un processus destiné à réaliser une augmentation de la pression d'aspiration P_{asp} à la pression de refoulement P_{ref} .

La variation de température n'est qu'une conséquence d'accroissement de la pression des circonstances dans lesquelles s'effectue la compression.

La compression peut s'effectuer dans des machines fonctionnant suivant des principes divers. Il existe deux types de compresseurs :

- **Compresseurs à piston.**
- **Compresseurs centrifuges.**

Dans notre travail, on n'utilise que *les compresseurs centrifuges* montés en parallèle.

2.6.2 Compresseur centrifuge

Les compresseurs centrifuges transforment l'énergie mécanique de rotation en augmentation de pression du gaz. Autrement dit, ils transforment la vitesse en pression et sont les plus utilisés dans l'industrie des pipelines, en raison de leur domaine d'application, de leur prix moins élevé, de leur souplesse d'exploitation et de leur bon rendement qui varie dans l'intervalle suivant [0.70 - 0.85].

Les paramètres qui permettent le choix des compresseurs sont :

- Le débit du gaz à comprimer.
- La pression de refoulement.
- Le taux de compression.

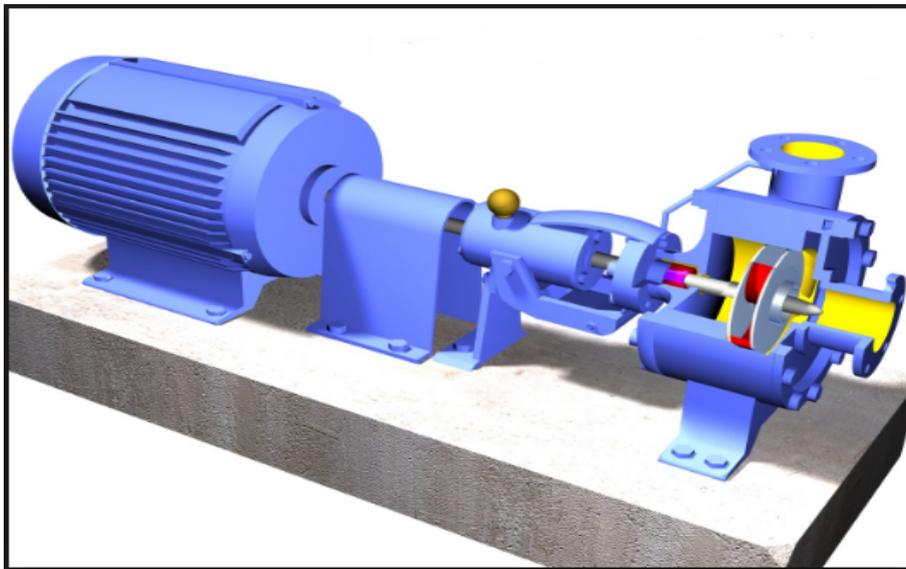


FIGURE 2.6 – Un compresseur centrifuge

2.6.3 Principe de fonctionnement d'un compresseur centrifuge

Le compresseur tourne à vitesse élevée dans laquelle une ou plusieurs roues fournissent l'énergie nécessaire au transfert du gaz. Lorsque cette énergie doit être importante, il est nécessaire de prévoir plusieurs roues conduisant parfois à l'amélioration de ces machines par plusieurs étages de compression.

L'augmentation de pression est assurée par les roues, les diffuseurs et les canaux de retour. La vitesse de rotation de la roue soumet le gaz à une force centrifuge qui se traduit par une augmentation de vitesse, de pression et de température dans la roue. Le diffuseur puis le canal permet de ramener le gaz dans la roue suivante en gagnant encore de la pression par rapport à celle de sortie par ralentissement de la vitesse du gaz.

Les compresseurs centrifuges demandent une pression minimale et une autre maximale.

- Pression de d'aspiration (pression minimale) :c'est la pression minimale exigée par les compresseurs pour qu'ils fonctionnent.
- Pression de refoulement (pression maximale) :c'est la pression maximale avec laquelle les stations refoulent le gaz.

2.6.4 Applications

Le compresseur centrifuge est utilisé :

- dans les gazoducs (pour déplacer le gaz naturel du gisement au consommateur).
- pour le stockage souterrain du gaz naturel mais aussi du dioxyde de carbone.
- dans les raffineries de pétrole et sur les sites de traitement de gaz naturel, pétrochimiques et chimiques.
- sur les sites de séparation de l'air (pour fabriquer des produits gaziers).
- dans les appareils de réfrigération de climatisation.
- dans les appareils fournissant de l'air comprimé.
- dans les turbines à gaz et les unités auxiliaires de puissance.
- dans les systèmes de pressurisation à bord des avions (dans le but de maintenir une pression sécuritaire et confortable aux personnes).

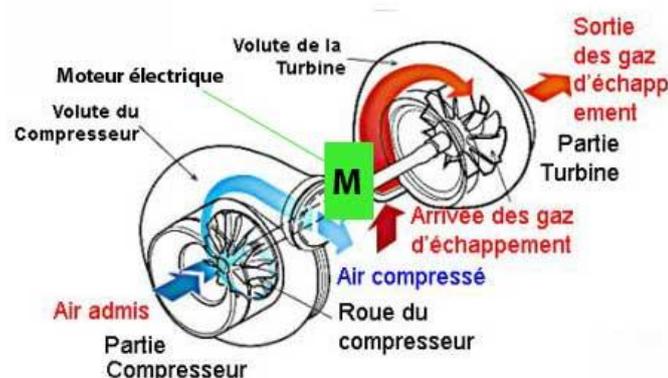


FIGURE 2.7 – Schéma synoptique d'un Turbocompresseur

2.6.5 Les turbines à gaz

Une turbine à gaz est une machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne dont le rôle est de produire :

- Soit de l'énergie mécanique par l'entraînement en rotation d'un arbre lui-même couplé à une machine industrielle ou à une hélice,
- Ou bien de l'énergie cinétique par détente des gaz en sortie de turbine dans une tuyère,
- La plupart des moteurs thermiques utilisent l'oxygène de l'air ambiant comme comburant et lui font subir des transformations suivant trois phases principales qui se succèdent dans l'ordre :
 - Compression, afin d'élever sa pression et sa température,
 - Avant de pénétrer dans la chambre de combustion où il est mélangé au carburant pour créer le mélange carburé qui sera enflammé,
 - Et fournira l'énergie thermique nécessaire à l'entraînement du compresseur par détente dans la turbine puis l'énergie cinétique ou mécanique demandée par l'application.

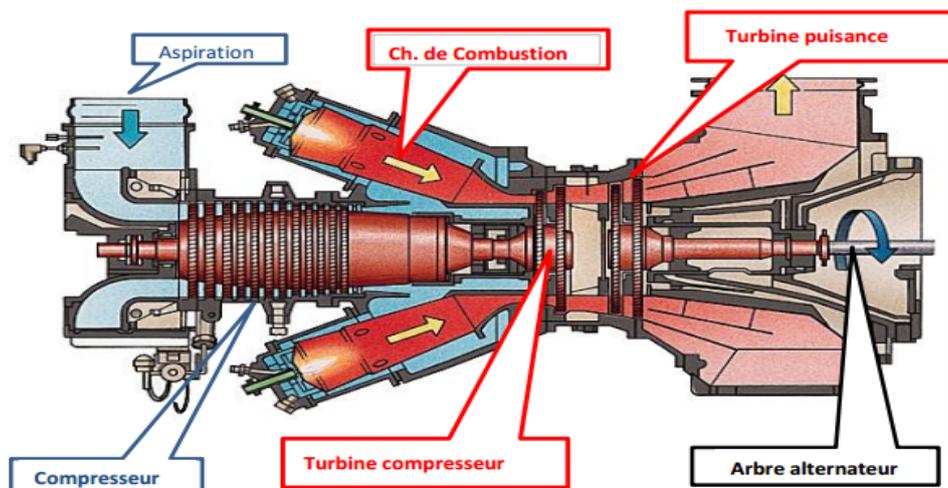


FIGURE 2.8 – Turbine à gaz General Electric

2.7 Centres de dispatching

– Le Centre de Dispatching d’Hydrocarbures Liquides (CDHL) :

Il a une Capacité de 1 400 000 barils/jour, est implanté à Haoud El Hamra (Hassi Messaoud), il permet notamment d’assurer :

- La réception du pétrole brut et condensat.
- Le stockage du pétrole brut et condensat.
- L’expédition du pétrole brut et condensat vers les Terminaux Marins et les raffineries, avec une flexibilité et une souplesse d’exploitation.

– Le Centre National de Dispatching Gaz (CNDG) :

Il a une capacité de 390 millions Sm³/jour, situé à Hassi R’mel, reçoit la totalité de la production de Gaz naturel en vue de son acheminement par gazoducs, en plus du marché national, vers :

- La zone industrielle d’Arzew, via la nappe ouest.
- La zone industrielle de Skikda, via la nappe est.
- La région centre, via le GG1.
- L’exportation directe, via le GEM, à destination de l’Italie et de la Slovénie.
- L’exportation directe, via le GPDF, à destination de l’Espagne et du Portugal.
- MEDGAZ à destination de l’Espagne, via le GZ4.

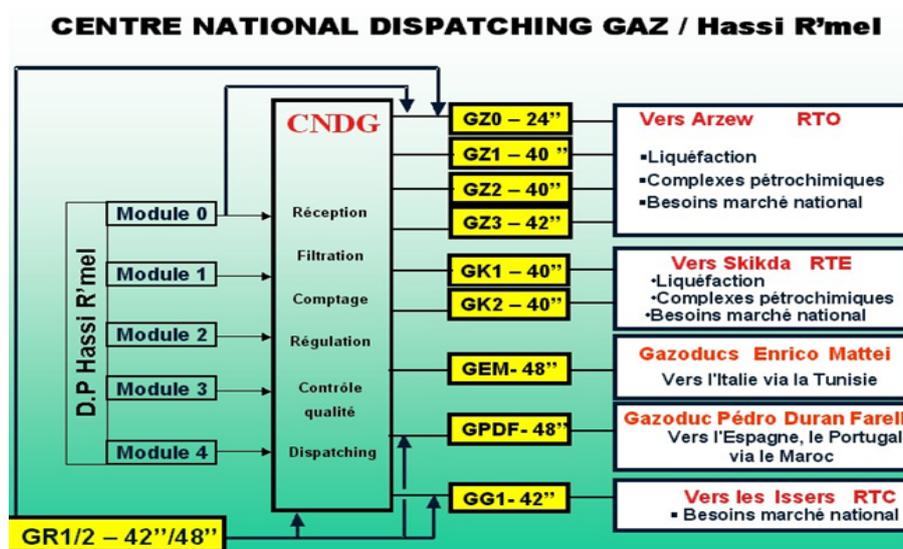


FIGURE 2.9 – Centre National de Dispatching Gaz - Hassi R’mel

2.7.1 Présentation du Champ de Hassi R'mel

Hassi R'mel est située à environ 550 km au sud de la capitale à une altitude moyenne de 760 m.

Le développement du champ de Hassi R'mel est étroitement lié au développement de l'industrie du gaz dans le monde et les importantes réserves recelées par ce gisement, plus de 2800 milliards de m³ ont constitués un atout important pour lancer une politique d'industrie gazière de grande envergure pour le pays [7].

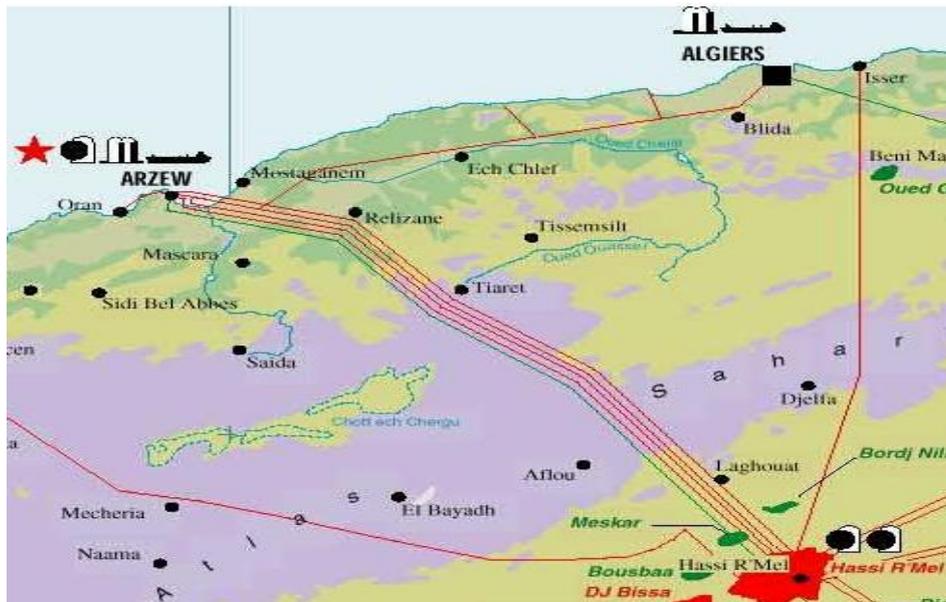


FIGURE 2.10 – Situation géographique du site de Hassi R'Mel

La gaz naturel de Hassi R'mel est riche en condensats. Pour maximiser la récupération totale, une partie du gaz "sec" (après extraction des condensats) est réinjecté dans le gisement. Cette pratique se traduit sur le long terme par une diminution du ratio condensats/gaz. Du gaz de Hassi R'Mel est également injecté dans des gisements de pétrole alentour, pour y améliorer la récupération du pétrole [7].

2.8 Calculs hydrauliques

Débit

Un Débit est le quotient de la quantité du fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement, on a deux types de débit :

– Débit massique M

si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt de cet écoulement, le débit massique est défini comme suit :

$$M = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.1)$$

unité : kg/s

– Débit volumique Q

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt de cet écoulement, le débit volumique est défini comme suit :

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.2)$$

unité : m^3/s

Le diamètre D

On définit le diamètre d'un gazoduc par la formule suivante

$$D = \left[D_{ext} \cdot \frac{2.54}{100} \right] - 2.e \quad (2.3)$$

Où

D : Le diamètre intérieur du tube en mètre.

D_{ext} : Le diamètre extérieur du tube qui est donné en pouces .

e : épaisseur de la paroi du tube en mètre.

Il faut aussi préciser que : 1 pouce=0.0254 m

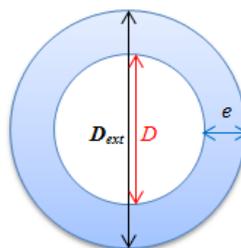
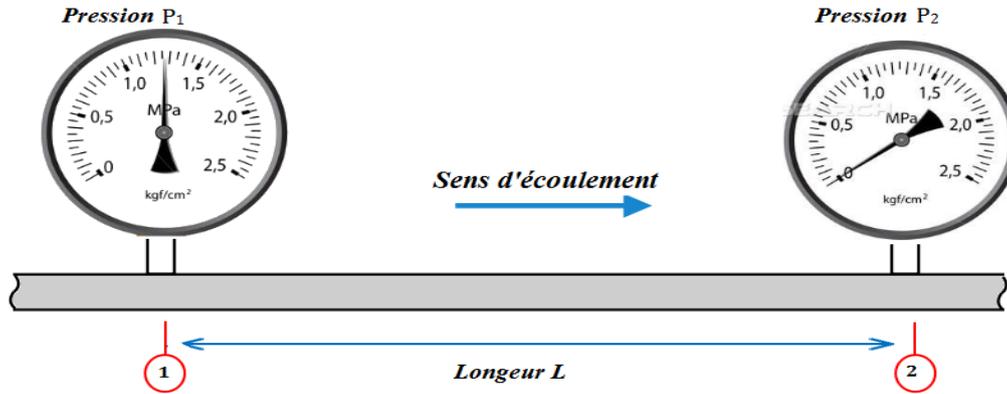


FIGURE 2.11 – Schéma d'un tube

• **La perte de charge :**

Lors de son transport dans les gazoducs, le gaz subit des frottements avec les parois des canalisations. Ce qui fait perdre de la pression au gaz et cette perte est appelée perte de charge. C'est le phénomène le plus problématique du transport de gaz et de là provient une des difficultés du problème. En effet, sans la perte de pression induite par ce phénomène, le gaz circulerait très facilement dans les gazoducs.



2.9 Formule d'écoulement du gaz

2.9.1 Équation de chute de pression (perte de charge)

La formule de perte de charge dans un tronçon "ij" s'exprime de la façon suivante :

$$P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2 = R_{ij} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad (2.4)$$

avec

- P_i : Pression initiale (entrante) dans le tronçon (Kpas).
- P_j : Pression terminale (sortante) sur le tronçon (Kpas).
- Q : Débit du gaz (m^3 / jour).
- D : Diamètre intérieur du gazoduc (mm).
- R_{ij} : Constante qui dépend des paramètres du tronçon.
- e : Base de logarithme népérien ($e=2,718\dots$).
- se_{ij} une constante qui prend en considération l'altitude de la conduite, sans unité, définie par la formule suivante :

$$se_{ij} = 0.0684.G \left[\frac{H_j - H_i}{T_f Z} \right] \quad (2.5)$$

avec

- H_i : L'altitude en amont de tronçon (m).
- H_j : L'altitude en aval de tronçon (m).
- T_f : La température finale du gaz K(273,15+C°).

Cette constante sera calculée à partir de l'équation du débit de la manière suivante :

2.9.2 Équation de calcul du débit Q

L'équation de calcul du débit s'exprime de la façon suivante : [8]

$$Q = 5.747 * 10^{-4} \cdot F \cdot \sqrt{\left(\frac{T_b}{P_b}\right) \cdot \left[\frac{P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2}{T_m \cdot L e_{ij} \cdot G \cdot Z}\right]} \cdot D^{2.5} \quad (2.6)$$

avec

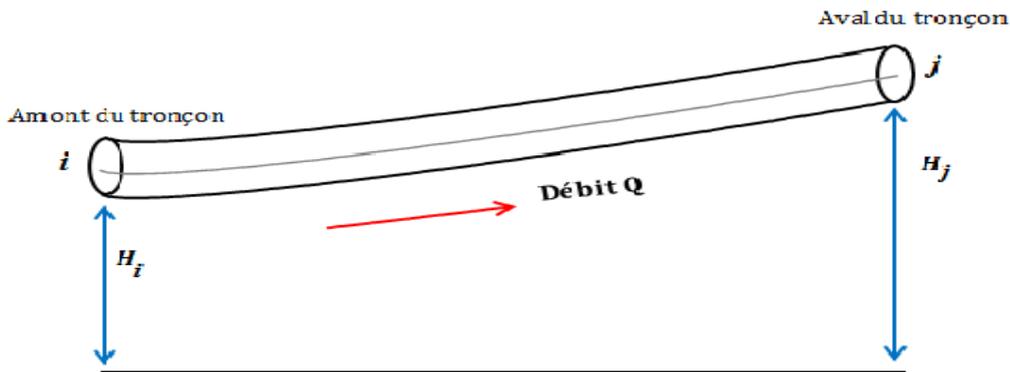


FIGURE 2.12 – Schéma d'un tronçon ij

- Q : Débit du gaz (m^3 =jours).
- P_b : Pression de base (Kpas).
- T_b : Température de base K (273,15 +C°).
- G : Gravité du gaz.
- Z : Facteur de compressibilité (sans unité).
- T_m : Température moyenne du gaz dans la conduite K (273,15 +C°).
- $F = 2 \sqrt{\lambda}$ avec λ : facteur de friction
- P_i : Pression initiale dans le tronçon (Kpas).
- P_j : Pression terminale sur le tronçon (Kpas).
- D : Diamètre intérieur de la conduite (mm).
- e : Base de logarithme népérien ($e=2,718...$).
- $L e_{ij}$: Longueur équivalente qui prend en considération la différence de l'altitude entre

l'amont et l'aval du tronçon .

$$Le_{ij} = \frac{L(e^{se_{ij}} - 1)}{se_{ij}} \quad (2.7)$$

Transformation de l'équation de flux pour avoir la formule de chute de pression, pour déterminer le coefficient R_{ij} .

1. On calcule Q2

$$Q^2 = (5.747)^2 * 10^{-8} . F^2 . \left(\frac{T_b}{P_b} \right) . \left[\frac{P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2}{T_m . Le_{ij} . G . Z} \right] . D^5 \quad (2.8)$$

2. On fait sortir la formule de perte en charge

$$P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2 = \frac{Q^2}{D^5} \left(\frac{T_m . Le_{ij} . G . Z}{(5.747)^2 * 10^{-8} . F^2 . \left(\frac{T_b}{P_b} \right)} \right) \quad (2.9)$$

On pose $A = (5.747)^2 * 10^{-8}$ et $B = \left(\frac{T_b}{P_b} \right)$

3. On fait sortir le coefficient R_{ij}

$$R_{ij} = \frac{T_m . Le_{ij} . G . Z}{A . B . F^2} \quad (2.10)$$

D'où la perte de charge sera exprimée comme suit :

$$P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2 = R_{ij} . \frac{Q^2}{D^5} \quad (2.11)$$

4. Le facteur de compressibilité

On dit qu'un fluide est compressible, si pour une quantité massique donnée de gaz qui occupe un volume donné V1, dans les conditions de pression et de température (P1;T1), occupe un autre volume V2 en changeant les conditions de (P1;T1) à (P2;T2). [8]

Cette propriété de gaz est représentée par le facteur de compressibilité **Z** qui est exprimé en fonction de la température, la pression et la composition de gaz.

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul du facteur de compressibilité, on peut citer la méthode de CNGA (California Natural Gas Association), qui est la plus simple et rapide en termes de calcul.

$$Z = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{P_m * 344.4(10)^{1.785*d}}{T_m^{3.825}} \right) \right]^r} \quad (2.12)$$

avec :

- P_m : Pression moyenne (Kpas).
- T_m : Température moyenne K ($273,15+C^\circ$).
- d : Densité relative du gaz.

5. Nombre de Reynolds

Un paramètre important pour caractériser le type de mouvement des fluides circulant dans un gazoduc, le nombre de Reynolds dépend du débit massique M , le diamètre intérieur du gazoduc, la densité et la viscosité du gaz, il peut être calculé par la relation : [8]

$$Re = \frac{4M}{\pi D \mu'} \quad (2.13)$$

- Re : nombre de Reynolds (sans unité).
- M : Le débit massique, $M = Q \times \rho$
- Q : Le débit volumique.
- ρ : La masse volumique de gaz, ($\rho = 0,78$).
- $\pi = 3,14.....$
- D : Diamètre intérieur du gazoduc.
- μ : La viscosité du gaz (Kg/m.s), ($\mu = 1,25 \times 10^{-5}$).

6. Coefficient de friction

Coefficient de résistance hydraulique établit par Darcy, il est calculé de la même manière que pour les liquides. Le calcul du coefficient de friction peut se faire par l'intermédiaire de la formule suivante : [8]

$$\lambda = 0.067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2.Rug}{D} \right) \quad (2.14)$$

- Re : nombre de Reynolds (sans unité).
- Rug : La Rugosité de la conduite (mm), $Rug = 0,015$.

7. Puissance de compression

La formule qui calcule la puissance d'un compresseur nécessaire pour comprimer un débit Q est la suivante : [8]

$$W_a = \frac{286.76}{mG} T_1 \left[\left(\frac{P_j}{P_i} \right)^m - 1 \right] \quad (2.15)$$

- W_a : Puissance d'un compresseur (joule=kg).
- $m = \gamma - 1 / \gamma$, avec
- γ : Le rapport de chaleur spécifique qui vaut 1,28.

- T_1 : Température d'aspiration de gaz (K) .
- P_i : Pression d'aspiration (Kpas) .
- P_j : Pression de refoulement (Kpas).

8. Hauteur adiabatique

La Hauteur adiabatique caractérise la puissance absorbée par le compresseur pour comprimer le gaz en supposons que la transformation est adiabatique. [8]

Remarque :

On obtient la formule précédente en multipliant la formule de la puissance de compression par g , où $g = 9,81m^3.kg^{-1}.s^{-2}$.

Conclusion

Le gaz naturel, ses caractéristiques, le fonctionnement des stations de compression, et ses composants et les régimes d'écoulement du gaz élaborés dans ce chapitre seront l'objet d'étude pour la diminution des coûts de fonctionnement de ces stations que nous présenterons à la suite de ce mémoire.

Chapitre 3

PROBLÉMATIQUE ET MODÉLISATION

Introduction

Le gaz naturel est devenu, ces dernières années, un véritable enjeu mondial. Sa demande s'accroît de jour en jour et pour fournir cette énergie aux différents usagers les compagnies gazières s'intéressent d'une manière régulière à réduire les coûts d'investissement et les charges d'exploitation, les montants engagés par ces compagnies sont importants, donc une amélioration dans les frais d'investissements et les charges d'exploitation peut impliquer des montants substantiels importants. De ce fait ces compagnies doivent assurer le transport du gaz aux consommateurs d'une manière à réduire les coûts du transport pour le développement et le maintien de leurs réseaux.

Dans ce cadre, l'Algérie avec des réserves gazières importantes, doit profiter de cette conjoncture favorable. Le système de transport par canalisation est largement développé à travers les grandes régions de notre pays.

Les stations de compression du réseau de transport algérien consomment beaucoup de gaz naturel, plus de 600 millions de m^3 par an soit un coût de 130 millions de dollars par an, une réduction de 1% de cette consommation peut économiser 1,3 millions de dollars par an.

3.1 Position du problème

L'acheminement du gaz naturel dans le réseau de transport passe par divers dispositifs constitués de pipes, de régulateurs, de valves et de compresseurs. Le gaz naturel est introduit avec une pression importante.

Le gaz perd en pression suite au frottement avec la cloison des canalisations quand le gaz les traverse. La perte de compression est compensée par les stations de compression qui élèvent la pression.

L'objectif de cette étude consiste à :

- Identifier, parmi toutes les stations de compression, celles à mettre en marche,
- Définir, pour chacune des stations en marche le nombre optimal de compresseurs à faire fonctionner en vue de minimiser la quantité à consommer par les stations de compression en service dans le respect des conditions d'exploitation (débit à l'entrée de la station Q , pression d'aspiration P_{asp} et de refoulement p_{ref}).

En Recherche Opérationnelle, une bonne modélisation d'un problème représente une phase importante dans le processus de sa réalisation. Elle consiste en la conversion la plus fidèle possible d'une réalité, généralement très complexe en un modèle mathématique, elle consiste en trois étapes :

– **Identification des variables de décision :**

Les variables de décision représentent comme leur nom l'indique, les décisions à prendre afin de satisfaire le ou les objectifs. Une solution est un ensemble de décisions particulier. Le principe est de fixer ces variables afin d'optimiser le ou les objectifs.

– **Définition d'une fonction coût :**

(appelée aussi fonction objectif) permettant d'évaluer l'état du système (ex : rendement, performance, ...). Autrement dit, c'est le but à atteindre.

Un problème en optimisation peut prendre en compte plusieurs objectifs, même contradictoires. On parle alors d'optimisation multicritères.

– **Description des contraintes imposées aux variables de décision :**

Les solutions doivent satisfaire des contraintes.

Approche de modélisation

La détermination d'un régime de fonctionnement optimal des stations de compression nécessite le choix de la station de compression à mettre en marche ainsi que le nombre de compresseurs qui fonctionnent dans cette station choisie. D'autre part, pour chaque compresseur en fonction on détermine le débit, la vitesse et la hauteur adiabatique de telle sorte à minimiser l'énergie en respectant son domaine de fonctionnement.

Pour permettre la résolution du problème relatif à la perte de charge à travers la canalisation, la présentation de la modélisation mathématique, les paramètres, les variables, les contraintes, ainsi que la fonction objectif seront définis dans ce qui suit .

3.2 Données et paramètres du problème

3.2.1 Système de Transport par Canalisation GZ1/GZ2/GZ3

Un système de Transport par Canalisation est constitué d'un ensemble de canalisation (gazoducs),

Le Système de Transport par Canalisation (STC) GZ1/GZ2/GZ3 fait partie du patrimoine de la Direction Régionale Transport Ouest (RTO).

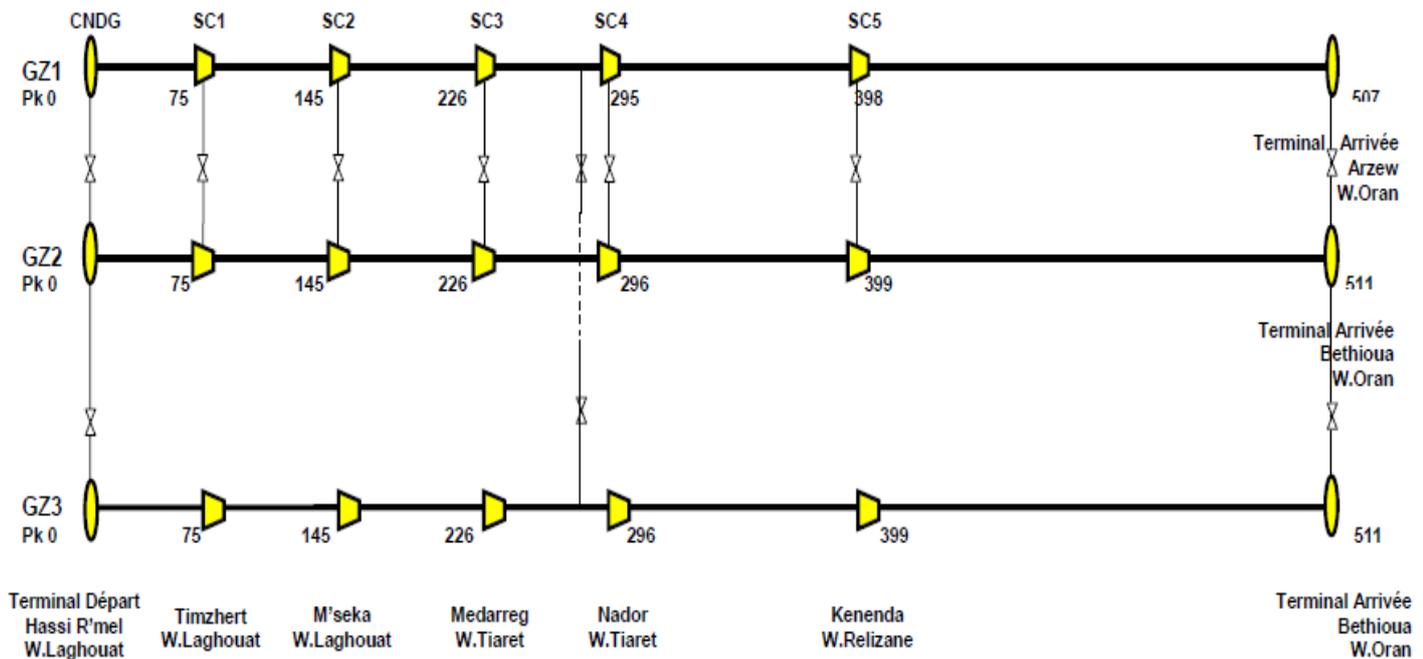


FIGURE 3.1 – Schéma descriptif du Système de Transport par Canalisation

Altitude (m)

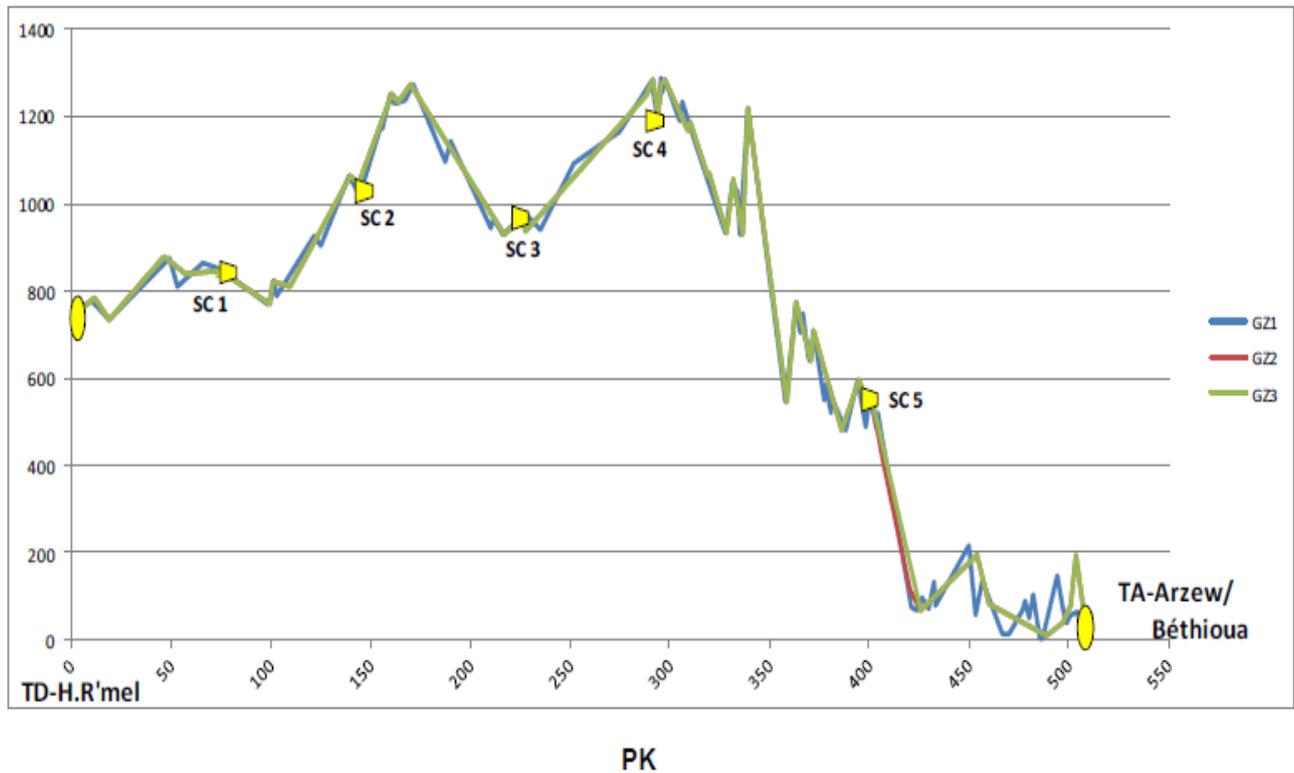


FIGURE 3.2 – Profil Altimétrique des gazoducs GZ1/GZ2/GZ3

3.2.2 Présentation de la ligne GZ1

La ligne de transport du gaz naturel GZ1 a été mise en service en 1976. D'une longueur de 507 km de diamètre 40", elle relie Hassi R'mel (Terminal Départ) à Arzew (Terminal Arrivée). GZ1 dispose de cinq stations de compression (SC) comme l'illustre la Figure 3.3 :

- SC1 Timzhert(Laghouat),
- SC2 M'seka (Laghouat),
- SC3 Medarreg (Tiaret),
- SC4 Djebel Nador (Tiaret),
- SC5 Kenenda (Relizane).

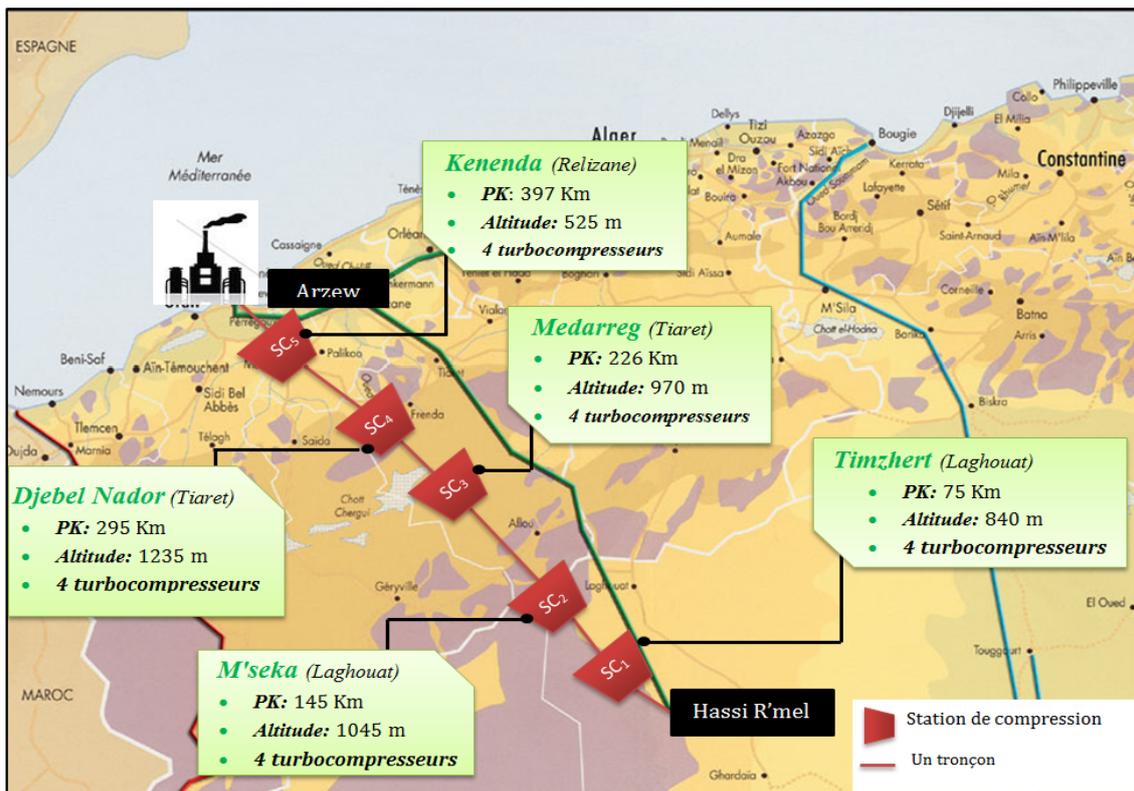


FIGURE 3.3 – Présentation de la ligne GZ1

réparties sur la ligne assurant la mise sous pression du fluide gazeux nécessaire à son écoulement, entraînées par 4 compresseurs centrifuges (voir Figure 3.4), les cinq stations de compression consomment du gaz.

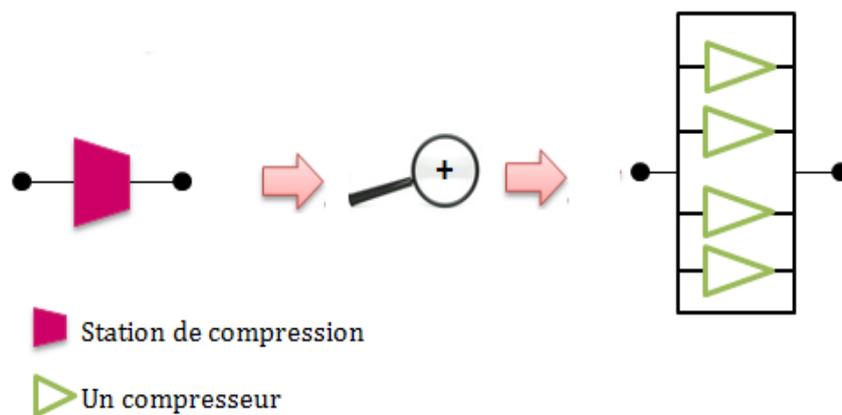


FIGURE 3.4 – Chaque station de compression de GZ1 a 4 TC

3.3 Etude de la station de compression

3.3.1 Régime de fonctionnement d'une station de compression

L'écoulement du gaz naturel dans la conduite est soumis à une perte de pression dûs essentiellement à la rugosité de la surface interne de la conduite et aux éventuels incidents sur la ligne, ce qui se traduit par une insuffisance de la qualité acheminée qu'il faudrait compenser par l'installation des stations de compression.

Les compresseurs centrifuges sont mieux utilisés pour leur faible investissement et leur rendement élevé, l'exploitation de ces compresseurs incite de faire fonctionner les compresseurs aux voisinages d'un régime de fonctionnement optimal.

3.3.2 Régime de fonctionnement des compresseurs

Les caractéristiques de fonctionnement d'un compresseur centrifuge sont représentées par une courbe propre à chaque compresseur, dans notre cas tous les compresseurs sont identiques. La courbe de fonctionnement est donnée en fonction du débit volumique Q (axe des abscisses), de la hauteur adiabatique H (axe des ordonnées), la vitesse S et le rendement adiabatique η .

Les caractéristiques d'un compresseur centrifuge sont limitées par :

- La limite de pompage.
- La limite de gavage.
- vitesse maximale de rotation.
- vitesse minimale de rotation.

3.3.3 Modélisation des courbes caractéristiques des compresseurs

L'exploitation optimale des stations de compression nécessite la modélisation des courbes caractéristiques des compresseurs, alors la modélisation tient une place importante pour le bon fonctionnement des compresseurs et par conséquent les stations de compression.

Un diagramme de fonctionnement d'un compresseur

Il est possible de représenter les caractéristiques de fonctionnement d'un compresseur centrifuge sur une courbe de fonction du débit Q , la vitesse S , la hauteur adiabatique H_{ad} et le rendement adiabatique η .

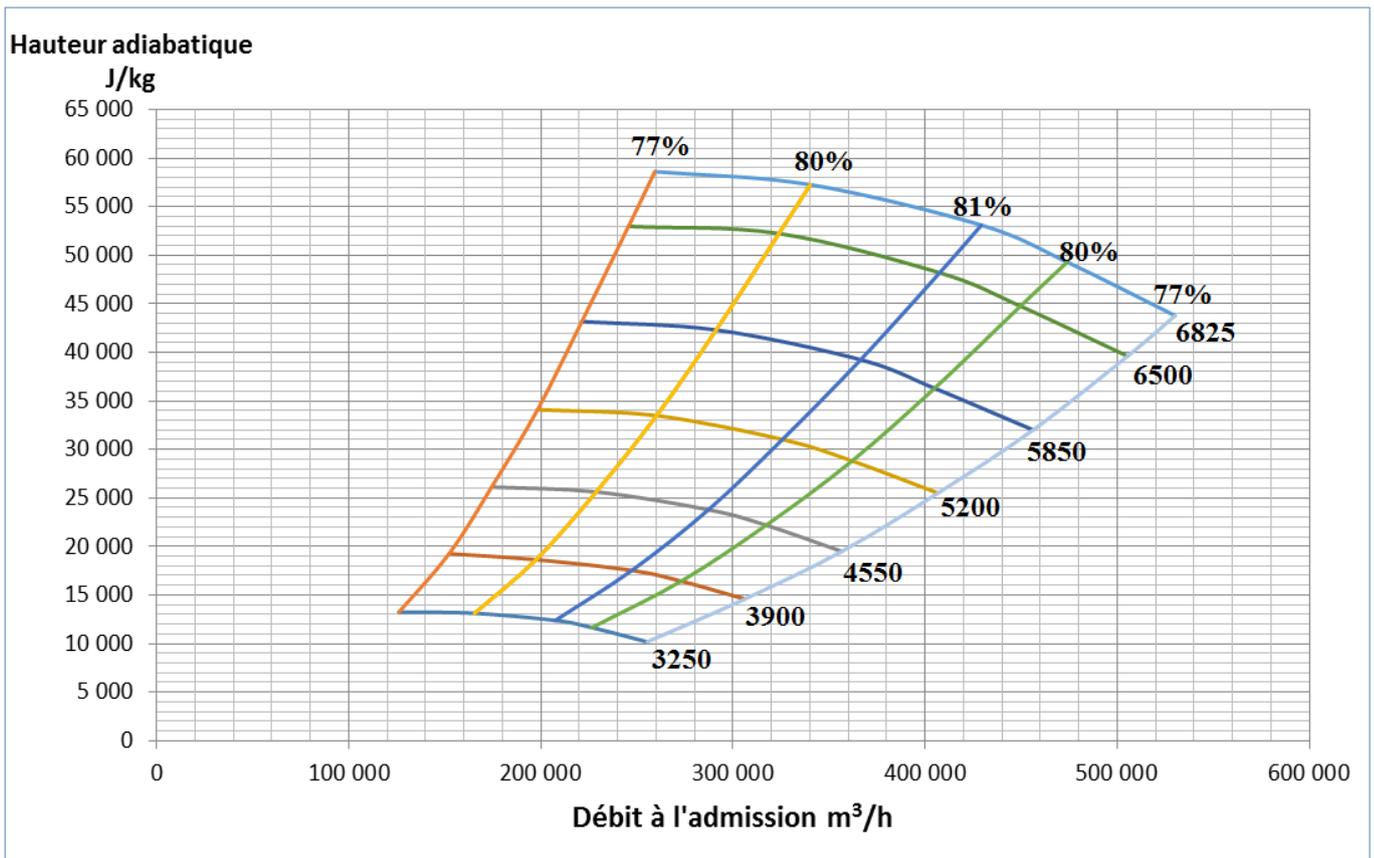


FIGURE 3.5 – Courbe de la hauteur adiabatique d'un compresseur centrifuge

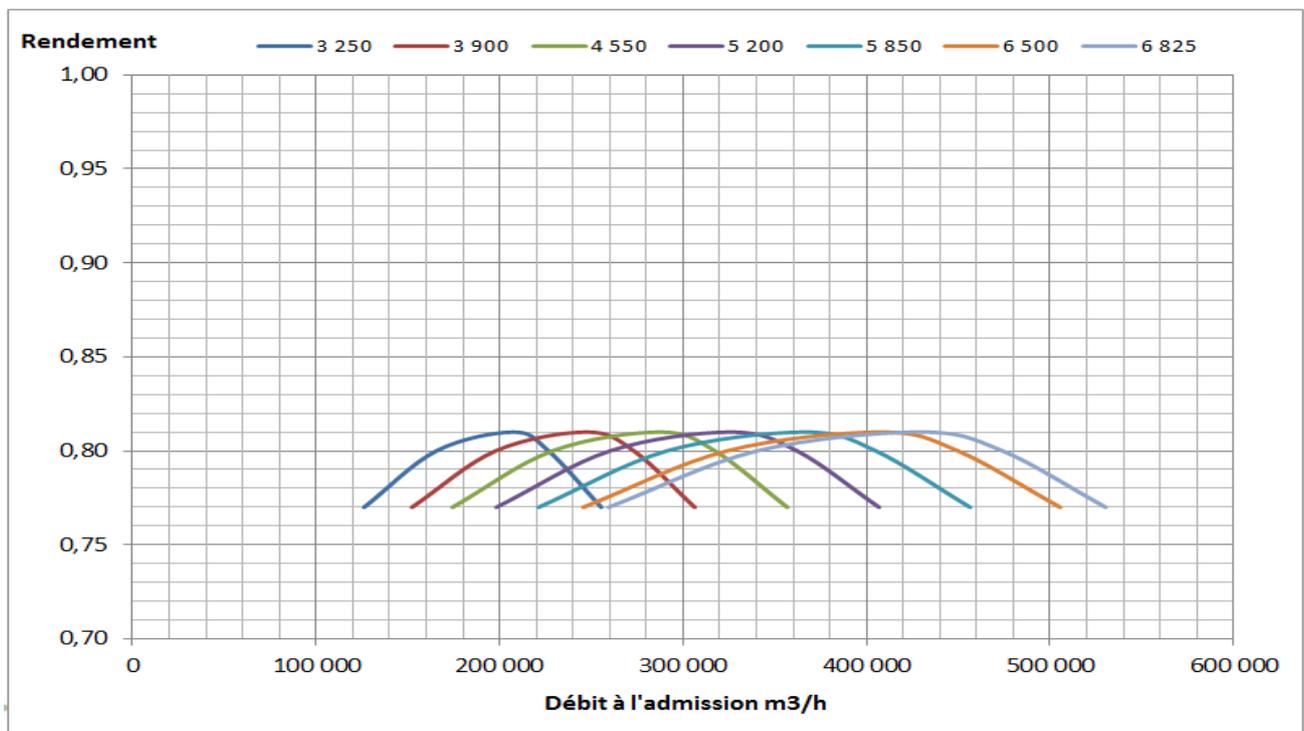


FIGURE 3.6 – Courbe de rendement d'un compresseur centrifuge

Interprétation

Les caractéristiques d'un compresseur sont limitées par :

- **Sur la gauche du diagramme :** *Limitation par la zone de pompage (débit trop faible).*

Le pompage se produit dans un compresseur centrifuge quand le débit est réduit à tel point que le compresseur, à une vitesse donnée, ne peut plus pomper contre la hauteur de pression présente.

A ce moment, une inversion momentanée du sens d'écoulement se produit ainsi qu'une chute de la hauteur de pression normale et le cycle recommence. Cela provoque une impulsion et un choc dans l'ensemble du compresseur et des tuyauteries associées.

Dans ce cas il faut soit diminuer la hauteur soit augmenter le débit, de façon à ce que le fonctionnement du compresseur retourne à droite de la ligne de pompage.

- **Sur la droite du diagramme :** *Limitation par la zone de gavage (débit trop important).*

L'examen d'une courbe caractéristique à vitesse donnée montre qu'au delà d'un certain débit volumique, la hauteur utile diminue, de plus en plus vite, vers les hauts débits.

A ce moment, le rendement diminue également très vite et toute augmentation de puissance ne permet qu'une très faible augmentation de débit.

- **Vers le haut du diagramme :**

Limitation par la vitesse maximale admissibles.

- **Vers le bas du diagramme :**

Limitation par la vitesse minimale que peut développer la turbine.

On définit la hauteur adiabatique d'un compresseur H_{ad} par l'énergie qui resterait emmagasinée dans le fluide par suite d'un procédé de compression adiabatique qui a lieu entre la pression d'aspiration du compresseur et la pression de refoulement de ce dernier.

Les quantités reliées aux compresseurs centrifuges sont le débit Q , La vitesse S , La hauteur adiabatique H_{ad} et le rendement adiabatique η , ces relations sont représentées par les équations suivantes :

La hauteur adiabatique :

$$H_{ad} = (a_0 + a_1(Q/S) + a_2(Q/S)^2 + a_3(Q/S)^3) \times S^2$$

Le rendement adiabatique :

$$\eta = b_0 + b_1(Q/S) + b_2(Q/S)^2 + b_3(Q/S)^3$$

où les paramètres $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$ et b_3 sont des constantes qui dépendent du type du compresseur.

3.3.4 Estimation des valeurs de la hauteur adiabatique et du rendement adiabatique

Pour estimer les valeurs de la hauteur adiabatique et du rendement adiabatique théorique, on doit trouver les valeurs des paramètres a_1, a_2, a_3, a_4 (pour la hauteur adiabatique) et b_1, b_2, b_3, b_4 (pour le rendement). La méthode des moindres carrés sera utilisée pour minimiser l'erreur entre les données observées à partir des courbes caractéristiques du compresseur et les données théoriques calculées à l'aide de formules exprimées ci-dessus.

Principe de la méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est élaborée par Legendre et Gauss au début du XIXe siècle. Permet de comparer des observations qui concernent la mesure des grandeurs physiques, elles sont forcément soumises à des erreurs plus ou moins considérables,[9] à un modèle mathématique censé décrire ces données.

La régression linéaire multiple [10] est la généralisation multivariée de la régression simple. Nous cherchons à expliquer les valeurs prises par la variable endogène Y à l'aide de p variables exogènes X_j , ($j = 1, \dots, p$).

L'équation de régression s'écrit :

$$y_i = a_0 + a_1x_{i,1} + \dots + a_px_{i,p} + \varepsilon_i. \quad (3.1)$$

Nous devons estimer les valeurs des $(p + 1)$ paramètres (a_0, a_1, \dots, a_p) à partir d'un échantillon de n observations. Nous remarquons dans le modèle :

- $i = 1, \dots, n$ correspond au numéro des observations ;
- y_i est la i -ème observation de la variable Y ;
- $x_{i,j}$ est la i -ème observation de la j -ème variable ;
- ε_i est l'erreur du modèle, il résume les informations manquantes qui permettrait d'expliquer linéairement les valeurs de Y à l'aide des p variables X_j .

Pour simplifier les notations, on retrouve souvent une écriture matricielle du modèle dans la littérature :

$$Y = Xa + \varepsilon \quad (3.2)$$

Les dimensions des matrices sont respectivement :

- $Y \rightarrow (n,1)$
- $X \rightarrow (n,p+1)$
- $a \rightarrow (p+1,1)$
- $\varepsilon \rightarrow (n,1)$

La matrice X de taille $(n; p + 1)$ contient l'ensemble des observations sur les exogènes, avec une première colonne formée par la valeur 1 indiquant que l'on intègre la constante a_0 dans l'équation.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{1,1} & \dots & x_{1,p} \\ 1 & x_{2,1} & \dots & x_{2,p} \\ \vdots & & & \\ 1 & x_{n,1} & \dots & x_{n,p} \end{pmatrix}$$

Application

Notre modèle de régression est défini comme suit :

Pour la Hauteur adiabatique :

$$H_{ad} = \left(\frac{Q}{S}, \left(\frac{Q}{S} \right)^2, \left(\frac{Q}{S} \right)^3; a_1, a_2, a_3, a_4 \right) = \left(a_1 + a_2 \left(\frac{Q}{S} \right), a_3 \left(\frac{Q}{S} \right)^2, a_4 \left(\frac{Q}{S} \right)^3 \right) * S^2$$

Pour le Rendement adiabatique :

$$\eta_{ad} = \left(\frac{Q}{S}, \left(\frac{Q}{S} \right)^2, \left(\frac{Q}{S} \right)^3; b_1, b_2, b_3, b_4 \right) = b_1 + b_2 \left(\frac{Q}{S} \right), b_3 \left(\frac{Q}{S} \right)^2, b_4 \left(\frac{Q}{S} \right)^3$$

On calcule le coefficient de corrélation entre les deux valeurs (valeur observée et valeur théorique), noté r qui est égale au rapport de leur covariance et du produit non nul de leurs écarts types (le coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1).

$$Cor(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

où $Cov(X, Y)$ désigne la covariance des variables σ_X et σ_Y leurs écarts types.

Les valeurs des paramètres a_1, a_2, a_3, a_4 pour la hauteur adiabatique (b_1, b_2, b_3, b_4 pour le rendement adiabatique) calculées avec le solveur de Microsoft Excel sont :

Pour la Hauteur adiabatique :

$$a_1 = 1,0000.10^3,$$

$$a_2 = -1,9912.10^{-12},$$

$$a_3 = -7,5939.10^{-12},$$

$$a_4 = -2,9715.10^{-10}.$$

Le coefficient de corrélation $r = 0.991$

Pour le rendement adiabatique :

$$b_1 = 6,7363.10^{-1},$$

$$b_2 = -1,1512.10^{-2},$$

$$b_3 = 4,9884.10^{-4},$$

$$b_4 = -4,3506.10^{-6}.$$

Le coefficient de corrélation $r = 0.976$

Les données de la courbe du compresseur				Le calcul par les moindres carées	
Vitesse	Débit	Hauteur adiabatique	Rendement observé	Hauteur théorique	Rendement théorique
S	Q	H _{obs}	η_{obs}	H _{th}	η_{th}
3250	126 139	13 244	0,77	10 379	0,724
3250	165 530	13 121	0,8	10 148	0,807
3250	207 577	12 3 85	0,81	9 744	0,84
3250	226 608	11 649	0,8	9 498	0,821
3250	255 377	10 178	0,77	9 039	0,738
3900	152 252	19 252	0,77	14 941	0,726
3900	197 840	18 639	0,8	14 620	0,805
3900	247 410	17 535	0,81	14 056	0,84
3900	273 081	16 432	0,8	13 658	0,82
3900	306 275	16 432	0,77	13 020	0,739
4550	174 382	26 119	0,77	20 356	0,72
4550	228 821	25 629	0,8	19 920	0,803
4550	287 244	23 789	0,81	19 154	0,84
4550	317 340	22 195	0,8	18 615	0,821
4550	356 731	19 497	0,77	17 737	0,741
5200	198 282	34 090	0,77	26 594	0,719
5200	260 245	33 477	0,8	26 032	0,802
5200	325 749	31 024	0,81	25 064	0,841
5200	362 042	28 817	0,8	24 327	0,822
5200	406 744	25 506	0,77	23 193	0,743
5850	221 297	43 164	0,77	33 672	0,716
5850	291 227	42 306	0,8	32 967	0,8
5850	366 468	39 240	0,81	31 722	0,841
5850	404 974	36 297	0,8	30 848	0,824
5850	456 315	32 005	0,77	29 395	0,749
6500	245 640	52 974	0,77	41 572	0,716
6500	323 979	52 238	0,8	40 695	0,8
6500	407 629	48 192	0,81	39 152	0,841
6500	449 676	44 758	0,8	38 092	0,824
6500	505 443	39 608	0,77	36 345	0,749
6825	259 360	58615	0,77	45 821	0,718
6825	340 355	57 266	0,8	44 863	0,801
6825	429 316	53 097	0,81	43 134	0,84
6825	474 018	49 295	0,8	41 942	0,823
6825	474 018	43 777	0,77	40 088	0,75

FIGURE 3.7 – Résultats obtenus par estimation

3.4 Formulation mathématique du problème

3.4.1 Les hypothèses du problème

- Dans une station de compression, le **débit** rentrant est égale au débit sortant de la station de compression.
- Chaque station de compression est constituée d'un nombre fixe de compresseurs centrifuges **identiques** (4 compresseurs) montés en parallèle. Cette hypothèse nous a conduit à diviser le débit écoulé à travers la station de compression identiquement sur les compresseurs utilisés.
- Dans une station de compression, le nombre de compresseurs qu'on peut faire fonctionner est 3. Le quatrième reste en mode *standby*.
- La ligne étudiée admet un seul terminal départ et un seul terminal arrivé, donc le débit qui rentre en aval du gazoduc est égale au débit en amont du gazoduc.
- Le diamètre est le même pour tous les tronçons.

3.4.2 Définition des données

Soient les données suivantes :

Tronçons :

- Q : Le débit dans le gazoduc (**m³/jour**).
- R_{ij} : Une constante de la formule de perte de charge liée aux caractéristiques du tronçon (**i,j**).
- D : le diamètre du gazoduc (**mm**).

Compresseurs :

- P_{min} : La pression minimale de service (**kpa**) .
- P_{max} : La pression maximale de service (**kpa**).
- S_{min} : La vitesse minimale du compresseur (**RPM**) (Tour Par Minute).
- S_{max} : La vitesse maximale du compresseur (**RPM**) (Tour Par Minute).
- q_{min} : Le débit minimal du compresseur (**m³/h**).
- q_{max} : Le débit maximal du compresseur (**m³/h**).

3.4.3 Paramètres du modèle

Pour simplifier la modélisation on définit les paramètres suivants :

– I : L'ensemble de tous les points du gazoduc (Voir la figure)

$$I = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$$

– E_c : L'ensemble des couples ordonnés (i, j) représentant les stations de compression.

$$E_c = \{(2, 3); (4, 5); (6, 7); (8, 9); (10, 11)\}$$

– E_p : L'ensemble des couples ordonnés (i, j) représentant les tronçons.

$$E_p = \{(1, 2); (3, 4); (5, 6); (7, 8); (9, 10); (11, 12)\}$$

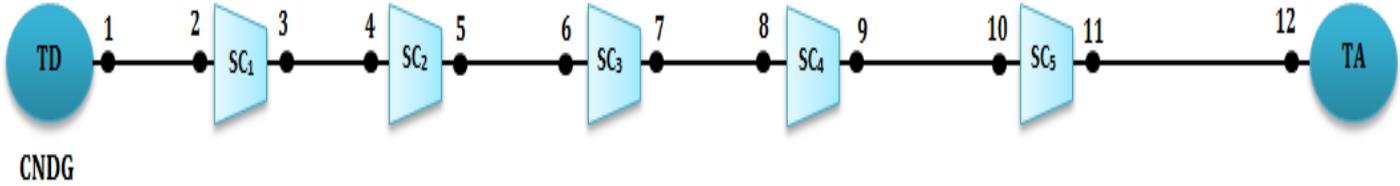


FIGURE 3.8 – Représentation de la ligne étudiée GZ1

3.4.4 Variables de décision

Le problème posé se résume à :

Déterminer le nombre de compresseurs à mettre en fonction à la station (i, j) où $(i, j) \in E_c$ de telle sorte à minimiser la quantité de gaz consommée par cette station, en fonction des invariants, tout en respectant le domaine de fonctionnement des compresseurs.

Donc les variables de décision sont :

- P_i : pression au point i , $i \in I$.
- $W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la station } (i, j) \text{ fonctionne} \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$
- n_{ij} : Le nombre de compresseurs en fonction dans la station $(i, j), \forall (i, j) \in E_c$.
- S_{ij} : La vitesse de rotation du compresseur dans la station $(i, j), \forall (i, j) \in E_c$.
- h_{ij} : La hauteur adiabatique du compresseur dans la station $(i, j), \forall (i, j) \in E_c$.
- q_{ij} : Le débit volumique passé par le compresseur dans la station $(i, j), \forall (i, j) \in E_c$.

3.4.5 Contraintes

a- Contraintes relatives aux tronçons

1. Pour un tronçon $(i, j) \in E_p$, il existe des règles de conservation en perte de charge à respecter. Ceci est exprimé à l'aide de la contrainte suivante (Voir calcul perte de charge page :

$$P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2 = R_{ij} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \quad \forall (i, j) \in E_p \quad (3.3)$$

2. La pression au point i doit être supérieure à la pression minimale de service P_{min} et inférieure à la pression maximale de service P_{max} , ce qui est exprimé à l'aide de la double contrainte suivante :

$$P_{min} \leq p_i \leq P_{max} \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

b- Contraintes relatives aux compresseurs

3. La pression de refoulement P_j d'une station de compression (i, j) est supérieure ou égale à la pression d'aspiration P_i de cette station. En effet, si la station de compression fonctionne alors $P_j > P_i$ sinon $P_j = P_i$.

Ce qui est présenté par la double contrainte suivante :

$$1 \leq \frac{P_j}{P_i} \leq \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad \forall (i, j) \in E_c \quad (3.5)$$

Pour chaque station de compression en marche, le débit qui passe par elle est divisé identiquement sur les turbocompresseurs en fonction. D'où le débit qui passe par chaque turbocompresseur est égal à $w_{ij} \cdot Q \setminus n_{ij}$ donc le triplet des variables $w_{ij} \cdot Q \setminus n_{ij}, P_i, P_j$ doit satisfaire le domaine de fonctionnement d'un turbocompresseur.

Ce qui est présenté par les contraintes suivantes :

4. La hauteur adiabatique est constante entre les compresseurs de la même station :

$$h_{ij} = \left[\left(a_1 + a_2 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right) + a_3 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^3 \right) * S_{ij}^2 \right] \cdot W_{ij} \quad \forall (i, j) \in E_c \quad (3.6)$$

Avec

$$h_{ij} = \frac{286.76}{m \cdot G} T_1 \cdot g \left[\left(\frac{P_j}{P_i} \right)^m - 1 \right] \quad \forall (i, j) \in E_c \quad (3.7)$$

5. La hauteur adiabatique h_{ij} ne doit pas dépasser la hauteur adiabatique maximale et doit être supérieur ou égale à la hauteur adiabatique minimale, ce qui est présenté par la double contrainte suivante :

$$H^L \cdot W_{ij} \leq h_{ij} \cdot W_{ij} \leq H^U \cdot W_{ij} \quad \forall (i, j) \in E_c \quad (3.8)$$

avec

$$H^L = \left(a_1 + a_2 \left(\frac{q_{max}}{S_{max}} \right) + a_3 \left(\frac{q_{max}}{S_{max}} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q_{max}}{S_{max}} \right)^3 \right) * S_{min}^2 \quad (3.9)$$

$$H^U = \left(a_1 + a_2 \left(\frac{q_{min}}{S_{min}} \right) + a_3 \left(\frac{q_{min}}{S_{min}} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q_{min}}{S_{min}} \right)^3 \right) * S_{max}^2 \quad (3.10)$$

6. Le débit Q est partagé de manière équitable sur les compresseurs utilisés dans une même station de compression :

$$24.W_{ij}.q_{ij}.n_{i,j} + (1 - W_{ij}) = Q \quad \forall (i,j) \in E_c \quad (3.11)$$

7. Le rendement d'un compresseur dans la station de compression (i,j) doit être inférieur ou égale à 1 :

$$b_1 + b_2 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right) + b_3 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^2 + b_4 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^3 \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E_c \quad (3.12)$$

8. La vitesse de rotation S_{ij} d'un compresseur en marche dans la station(i,j) ne doit pas dépasser la vitesse maximale et doit être supérieur ou égale à la vitesse minimale. Ce qui est présenté par la double contrainte suivante :

$$S_{min}.W_{ij} \leq S_{ij}.W_{ij} \leq S_{max}.W_{ij} \quad \forall (i,j) \in E_c \quad (3.13)$$

9. Le débit q_{ij} qui passe par un compresseur dans la station(i,j) ne doit pas dépasser le débit maximal et doit être supérieur ou égale au débit minimal. Ceci est exprimé par la double contrainte suivante :

$$q_{min}.W_{ij} \leq q_{ij}.W_{ij} \leq q_{max}.W_{ij} \quad \forall (i,j) \in E_c \quad (3.14)$$

10. Le rapport entre le débit et la vitesse du compresseur doit être compris entre pompage et gavage.

avec

$$Pompage = \frac{q_{min}}{S_{min}} \quad Gavage = \frac{q_{max}}{S_{max}} \quad (3.15)$$

On peut exprimer ça par la double contrainte suivante :

$$\frac{q_{min}}{S_{min}}.W_{ij} \leq \frac{q_{ij}}{S_{ij}}.W_{ij} \leq \frac{q_{max}}{S_{max}}.W_{ij} \quad (3.16)$$

3.4.6 La fonction objectif

Notre objectif est de minimiser la quantité du gaz consommée par toutes les stations de compression du gazoduc. Cette quantité va être donc égale à la somme des quantités du gaz

consommées par chaque station de compression . D'où :

$$\text{Min}(Z) = \sum_{(i,j) \in E_c} f_{ij} \quad (3.17)$$

avec : f_{ij} est la fonction qui calcule la quantité du gaz consommée par la station (i,j) , $(i,j) \in E_c$, définie comme suit :

$$f_{ij} = \left(\frac{Q \cdot \rho \cdot \frac{h_{ij}}{1000}}{24 \cdot \eta_{ij} \cdot \eta_{TR} \cdot \eta_{mc} \cdot PCI} \right) W_{ij} \quad (3.18)$$

avec :

- $\eta_{TR} = 0,35$: Le rendement de la turbine.
- $\eta_{mc} = 0,95$: Le rendement mécanique.
- PCI :Pouvoir Calorifique Inférieur du gaz (PCI=36 000kj=m3).
- $\eta = b_0 + b_1(Q/S) + b_2(Q/S)^2 + b_3(Q/S)^3$

Donc on aura le modèle mathématique suivant :

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & \text{Min}(Z) = \sum_{(i,j) \in E_c} f_{ij} \\
 & \text{s.c} \\
 & P_i^2 - e^{se_{ij}} P_j^2 = R_{ij} \cdot \frac{Q^2}{D^5} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_p \dots (1) \\
 & P_i \geq p_{min} \dots \dots \dots \forall i \in I \dots (2) \\
 & p_i \leq P_{max} \dots \dots \dots \forall i \in I \dots (3) \\
 & \frac{P_j}{P_i} \geq 1 \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (4) \\
 & \frac{P_j}{P_i} \leq \frac{P_{max}}{P_{min}} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (5) \\
 & h_{ij} = \left[\left(a_1 + a_2 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right) + a_3 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^3 \right) * S_{ij}^2 \right] \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (6) \\
 & h_{ij} = \frac{286.76}{m.G} T_{1.g} \left[\left(\frac{P_j}{P_i} \right)^m - 1 \right] \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (7) \\
 & h_{ij} \cdot W_{ij} \geq H^L \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (8) \\
 & h_{ij} \cdot W_{ij} \leq H^U \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (9) \\
 & 24 \cdot W_{ij} \cdot q_{ij} \cdot n(i,j) + (1 - W_{ij}) = Q \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (10) \\
 & b_1 + b_2 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right) + b_3 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^2 + b_4 \left(\frac{q_{ij}}{S_{ij}} \right)^3 \leq 1 \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (11) \\
 & S_{ij} \cdot W_{ij} \geq S_{min} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall \in E_c \dots (12) \\
 & S_{ij} \cdot W_{ij} \leq S_{max} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (13) \\
 & q_{ij} \cdot W_{ij} \geq q_{min} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (14) \\
 & q_{ij} \cdot W_{ij} \leq q_{max} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (15) \\
 & \frac{q_{ij}}{S_{ij}} \cdot W_{ij} \geq \frac{q_{min}}{S_{min}} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (16) \\
 & \frac{q_{ij}}{S_{ij}} \cdot W_{ij} \leq \frac{q_{max}}{S_{max}} \cdot W_{ij} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (17) \\
 & P_i \geq 0 \dots \dots \dots \forall i \in I \dots (18) \\
 & n_{ij} \in \{0, 1, 2, 3\} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (19) \\
 & q_{ij} \geq 0 \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (20) \\
 & h_{ij} \geq 0 \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (21) \\
 & S_{ij} \geq 0 \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (22) \\
 & W_{ij} \in \{0, 1\} \dots \dots \dots \forall (i,j) \in E_c \dots (23)
 \end{aligned} \right\} P =
 \end{aligned}$$

3.4.7 Evaluation du modèle

a- Nombre de variables

- $| I | = 12$, alors nous avons :
- 12 variables de type P_i
- $| E_c | = 5$, alors nous avons :
- 5 variables de type q_{ij} .
- 5 variables de type S_{ij} .
- 5 variables de type h_{ij} .
- 5 variables de type n_{ij} .
- 5 variables de type w_{ij} .

Donc le nombre de variables est : $12 + 5 + 5 + 5 + 5 + 5 = 37$.

b- Nombre de contraintes

- $| E_p | = 6$ alors nous avons :
- 6 contraintes de type (1).
- $| I | = 12$ alors nous avons :
- 12 contraintes de type (2).
- 12 contraintes de type (11).
- $| E_c | = 5$ alors nous avons :
- 5 contraintes de type (3)(4)(5)(6)(7)(8)(9)(10)(11)(12)(13)(14)(15)(16)

Donc le nombre des contraintes est : $6 + (2*12) + (13 * 5) = 95$.

L'analyse du modèle mathématique du problème posé montre qu'on est en présence d'un problème non linéaire mixtes en nombre entiers **MINLP** (*Mixed-Integer NonLinear Programming*), en fonction d'une variable bivalente (w_{ij}), une variable entière (n_{ij}) et des variables continues P_i, q_{ij}, s_{ij} et h_{ij} .

Notre problème appartient à la famille des problèmes appelés "Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem (GPFCCMP)". Dans ce qui suit, nous présenterons une petite bibliographie concernant les travaux réalisés liés au problème (GPFCCMP).

3.5 L'état de l'art

Dans le monde technologique dans lequel nous vivons, la croissance de la demande des hydrocarbures en général et le gaz naturel en particulier, a créé une pression sur nombreuses entreprises. Ces dernières doivent résoudre des problèmes d'optimisation concernant le transport de gaz par canalisation. C'est ce besoin d'optimisation dans ce secteur très concurrentiel qui a enrichi la recherche en problème de "Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem (GPFCMP)".

3.5.1 Les différentes approches de modélisation et de résolution de "Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem (GPFCMP)"

Plusieurs points de vue ont été utilisés pour aborder ce problème, qui possède plusieurs invariants selon les hypothèses de modélisation et les décisions à prendre. Une de ces hypothèses réalisées dans beaucoup de travaux est que le nombre de compresseurs qui fonctionnent au sein de chaque station de compression est fixé et le débit qui passe par les tronçons et les stations de compression est considéré comme une variable, où la plupart des approches proposées ont été basées sur des technique de la programmation dynamique, citons les travaux de Wong et al, et Carter[9]qui ont travaillé sur un algorithme de programmation dynamique lorsque le débit est fixé.

Pecell et al[12]ont traité le problème tout en utilisant le gradient réduit généralisée (GRG) pour l'optimisation non linéaire. D'autre part, Wu et al [13]. ont proposé un modèle mathématique pour la minimisation du coût de carburant sur une seule station de compression.

Le premier ouvrage qui prend en considération le nombre d'unités de compression comme une variable est celui deWu et al [13], ils ont d'abord déterminé au premier lieu la quantité d'écoulement à travers la station de compression, puis, à une deuxième étape, de déterminer le nombre d'unité qu'il faut mettre en fonction pour ce flux particulier. Ensuite en 2003, Zaleta a étudié ce problème sur une ligne [14] qui comporte une seule station de compression qui possède dix unités de compression voir la figure (3.9).

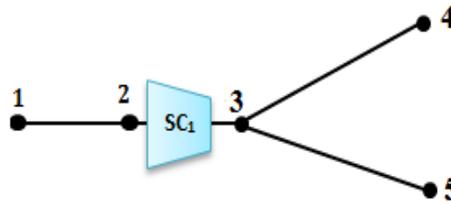


FIGURE 3.9 – Schéma de la ligne

Le débit qui passe par les tronçons et la station de compression est considéré comme une variable de décision, Zaleta prend en considération les contraintes relatives à la plage de fonctionnement des compresseurs et la contrainte concernant le débit qui passe par les deux tronçons (3,4) et (3,5) où leur somme est égale au débit au noeud 3. Pour la résolution elle utilise une démarche déterministe, où elle fait l'implémentation à l'aide de logiciel de modélisation GAMS (Algebraic modeling language ou AML). Il faut souligner que lorsque l'instance du problème augmente le solveur ne peut pas résoudre le problème.

Chebouba et al. proposent dans [15] un algorithme basé sur la technique de la programmation dynamique en première partie, et dans une deuxième partie un programme qui fait le choix automatique des compresseurs à utiliser.

Les métaheuristiques n'étaient pas largement utilisées pour résoudre "Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem (GPFCMP)" :

- Les algorithmes génétiques ont été utilisés pour la première fois, en 1985 par Goldberg, où les contraintes concernant la plage de fonctionnement des compresseurs sont prise en considération.
- Chebouba et Smati [15] ont appliqué pour la première fois les algorithmes de colonies de fourmis pour la résolution de ce problème.

En 2011, et pour la première fois Rodriguez et al. [16] formulent le problème de façon multi-objectif en maximisant la quantité transportée et en minimisant la consommation des compresseurs.

Il est à noter qu'il existe d'autres travaux qui traitent ce problème mais il s'avère que ces recherches ont été si spécifiques où il est question de modéliser un problème de flux dans un réseau non linéaire. La plupart de ces travaux ne prennent pas en considérations toutes les

contraintes du problème.

Conclusion

L'analyse de notre modèle mathématique montre qu'on est en présence d'un problème non linéaire mixte en nombre entiers (MINLP).

Pour la résolution du problème posé par SONATRACH, nous étudierons au chapitre suivant les différentes méthodes de résolution.

Chapitre 4

MÉTHODES DE RÉOLUTION

Introduction

A l'heure actuelle, il est généralement admis de considérer la résolution des problèmes comme un processus complexe de la modélisation mathématique. Ce processus complexe peut se traduire par la mise en oeuvre d'une démarche de résolution impliquant plusieurs phases.

Résoudre des problèmes après la formulation mathématique nécessite un questionnement sur la nature du modèle. Ceci consiste à comprendre l'énoncé et à construire une modélisation, puis mettre en oeuvre des stratégies et des procédures de résolution. Ces phases sont indissociables, la démarche considérée pour analyser et résoudre un système est illustrée dans le schéma suivant :

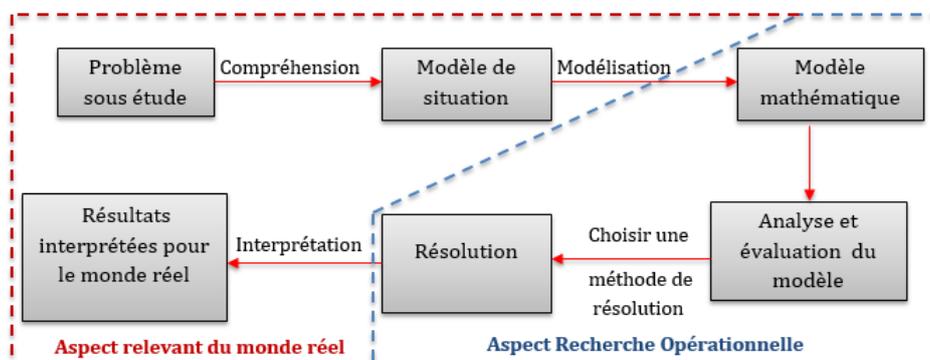


FIGURE 4.1 – Le processus de l'analyse du système

4.1 Méthodes d'optimisation

L'optimisation constitue une part importante des activités de recherche en plusieurs domaines on peut classer les problèmes rencontrés en fonction de leur expression mathématique, ce classement est général et s'étend à toutes les disciplines où l'optimisation est mise en oeuvre. Le critère fondamental pour l'établir repose sur la nature des variables : discrètes ou continues. Historiquement, la classification se réduisait aux problèmes linéaires (LP) et non linéaires (NLP). Les différentes classes de problèmes recensées actuellement, ainsi que certaines procédures très classiques de résolution, sont indiquées sur la figure 4.2 [17].

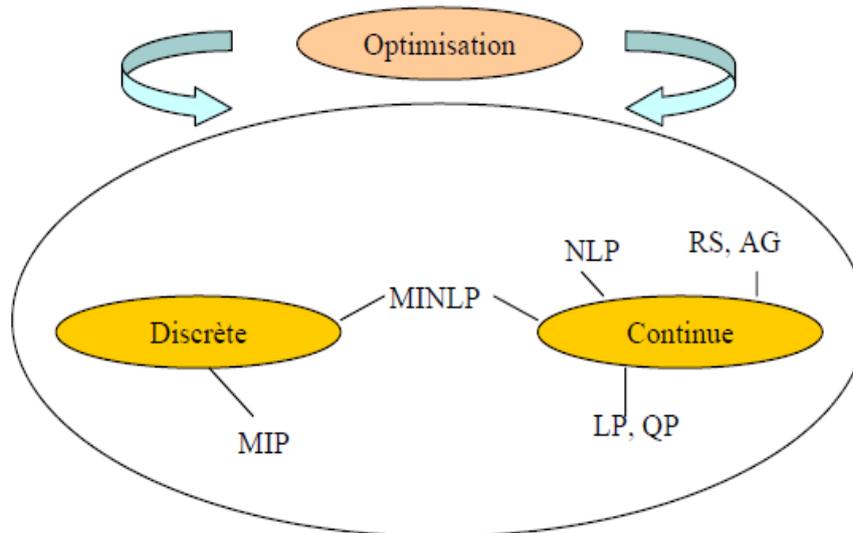


FIGURE 4.2 – Classes des problèmes d'optimisation.

Notations :

AG : algorithme génétique.

LP : programmation linéaire.

MINLP : programmation mixte entière non linéaire.

MIP : programmation mixte entière.

NLP : programmation non linéaire.

PQ : programmation quadratique.

RS : recuit simulé [17]h.

4.2 La programmation non linéaire mixte en nombres entiers

Les problèmes d'optimisation sont classés en grandes catégories, linéaire (**LP**), non linéaire (**NLP**), programmation linéaire mixte en nombres entiers (**MINLP**), en fonction de leurs caractéristiques mathématiques. La formulation la plus complexe, rencontrée fréquemment à l'ingénierie, relève des problèmes non linéaires mixte en nombres entiers «Mixed Integer Non Linear Programming [17]».

4.2.1 Qu'est ce qu'un programme MINLP ?

Un programme non linéaire mixte en nombres entiers MINLP est un problème d'optimisation consiste à minimiser une fonction objectif non linéaire à n variables mixtes, discrètes et continues soumises à un ensemble de contraintes non linéaire exprimées sous forme d'équations ou d'inéquations.

La formulation générale d'un problème MINLP est donnée par :

$$P = \begin{cases} \text{Min} & f(x,y) \\ \text{sc :} & \\ h(x,y) = 0 & \\ g(x,y) \leq 0 & \text{Où} \\ x \in X & \\ y \in Y_{entier} & \end{cases}$$

- $f(x,y)$: fonction objectif.
- $h(x,y)$: Ensemble des contraintes égalité.
- $g(x,y)$: Ensemble des contraintes inégalité.
- X : Ensemble des variables continues.
- Y : Ensemble des variables entières.

La variable x correspond généralement aux variables physiques (débit, pression, température, etc). Et la variable y correspond aux variables qui traduisent l'existence ou non d'une opération unitaire, le nombre d'unités d'une entité, etc.

Le problème MINLP représente une formulation très complexe, englobant de façon évidente les classes NLP et MIP.

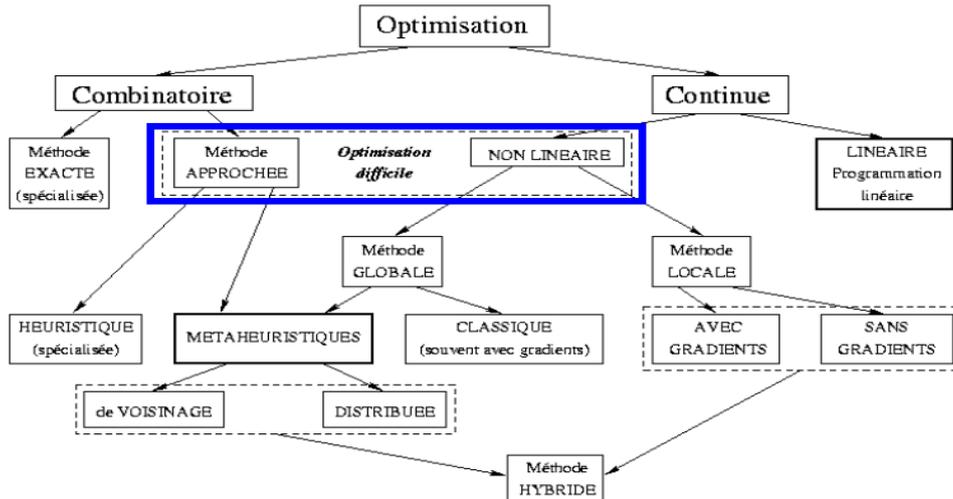


FIGURE 4.3 – Vue d’ensemble des problèmes d’optimisation.

Cependant, les algorithmes des méthodes les plus utilisées pour la résolution de problèmes MINLP seront présentés. La résolution numérique des problèmes MINLP est relativement récente vis-à-vis des autres méthodes de programmation mathématique. En effet, le développement de procédures de résolution pour des problèmes de type NLP (NonLinear Programming), MILP (Mixed Integer Linear Programming) et LP (Linear Programming), a fortement contribué à l’évolution de nouvelles procédures pour le traitement des problèmes MINLP [17]. En ce qui concerne les procédures de résolution, on distinguera deux classes de méthodes pour le traitement de problèmes MINLP : la programmation stochastique et la programmation déterministe, comme cela est présenté sur la figure 4.4

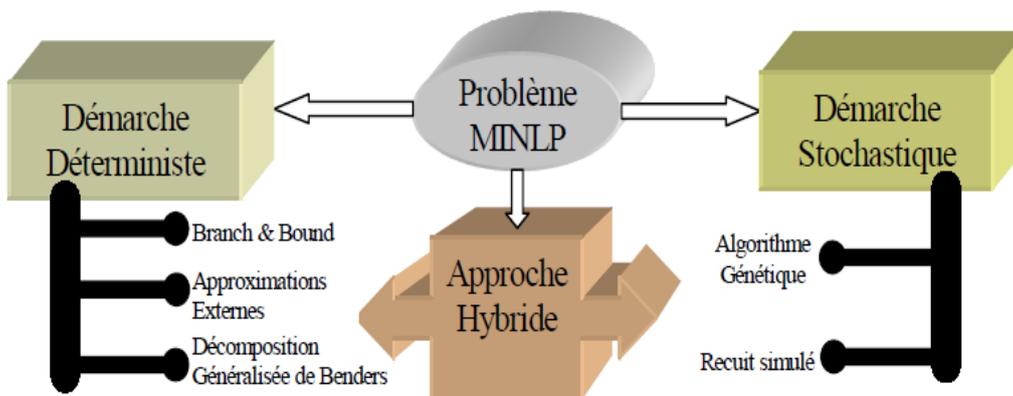


FIGURE 4.4 – Méthodes classiques de résolution de problèmes MINLP.

L'approche stochastique est généralement basée sur une procédure reproduisant un phénomène naturel. Il en résulte des algorithmes évolutifs qui permettent, à partir d'un procédé initial acceptable vis-à-vis des contraintes, des modifications de structure à travers de règles d'évolution. Ce sont généralement des procédures faciles à utiliser, qui présentent cependant l'inconvénient de ne pouvoir garantir un optimum.

L'approche déterministe est fondée sur une résolution itérative qui permet de trouver un et un seul optimum global. Les procédures déterministes nécessitent généralement la mise en oeuvre de méthodes adéquates à chaque type particulier de problème [17].

La sélection d'une méthode d'optimisation particulière est effectuée selon la nature du problème abordé, l'ensemble des classes de méthodes utilisées pour la résolution de problèmes MINLP sera présenté dans ce qui suit :

4.3 Les méthodes déterministes

Dans le cadre des méthodes déterministes, on a [17] :

- La méthode Branch & Bound(Leyffer, 1999).
- La décomposition généralisée de Benders(Benders 1962; Geoffrion 1972).
- La méthode des approximations externes (Duran & Grossman 1986; Fletcher & Leyffer 1994).

4.4 Les méthodes approchées (stochastiques)

Face au caractère intraitable de certains problèmes d'optimisation combinatoire, où la solution optimale de ces problèmes est souvent hors d'atteinte en raison de l'explosion combinatoire de leur espace de recherche et vu la nécessité de fournir des solutions de "bonne" qualité en un temps "raisonnable", les heuristiques [18] deviennent l'unique moyen d'obtenir une bonne solution en un temps raisonnable.

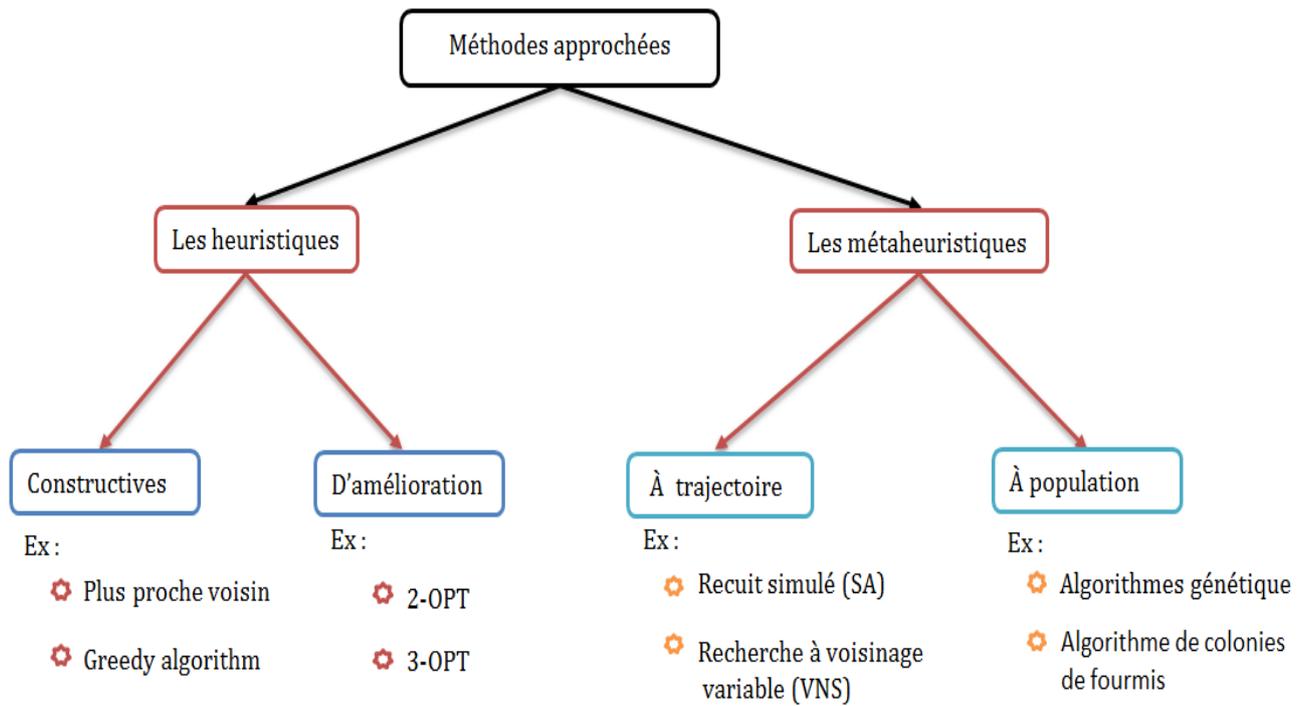


FIGURE 4.5 – Schéma des méthodes approchées

4.4.1 Technique de résolution

La programmation non linéaire mixte en nombre entier combine la difficulté de l'optimisation combinatoire sur des ensembles de variables entières avec la difficulté de la manipulation d'une fonction objectif non linéaire et des contraintes non linéaires. L'exécution des méthodes dites exactes (programmation dynamique, séparation et évaluation) pour la résolution de ce problème risque de prendre un temps de calcul considérable.

Afin d'éviter ce genre de situation, on se contente souvent d'une solution dite approchée donnée par certaines méthodes appelées «méthodes approchées» et dont la valeur de la fonction objectif correspondante se rapproche de celle de la solution exacte. Vu qu'on est en présence d'un problème non linéaire en variables mixtes assez complexe, nous proposons d'utiliser une heuristique pour obtenir une solution réalisable et on peut l'améliorer avec deux métaheuristiques : Algorithme génétique et recuit simulé.

4.4.2 Les heuristiques classiques

Une heuristique est une méthode spécifique développée pour résoudre un problème donné, elle lui est intimement liée et conçue pour prendre en charge les caractéristiques de celui-ci et couvrir les propriétés de ses différentes instances. Ces méthodes sont généralement basées sur un raisonnement logique ou intuitif et se doivent d'être simples, rapide et bien sûr de

fournir des solutions de bonne qualité. La difficulté majeure est toutefois de déterminer une garantie de performance d'une heuristique, aussi pour un même problème, il existe souvent plusieurs heuristiques et selon l'instance traitée, leurs performances peuvent varier, donc il est impossible de dire qu'une heuristique est meilleure qu'une autre.

Les heuristiques peuvent être classées en deux catégories :

- Les heuristiques de construction : sont des méthodes approchées qui démarrent d'une entité élémentaire quelconque et construisent de proche en proche une solution réalisable, par exemple la méthode de plus proche voisin pour le problème PVC.
- Les heuristiques d'amélioration : sont des méthodes approchées qui démarrent d'une solution réalisable (probablement moins intéressante), et l'améliorent de proche en proche. Par exemple, on trouve la méthode 2-opt (PVC).

On retrouve en général des principes de base utilisés dans ces heuristiques tels que :

- Principe glouton : ce principe repose sur le choix définitif des valeurs de la solution, ce qui interdit toute modification ultérieure. Autrement dit d'après Sakarovitch [22] Il consiste à "manger" les éléments de la solution dans un certain ordre sans jamais remettre en question un choix une fois qu'il est effectué .
- Principe de construction progressive : c'est une extension du principe glouton dans la mesure où l'on s'autorise, cette fois-ci, à modifier des valeurs déjà assignées. On retrouve par exemple l'algorithme de Ford pour la recherche des chemins optimaux.
- Principe de partitionnement : ce principe repose sur le fait que résoudre le problème global se révèle souvent plus complexe que résoudre la somme des sous problèmes qui le composent. Toute la difficulté réside alors dans le fusionnement des solutions de chaque sous problème. On retrouve par exemple l'algorithme de Dichotomie.

4.5 Les métaheuristiques

Depuis environ, une quarantaine d'années, sont apparues des approches de résolution plus générale, qui peuvent donc, moyennant la fixation de certaines paramètres et quelques adaptations, s'appliquent à une large classe de problèmes d'optimisation, ces méthodes sont dites heuristiques de haut niveau ou métaheuristiques (dérivées de la composition de deux mots grecs : « heuriskien » qui signifie **trouver**, et « Méta » qui signifie **dans un niveau supérieur**).

4.5.1 Méthode du recuit simulé

Présentation de la méthode

Le recuit simulé est une procédure d'optimisation combinatoire multi-variables développée depuis plus d'une vingtaine d'années. C'est une méthode locale qui permet d'éviter de se bloquer dans des zones d'optimum local, en autorisant occasionnellement un accroissement du critère, contrairement aux méthodes déterministes.

La méthode se fonde sur une analogie entre les problèmes d'optimisation à caractère combinatoire et ceux de la physique statistique représentant le comportement d'une opération thermodynamique, le recuit physique des solides ; cette technique est utilisée en métallurgie lors de la solidification des métaux pour obtenir un état cristallin bien ordonné.[17]

La fixation des paramètres

Déterminer la valeur la plus appropriée des paramètres est certainement l'aspect le plus délicat de l'implémentation du recuit simulé, qui sont choisis en fonction du problème considéré et de l'instance traitée.

1. La température initiale

Elle doit être élevée pour accepter suffisamment et facilement une solution moins bonne que la solution courante, donc tous les voisins de la solution courante ont la même probabilité d'être acceptés.

2. Le coefficient de refroidissement

Le paramètre α est à choisir avec précaution. En effet, s'il est choisi trop grand, la température baissera très rapidement et l'algorithme pourra être bloqué dans un minima local, si il est choisi trop petit, la température baissera très lentement et le temps de calcul sera très grand.

3. Le nombre d'itérations à chaque palier de température

Un paramètre borne le nombre d'essais (itérations) par palier. A la fin d'un palier, le compteur est incrémenté si le pourcentage d'acceptation est inférieur à un seuil, remis à zéro si la qualité de la meilleure solution a évolué au cours du palier.

4. Critère d'arrêt

Tout au long du processus la température sera diminuée, il faudra donc déterminer une température finale θ_f telle que la procédure du recuit simulé se termine lorsque la température courante atteint la température finale.

4.5.2 Principe de RS :

Le principe du recuit simulé est de parcourir de manière itérative l'espace des solutions, on part d'une solution notée x initialement générée d'une manière aléatoire (ou trouvée à l'aide d'une autre méthode approchée) qui correspond à une énergie initiale $Z(x)$ et une température initiale θ^0 , généralement élevée.

A chaque itération de l'algorithme un changement s'effectue sur la solution. Cette solution x' fait varier l'énergie du système, $\Delta Z = Z(x') - Z(x)$ si cette variation est négative (la nouvelle solution améliore la fonction objectif) et permet de diminuer l'énergie du système, elle est acceptée. Si la solution trouvée est moins bonne que la précédente alors elle sera acceptée avec une probabilité calculée suivant $y = e^{-\frac{\Delta Z}{\theta}}$.

En fonction du critère de *Métropolis*, un nombre $p \in [0, 1]$ est comparé à la probabilité $y = e^{-\frac{\Delta Z}{\theta}}$. Si $y \leq p$ la nouvelle solution est acceptée.

Le fonctionnement de critère de *Métropolis* est interprété par :

- Si $\Delta Z < 0$, alors $e^{-\frac{\Delta Z}{\theta}} > 1$ donc p est toujours inférieure à cette valeur est on accepte la solution x' .
- Si $\Delta Z > 0$, alors $e^{-\frac{\Delta Z}{\theta}} \simeq 1$, tout voisin est systématiquement acceptée.
- Si $\Delta Z > 0$, $\theta \ll \ll$, alors $e^{-\frac{\Delta Z}{\theta}} \simeq 0$, une dégradation à peu de chance d'être accepté.

4.5.3 Algorithme général du Recuit simulé

Algorithme 1 Recuit simulé

 Entrées : $x = x^0$; $Z = Z(x)$; $x_{op} = x$; $Z(x_{op})$; $\theta = \theta^0$; n_r ; θ_f ; a ;

Début

tantque $\theta > \theta_f$ **faire** **tantque** $nb > n_r$ **faire**4: $x' := \pi(x)$; $Z(x')$; $\Delta Z = Z(x') - Z(x)$; **si** $\Delta Z < 0$ **alors**8: $x := x'$; $Z(x) := Z(x')$; **si** $Z(x) < Z(x_{op})$ **alors** $x_{op} := x'$;12: $Z(x_{op}) := Z(x')$; **finsi** **sinon** $p \in [0, 1]$;16: $y := e^{\frac{-\Delta Z}{\theta}}$; **si** $p \leq y$ **alors** $x := x'$; $Z(x) := Z(x')$;20: **finsi** **finsi** $nb := nb + 1$; **fin tantque**24: $\theta := a.\theta$; **fin tantque**

Fin

4.6 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisements, mutations, sélections, etc.

4.6.1 Présentation de la méthode

. Dans la nature, les êtres vivants croisent et interagissent les uns avec les autres. Chaque individu est caractérisé par un génotype indépendant de l'environnement où il vit. Les opérateurs génétiques fonctionnent au niveau génotypique tandis que le mécanisme de sélection opère au niveau phénotypique (le phénotype d'un individu est l'ensemble des traits caractéristiques d'un individu, alors que le génotype est le codage de ces traits en gènes). Les algorithmes génétiques sont à la base des algorithmes d'optimisation stochastiques, mais peuvent également servir pour l'apprentissage automatique, par exemple. Les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique ont été développés entre 1960 et 1970 par John Holland.[13].

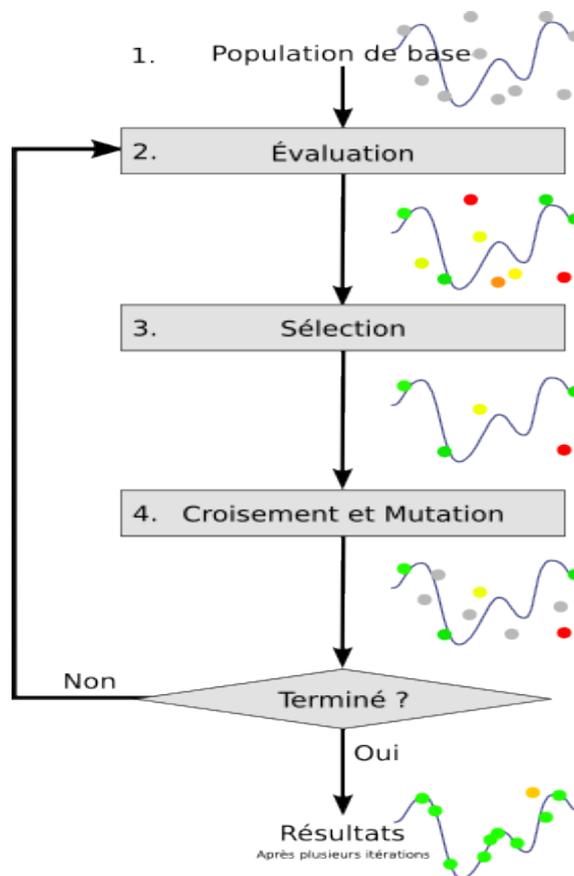


FIGURE 4.6 – Schéma d'un algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont directement inspirés du concept de sélection naturelle élaboré par Charles Darwin en 1859. Le vocabulaire employé, calqué sur celui de la génétique, comporte des termes tels que : individus (solutions potentielles), population, gènes (variables), chromosomes, parents, enfants, sélection, survie, croisement, mutation. S'il n'existe pas de preuve générale de l'efficacité des algorithmes génétiques, il est par contre aisé de constater l'efficacité de la sélection naturelle dans le monde vivant.

En effet, il est clair que l'évolution a permis l'émergence d'organismes étonnamment adaptés à leur environnement. Les algorithmes génétiques tirent leur puissance de ces mécanismes d'évolution naturelle, qui sont rappelés ci-après.

4.6.2 Principe de la méthode

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Il combine une stratégie de "survie des plus forts" avec un échange d'information aléatoire mais structure. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue, un ensemble de solutions possibles est créé aléatoirement.

On appelle cet ensemble la population. Les caractéristiques (ou variables à déterminer) sont alors utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d'autres gènes pour former des chromosomes et par après des individus. Chaque solution est associée à un individu, et cet individu est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure, mais encore inconnue, solution au problème. Il peut être démontré qu'en utilisant un processus de sélection naturelle inspirée de Darwin, cette méthode convergera graduellement à une solution. Comme dans les systèmes biologiques soumis à des contraintes, les meilleurs individus de la population sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de transmettre une partie de leur héritage génétique à la prochaine génération. Une nouvelle population, ou génération, est alors créée en combinant les gènes des parents. On s'attend à ce que certains individus de la nouvelle génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs deux parents, et donc qu'ils seront meilleurs et seront une meilleure solution au problème.

Le nouveau groupe (la nouvelle génération) est alors soumis aux mêmes critères de sélection, et par après génère ses propres rejetons. Ce processus est répété plusieurs fois, jusqu'à ce que tous les individus possèdent le même héritage génétique. Les membres de cette dernière génération, qui sont habituellement très différents de leurs ancêtres, possèdent de l'information génétique qui correspond à la meilleure solution au problème[29].

A. Initialisation

A1. Codage des données

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétiques, il permet de représenter une solution x du problème d'optimisation par une séquence (string) de caractères, cette séquence sera appelée individu, elle constitue l'ensemble des gènes du chromosome. Plusieurs codages sont employés. Voici quelques exemples.[20]

- **Le codage binaire** : représente une solution par une suite de variables binaires.
- **Le codage par permutations de valeurs entières** : le gène est codé par une valeur entière dans un ensemble de cardinalité égale au nombre de gènes.

A2. Fonction fitness d'un individu

A un individu donné est associée une fonction fitness (forme physique), elle mesure la performance de cet individu et a pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Elle est évidemment étroitement liée avec la fonction objectif du problème d'optimisation.[20]

A3. Population initiale

Différents individus sont considérés, souvent générés aléatoirement afin d'assurer une population diversifiée. La population initiale est ainsi constituée d'un ensemble d'individus $1, \dots, N$ et le paramètre n est appelé taille de la population.

La taille N d'une population est un paramètre important d'un algorithme génétique. Elle doit être fixée en tenant compte de la longueur d'un individu, une taille grande favorise une meilleur diversification mais au prix d'un plus grand temps de calcul pour une itération. [20].

B. Itération d'un algorithme génétique

Sur base de la population courante, divers opérateurs vont être appliqués successivement à des sous-ensembles d'individus, appelés des parents, pour générer de nouveau individus appelés enfants.

B1. Opérateur de sélection

Il s'agit des paires d'individus qui sont sélectionnées au sein de la population courante, une telle paire sera noté $P1$ et $P2$. Il convient donc de définir un mécanisme de sélection de paires de parents. Cet opérateur de sélection est généralement aléatoire mais doit néanmoins d'autant

plus favoriser la sélection d'un individu que sa fonction fitness est meilleure. [20] Plusieurs méthodes existent et sont, généralement, basées sur la théorie de Darwin. Nous présenterons les deux plus connues :

– **La roulette (roulette Wheel sélection)** : [13] Cette méthode exploite la métaphore d'une roulette de casino. La roue est divisée en autant de secteurs que d'individus dans la population. La taille de ces secteurs est proportionnelle à l'adaptation de chaque individu (une probabilité p_i). Un nombre aléatoire $r \in [0,1]$ désigne alors l'individu i^* sélectionné par la formule :

$$\begin{cases} 0 < r < \sum_{i=1}^{i^*} p_i, & \text{si } i^* = 1. \\ \sum_{i=1}^{i^*-1} p_i < r < \sum_{i=1}^{i^*} p_i, & \text{si non.} \end{cases}$$

■ individu1 ■ individu2 ■ individu3 ■ individu4 ■ individu3
 ■ individu4 ■ individu7 ■ individu8 ■ individu9 ■ individu10

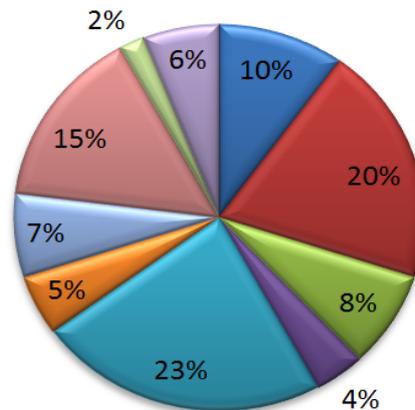


FIGURE 4.7 – Sélection par roulette

– **Sélection par tournoi (tournament selection)** : [20] Plusieurs individus (classiquement deux) sont d'abord choisis totalement aléatoirement dans la population. Ils se confrontent alors sur base de leur valeur fitness et le meilleur est sélectionné.

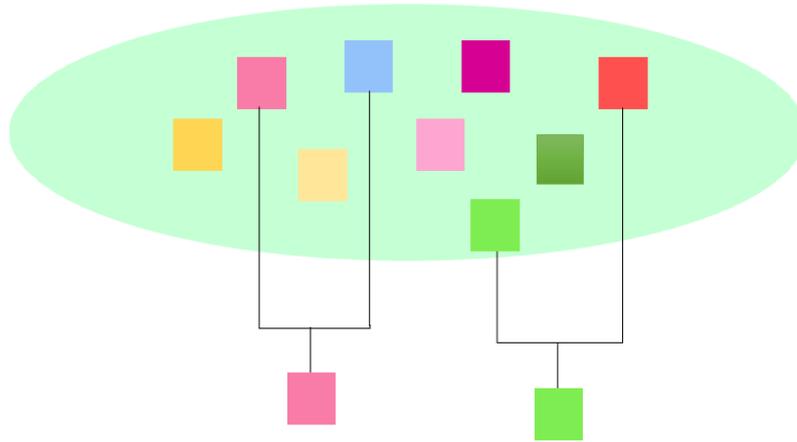


FIGURE 4.8 – Sélection par tournoi (entre deux individus)

B2. Opérateur de croisement

Un opérateur de croisement (crossover) consiste à créer de nouveaux individus -des enfants- en échangeant des caractères -des gènes- entre les deux parents. La zone de croisement est généralement choisie aléatoirement dans les chromosomes. Toutefois l'opérateur de croisement n'est pas systématiquement appliqué à chaque paire de parents, mais avec une probabilité de croisement p_c (classiquement ≥ 0.9 , nous suivrons ici aussi le schéma classique où deux enfants (notés E1 et E2) sont créés par le croisement. [20]

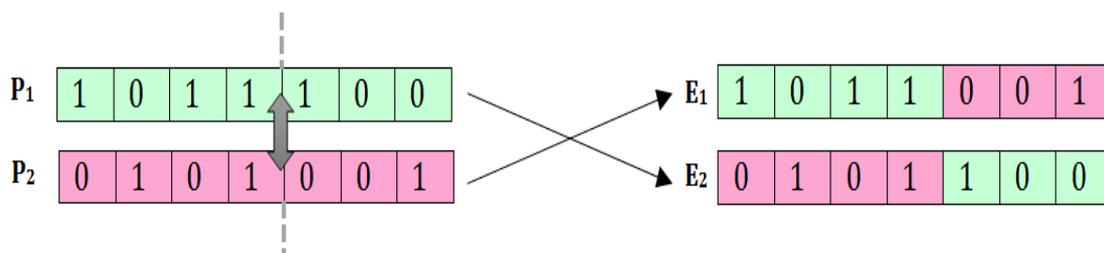


FIGURE 4.9 – Croisement en un point

B3. Opérateur de mutation

Pour des raisons de diversification, il est bon de temps en temps de modifier très légèrement un enfant créé. C'est le rôle de l'opérateur de mutation qui est appliqué à un enfant avec une petite probabilité p_m (classiquement ≤ 0.01). [20]

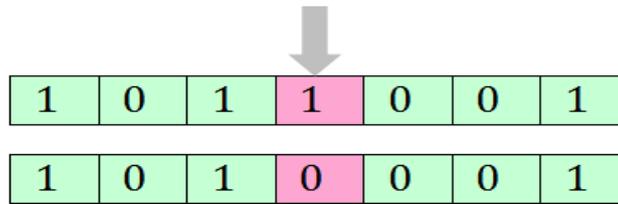


FIGURE 4.10 – La mutation

C. Critère d'arrêt

Les critères les plus utilisés sont les suivants :

- Arrêt de l'algorithme après un certain nombre de générations, fixé au départ ; c'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement, c.-à-d. les meilleurs individus ne s'améliorent plus depuis un certain nombre de générations. [20]

Paramètres internes de l'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques possèdent des paramètres internes qui doivent être choisis avec les considérations suivantes :

- **Taille de la population N** : Elle doit être judicieusement choisie en fonction de la taille du problème.
- **Probabilité de croisement** : Plus le taux de croisement est élevé, plus il y aura de nouvelles structures qui apparaissent dans la population.
- **Probabilité de mutation** : la probabilité de mutation est généralement inférieure à 0.01, mais il n'est pas rare de voir dans d'autres applications un taux plus important, par exemple dans les problèmes d'ordonnancement.

4.7 Démarches Hybrides

Cette méthodologie combine différentes approches, elle permet d'amplifier les avantages de ces méthodes et d'autre part réduire les limites. Les algorithmes hybrides peuvent être classés en deux catégories :

1. **Bas niveau d'hybridation** : Ce type d'hybridation consiste à intégrer une méthode de résolution (méthode 2) dans une autre méthode (méthode 1) (Voir figure 4.11).

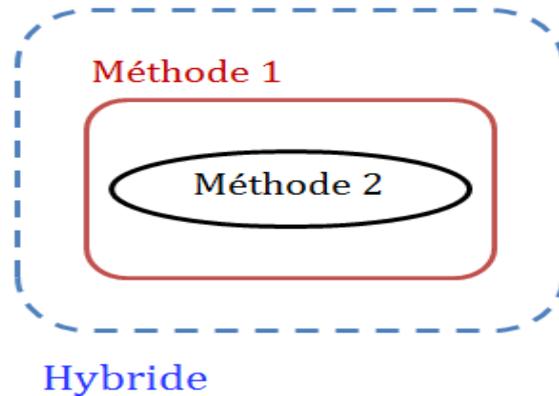


FIGURE 4.11 – Schéma d'hybride de bas niveau

2. **Haut niveau d'hybride** : Ce type d'hybridation consiste à trouver une solution par une méthode, ensuite l'améliorer par une autre méthode (Voir figure 4.12), Par exemple : On peut utiliser l'algorithme génétique en première étape, ensuite en appliquant le Recuit simulé en démarrant de la solution trouvée par l'algorithme génétique.

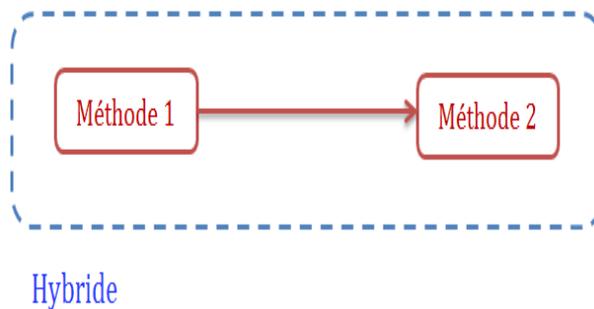


FIGURE 4.12 – Schéma d'hybride de Haut niveau

Conclusion

Le choix de méthodes de résolution stochastique jusqu'à un passé récent paraissait inéluctable pour traiter la gamme de problèmes considérés. Vu l'évolution importante des méthodes

de résolution déterministes, l'utilisation d'un logiciel d'optimisation déterministe s'est avéré être une alternative très intéressante, car elle engendre moins de contraintes pour l'initialisation des variables, d'où une motivation supplémentaire de cette étude pour l'utilisation d'une méthode déterministe pour la résolution des problèmes MINLP.

Le choix s'est porté sur l'utilisation de l'environnement d'optimisation GAMS qui est présenté dans le chapitre suivant mais cette démarche nous a pas donné des résultats souhaitées ce qui nous a poussé à opter la démarche approchée.

Chapitre 5

RÉSOLUTION DU PROBLÈME

Introduction

Après l'élaboration du modèle mathématique associé à ce problème qui est un problème non linéaire mixte en nombre entier, nous nous sommes orientées vers un logiciel de programmation mathématique et d'optimisation qui est le GAMS(General Algebraic Modeling System) pour la résolution de notre problème qui est une démarche déterministe que nous avons bien maîtrisé, mais vu la complexité de notre problème, GAMS n'a pas pu implémenté toutes les contraintes non linéaires surtout celles qui définissent le domaine de fonctionnement d'un compresseur. Cette difficulté nous a conduit à abandonner cette approche et aller vers la résolution approchée.

5.1 Résultats obtenus par l'approche déterministe

Avant de présenter les résultats obtenus par la première démarche qui est l'approche déterministe(exacte), nous allons exhiber une sobre description sur le logiciel utilisé.

Présentation de GAMS

Initialement développé par un groupe d'économistes de la Banque Mondiale suite à la complexité des problèmes de modélisation économique, GAMS dispose d'un langage d'entrée qui permet d'écrire des modèles avec une formulation algébrique concise et facilement lisible. GAMS est capable de résoudre des problèmes aussi volumineux que complexes; Il peut être utilisé pour traiter une grande variété de problèmes (NLP, MIP, MINLP, . . . , etc). La simplicité du formalisme GAMS est un avantage pour la description des problèmes. Les principales

caractéristiques de l'environnement GAMS sont brièvement reprises, suivant la problématique de l'étude. Il s'articule autour de la description de deux techniques de Programmation Mathématique implémentées dans GAMS [30] :

- Le solveur DICOPT++ est une application de l'algorithme des Approximations. Externes [31].
- Le solveur SBB met en oeuvre un algorithme Branch Bound de forme classique mais adapté à la résolution de problèmes mixtes non linéaires, utilise uniquement le module CONOPT3 pour la résolution des problèmes NLP.
- Le solveur DICOPT++, repose sur des modules de résolution de problèmes continus non-linéaires (NLP) et linéaires en variables mixtes (MILP), respectivement CONOPT3 et CPLEX.

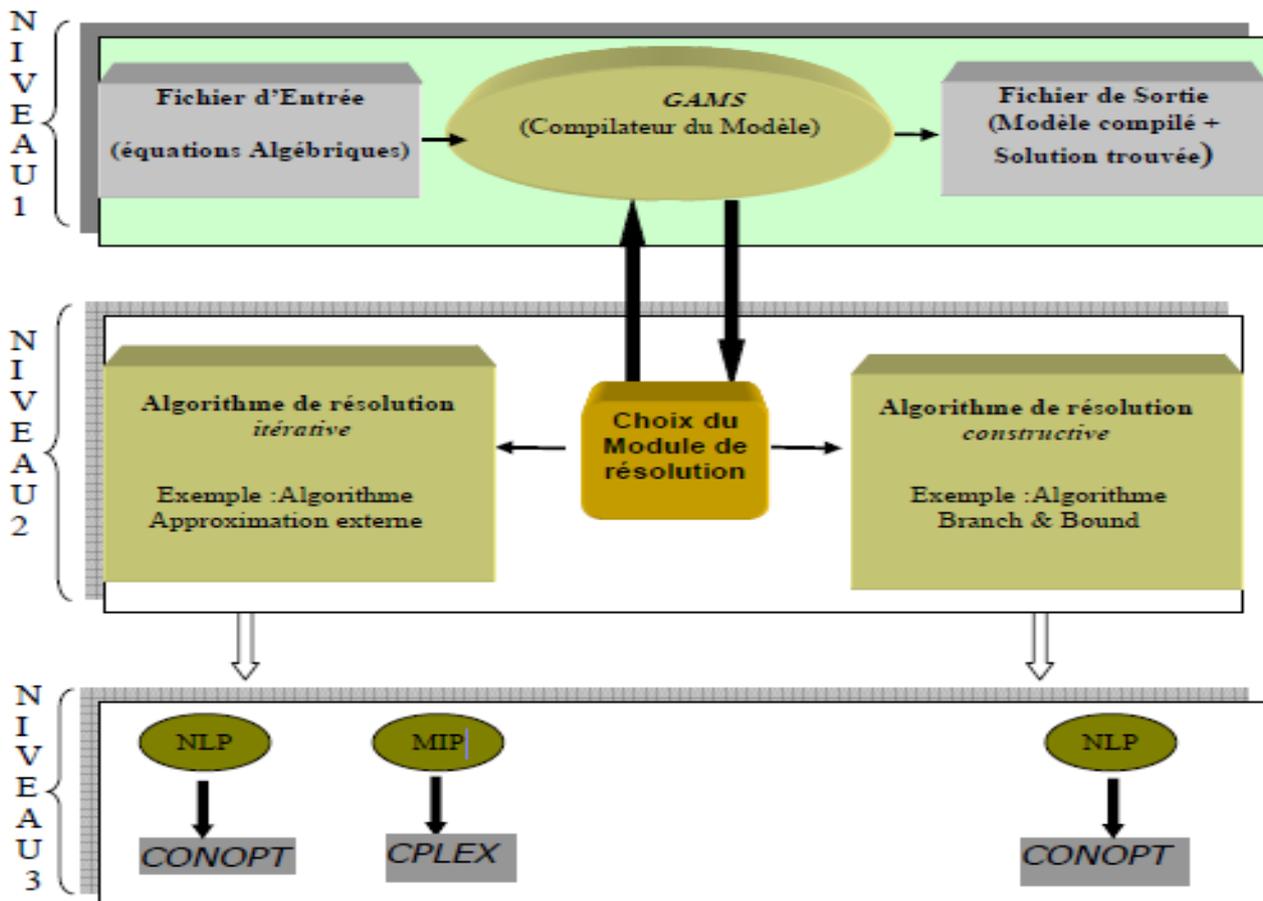


FIGURE 5.1 – Structure de l'environnement GAMS pour la résolution d'un problème MINLP.

Après avoir programmé le modèle mathématique avec le logiciel GAMS, voici les résultats obtenus.

Les variables suivantes représentent :

wij=la station (i,j),

nij=nombre de compresseur dans la station (i,j),

fij : fonction objectif, consommation de gaz naturel.

Dénomination	Station
w23	la station 1 (Timzehrt)avec n23 : nombre de compresseur.
w45	la station 2 (M'seka) avec n45 : nombre de compresseur.
w67	la station 3 (Mederrag)avec n67 : nombre de compresseur.
w89	la station 4 (Djbel Nador)avec n89 : nombre de compresseur.
w1010	la station 5 (knenda) avec n1010 : nombre de compresseur.

TABLE 5.1 – Représentation des variables.

Avec un débit de : 26873129 m^3 /jr.

VARIABLE w23.L	=	1.000
VARIABLE w45.L	=	1.000
VARIABLE w67.L	=	1.000
VARIABLE w89.L	=	1.000
VARIABLE w1011.L	=	1.000
VARIABLE n23.L	=	1.883
VARIABLE n45.L	=	3.000
VARIABLE n67.L	=	3.000
VARIABLE n89.L	=	2.871
VARIABLE n1011.L	=	3.000
VARIABLE fij.L	=	20755.403

Avec un débit de : 27000893 m^3 /jr.

VARIABLE w23.L	=	1.000
VARIABLE w45.L	=	1.000
VARIABLE w67.L	=	1.000
VARIABLE w89.L	=	1.000
VARIABLE w1011.L	=	1.000
VARIABLE n23.L	=	1.897
VARIABLE n45.L	=	3.000
VARIABLE n67.L	=	3.000
VARIABLE n89.L	=	2.877
VARIABLE n1011.L	=	3.000
VARIABLE fij.L	=	20888.199

Avec un débit de : 35000893 m³/jr.

VARIABLE w23.L	=	1.000
VARIABLE w45.L	=	1.000
VARIABLE w67.L	=	1.000
VARIABLE w89.L	=	1.000
VARIABLE w1011.L	=	1.000
VARIABLE n23.L	=	3.000
VARIABLE n45.L	=	3.000
VARIABLE n67.L	=	3.000
VARIABLE n89.L	=	3.000
VARIABLE n1011.L	=	3.000
VARIABLE fij.L	=	31782.580

Avec un débit de : 10035567 m³/jr.

VARIABLE w23.L	=	1.000
VARIABLE w45.L	=	1.000
VARIABLE w67.L	=	1.000
VARIABLE w89.L	=	1.000
VARIABLE w1011.L	=	1.000
VARIABLE n23.L	=	1.903
VARIABLE n45.L	=	1.903
VARIABLE n67.L	=	1.903
VARIABLE n89.L	=	1.903
VARIABLE n1011.L	=	1.903
VARIABLE fij.L	=	1572.603

Donc ce qu'on a remarqué que GAMS a pu implémenté le modèle mais il n'a pas pu traduire toutes les contraintes de notre problème vu sa complexité ce qui nous a incité vers les méthodes approchées.

5.2 Adaptation d'une heuristique au problème

Pour la résolution de notre problème, nous présentons une heuristique de type amélioration basée sur le principe de construction progressive. Cette heuristique se fera en deux étapes, une première pour l'initialisation, en démarrant d'une solution initial aléatoire réalisable, et une deuxième pour l'amélioration de la solution.

5.2.1 Principe de l'heuristique

1. Étape Initialisation :

- (a) Initialiser toutes les stations en marche.
- (b) Pour chaque station i générer aléatoirement :
 - Le nombre de compresseurs en marche entre (1, 3) tout en respectant le débit maximal rentrant à un compresseur ($q_{max} = 530\ 000\ \text{m}^3/\text{h}$).
 - Les vitesses de rotation des turbocompresseurs en marche comprises entre ($S_{min} = 3\ 250$ et $S_{max} = 6\ 825$) tout en respectant les contraintes concernant la hauteur adiabatique H_{ad} et le rendement adiabatique η .

2. Étape Amélioration :

- (a) Pour chaque pression d'aspiration d'une station de compression i calculer sa valeur en supposant que la station de compression $i-1$ n'est pas en marche on aura deux cas :
 - (Si $P_{asp_i} \leq 45$ bars) alors la station $i-1$ reste en marche.
 - (Si $P_{asp_i} > 45$ bars) alors changer l'état de la station $i-1$ de 1 à 0.

5.2.2 Procédure de l'heuristique

Algorithme 2 Procédure Heuristique NSCM

Entrées : E, Q : Entier ; $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, T_1, g, G, m$: réel ;

S : w, n, q, s, H, eta, P_{asp}, P_{ref} : vecteur ;

Début

Initialisation

pour i := 1 à 5 **faire**

w[i] := 1 ;

l[i] := $\frac{Q}{24.530000}$; // pour respecter du débit max

n[i] := random(1,3) ;

q[i] := $\frac{Q}{n[i].24}$;

S[i] := random(3250,6825) ;

H[i] := $\left(a_1 + a_2 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right) + a_3 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^3 \right) * S[i]^2$;

eta[i] := $\left(b_1 + b_2 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right) + b_3 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^2 + b_4 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^3 \right)$;

si (eta[i] < 0) ou (eta[i] > 1) ou ((H[i] < 9092) ou (H[i] > 4579)) **alors**

rpter

S[i] := random(3250,6825) ;

H[i] := $\left(a_1 + a_2 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right) + a_3 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^2 + a_4 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^3 \right) * S[i]^2$;

eta[i] := $\left(b_1 + b_2 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right) + b_3 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^2 + b_4 \left(\frac{q[i]}{S[i]} \right)^3 \right)$;

jusqu' (eta[i] > 0) et (eta[i] < 1) et ((H[i] < 9092) et (H[i] > 4579))

finsi

fin pour

Algorithme 3 Procédure Heuristique NSCM-2-

Amélioration

pour $i := 2$ à 5 **faire**

$$P_{asp}[i] := \left(\frac{(P_{ref}[i-1])^2 - \left(r[i] \cdot \frac{Q^2}{D^5} \right)}{e^{se[i]}} \right)^{0.5} ;$$

si $P_{asp}[i] > 45$ **alors**
 $w[i-1] := 0; S[i-1] := 0; n[i-1] := 0; H[i-1] := 0; eta[i-1] := 0; P_{asp}[i-1] := P_{ref}[i-1];$
sinon

$$P_{ref}[i-1] := \left(\frac{H[i-1]}{\frac{286.76.g.T_1}{G.m}} + 1 \right)^{1/m} . P_{asp}[i-1];$$

$$P_{asp}[i] := \left(\frac{(P_{ref}[i-1])^2 - \left(r[i] \cdot \frac{Q^2}{D^5} \right)}{e^{se[i]}} \right)^{0.5} ;$$

finsi**fin pour** $Z := 0;$ **pour** $i := 1$ à 5 **faire****si** $w[i] = 0$ **alors** $f[i] := 0;$ **sinon**

$$f[i] := \frac{n[i].q[i].\rho.\left(\frac{H[i]}{1000}\right)}{eta[i].\eta_{mc}.\eta_{TR}.PCI};$$

finsi $Z := Z + f[i];$ **fin pour**

Fin

5.2.3 Organigramme de l'heuristique

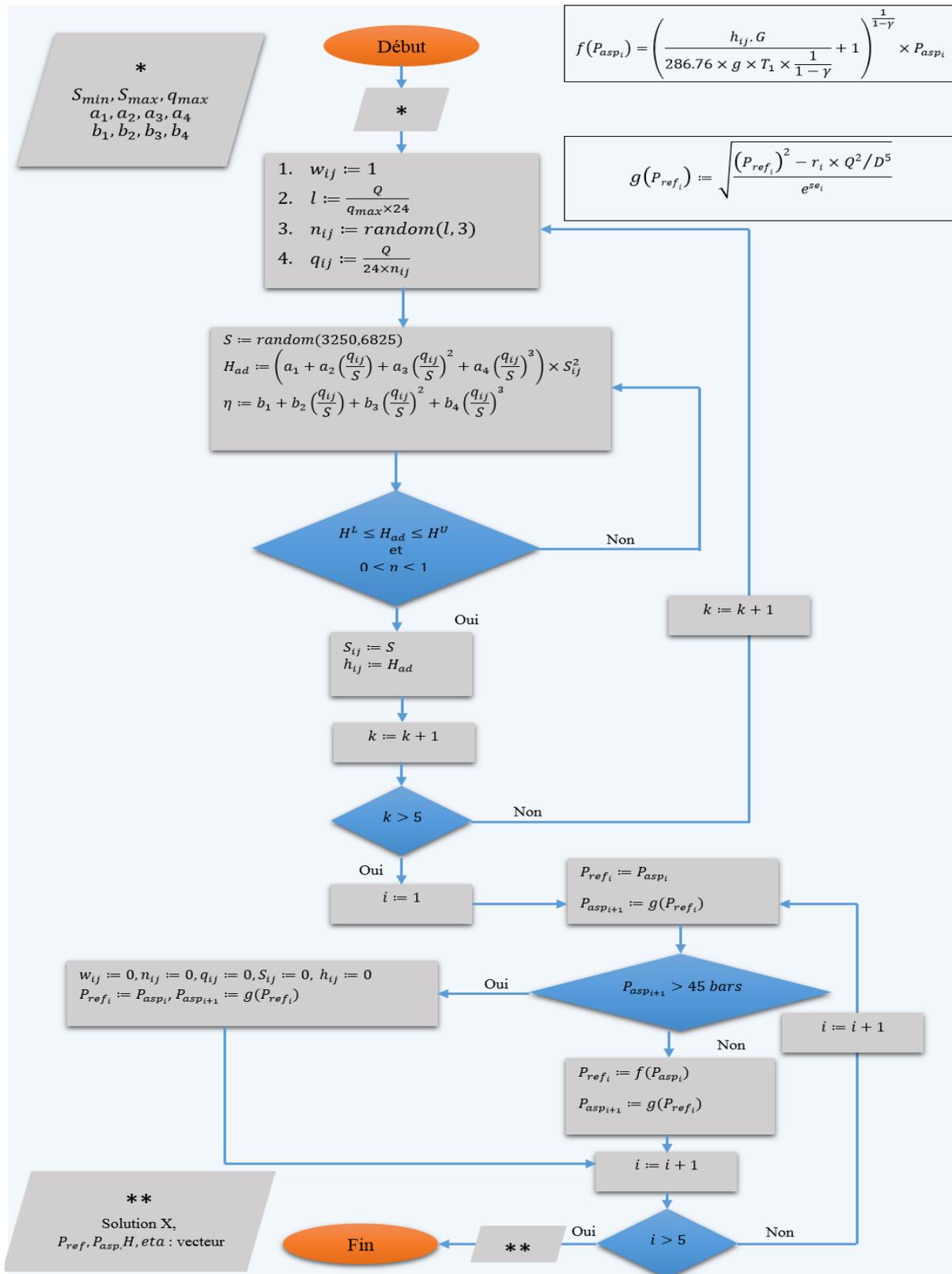


FIGURE 5.2 – Organigramme de l'heuristique

Chapitre 6

IMPLÉMENTATION INFORMATIQUE

Introduction

Nous aboutissons maintenant à l'étape finale à savoir l'élaboration d'une application aussi convivial que possible, munie d'une interface claire et accessible, facilitant ainsi son utilisation. Avant de procéder à la présentation de notre application, une description de l'environnement de programmation utilisé (MATLAB) s'avère nécessaire.

6.1 C'est quoi le MTLAB ?

MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité.

MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits.

6.2 Résultats de l'application

Après l'implémentation de l'heuristique adoptée à ce problème avec le langage de programmation MATLAB, nous avons illustré nos résultats en choisissant comme exemple un débit de $32000000 \text{ m}^3/\text{jour}$.

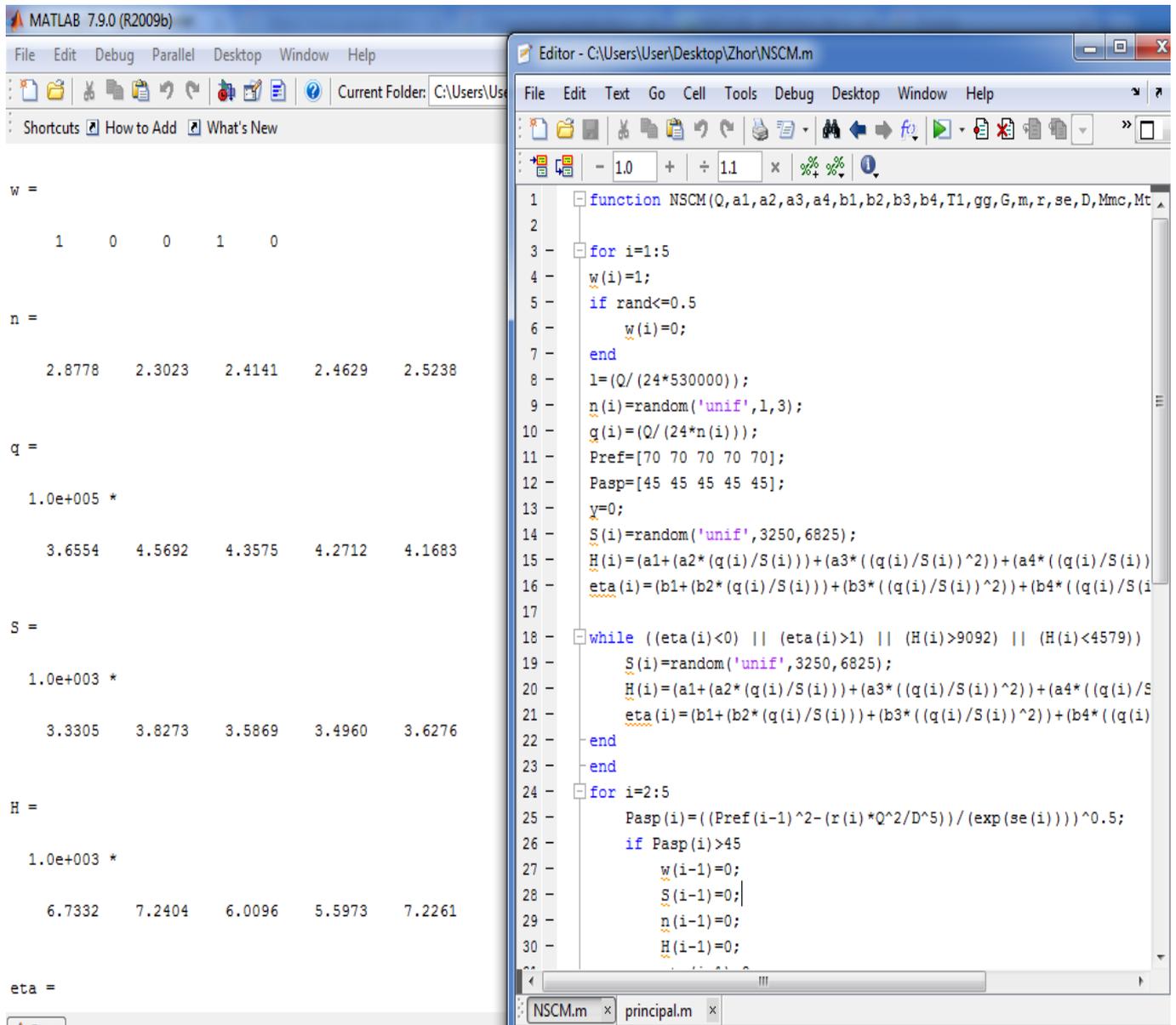


FIGURE 6.1 – Execution sur Matlab

– Résultats obtenus par l'heuristique NSCM pour le débit choisi :

	TC	Vitesse	Débit TC	Had	Rendement	Pasp	pref	consommation
SC1=0	-	-	-	-	-	55	55	-
SC2=1	3	3742(RTM)	45501(m3/h)	37138	0.82	45.6	52.74	6387(m3/h)
SC3=1	3	4209(RTM)	51623(m3/h)	33086	0.81	49.5	53.6	6260(m3/h)
SC4=0	-	-	-	-	-	49	49	-
SC5=1	3	3989(RTM)	48314(m3/h)	35118	0.82	53.12	55.39	5324(m3/h)
La quantité de gaz consommée			17970(m3/h)					

TABLE 6.1 – Itération 1.

Et vu que les heuristiques ont une caractéristique de l'aléatoire donc pour avoir une meilleure solution il faut exécuter plusieurs fois.

	TC	Vitesse	Débit TC	Had	Rendement	Pasp	pref	consommation
SC1=0	-	-	-	-	-	45	45	-
SC2=1	3	3932(RTM)	44642(m3/h)	37138	0.61	45	52.74	1250.8(m3/h)
SC3=0	-	-	-	-	-	50.5	50.5	-
SC4=0	-	-	-	-	-	50.5	50.5	-
SC5=0	-	-	-	-	-	50.5	50.5	-
La quantité de gaz consommée			1250.8(m3/h)					

TABLE 6.2 – Itération 2.

	TC	Vitesse	Débit TC	Had	Rendement	Pasp	pref	consommation
SC1=0	2	4287(RTM)	52074(m3/h)	35931	0.74	45	55	7652.6(m3/h)
SC2=1	3	3972(RTM)	44642(m3/h)	36138	0.69	45	52.74	3742.3(m3/h)
SC3=0	3	3955(RTM)	45940(m3/h)	33587	0.77	47.5	53.5	1604.6(m3/h)
SC4=0	-	-	-	-	-	45.5	50.5	-
SC5=0	-	-	-	-	-	45.5	50.5	-
La quantité de gaz consommée			13000(m3/h)					

TABLE 6.3 – Itération 3.

Donc après 3 itérations nous avons pu remarqué que la 2 ème itération représente la configuration optimale pour un débit de 32000000 m³/jour d'une consommation minimale de 1250,8 m³/h.

Pour des débits entre 24 000 000 et 38 000 000 m³/jour, une exécution de cette méthode a donné les résultats suivants :

Débit (m ³ /jour) *10 ⁶	Configuration optimale					Quantité du gaz consommée
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	
24	0	0	0	0	2	3726,9
25	0	0	0	2	0	4066,7
26	0	0	3	3	0	7806,2
27	0	3	0	0	3	8741,1
28	0	3	0	3	0	1200,3
29	3	3	0	0	3	5344,8
32	0	3	3	3	3	1250,8
33	3	0	3	3	3	57882
34	3	3	0	3	3	13232
35	3	3	3	0	3	44174
36	3	3	3	3	3	74650
37	3	3	3	3	3	30300
38	3	3	3	3	3	134110

TABLE 6.4 – Configuration optimale pour des débits différents

Après l'exécution de l'heuristique NSCM , les résultats obtenus montrent l'importance du choix des stations de compression à mettre en marche pour des débits importants.

En effet, l'augmentation du débit rentrant dans le gazoduc engendre une chute de pression importante (en dessous de la pression minimale 45 bars), ce qui conduit à augmenter le nombre de stations en marche ainsi que la vitesse de rotation des turbocompresseurs en fonction.

6.3 Comparaison des résultats obtenus avec les données réelles

Une comparaison entre la quantité du gaz consommée pour le régime de fonctionnement usuel et la quantité de gaz consommée pour le régime de fonctionnement obtenue avec l'optimisation pour les débits usuels est représentée dans le tableau ci-dessous.

Débit(m ³ /jour)	Régime usuel (m ³ /h)	Régime optimisé (m ³ /h)	Gain
26873129	19210,75	4596,8	14613,95
27000893	23103,29	4779,5	18323,79
26863871	24289	7505,7	16783,3
27035567	19481,25	4659,2	14822,05
25126400	18589,875	6984,6	11605,275
23481194	14136,115	3508	10628,115
25247167	13923	9117,9	4805,1

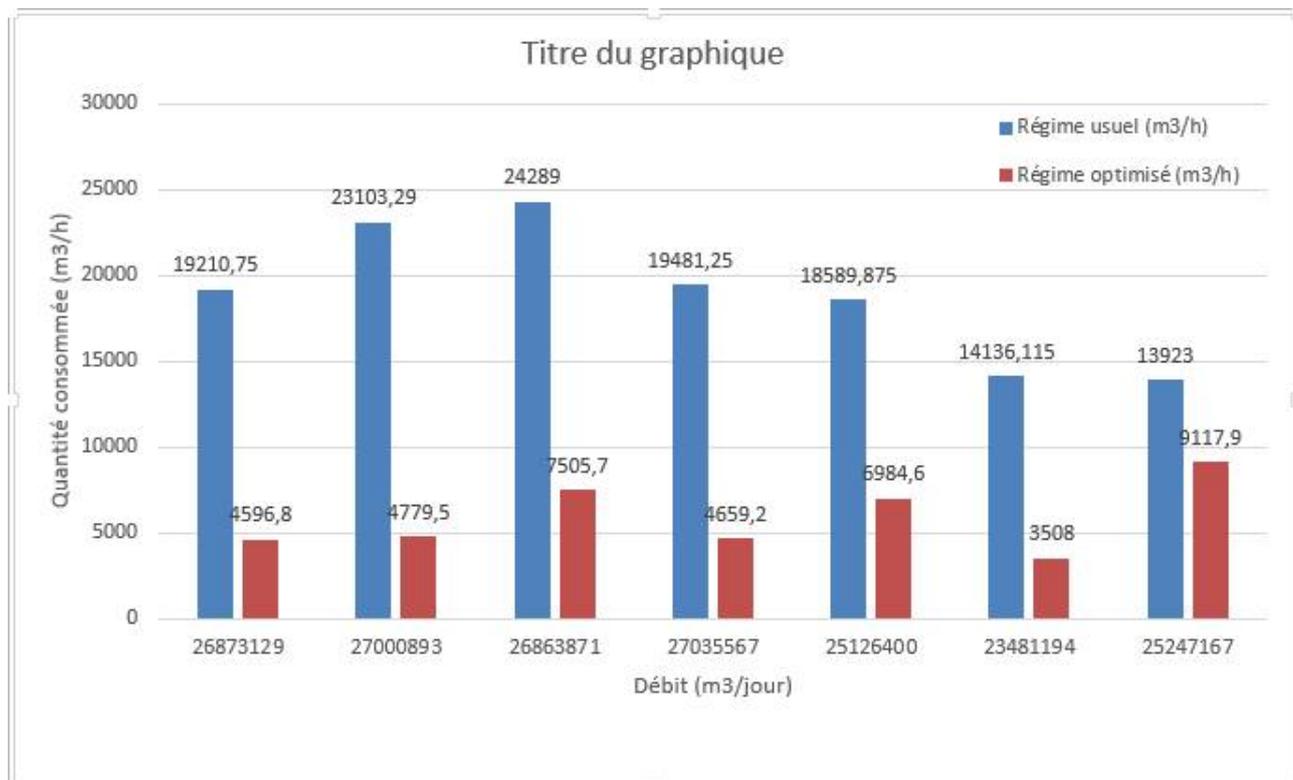


FIGURE 6.2 – Comparaison des résultats obtenus avec les données réelles

On remarque que l'heuristique NSCM nous donne des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

Notre projet de fin d'étude nous a permis de nous confronter pour la première fois à un problème du monde réel avec le bagage académique dont nous disposons.

L'entreprise SONATRACH nous a confié une étude qui a pour titre "Optimisation de transport du gaz naturel par le gazoduc GZ1".

Pour mener bien ce projet, il a fallu maîtriser et comprendre des notions hors notre domaine d'étude comme les données physiques et techniques. Au-delà de la connaissance de ces données, nous avons essayé le calcul hydraulique avec différentes formules afin d'obtenir un résultat qui traduit la réalité.

Nous avons abouti l'élaboration d'un modèle mathématique qui est un problème non linéaire mixte en nombre entiers. En ce qui concerne l'approche de résolution, nous nous sommes orientées en premier temps vers le solveur GAMS (General Algebraic Modeling System) qui est une démarche déterministe, que nous avons bien maîtrisé, mais vu la complexité de notre problème, GAMS n'a pas pu implémenté toutes les contraintes surtout celles qui définissent le domaine de fonctionnement d'un compresseur. Cette difficulté nous a incité vers une démarche stochastique(heuristique NSCM) , ce qui nous a conduit à abandonner cette approche.

Bibliographie

- [1] www.Sonatrach.dz
- [2] Rapport annuel Sonatrach 2014.
- [3] CODE RESEAU Décembre 2015.
- [4] Décision A-589(R6) organisation de TRC du 08 02 2016
- [5] A.ROJEY, B.DURAND, C.JAFFRET, S. JULLIAN, M. VALAIS; «Le gaz naturel : production, traitement, transport»; Editions Technip-Paris; 1994.
- [6] [Station de compression.org.fr](http://Station.de.compression.org.fr)
- [7] CHEBLI Laid et ABBASSI Youcef,calcul des paraétres de fonctionnement du dépropaneur ; traitement de GPL) "Modue III, Hassi R'mel" Mémoire de fin d'études.
- [8] E.Shashi, Menon, Gas Pipeline Hydraulics, CRC Press, Boca Raton, FL 2005.
- [9] Maillet-BACHELIER J, BERTRAND, Méthode des moindres carrées par Gauss, 1855.
- [10] Rakotomalala,Econometrie La regression linéaire simple et multiple,Ricco, 2016
- [11] SONATRACH, PetroGas Consult, Calcul thermohydraulique des gazoducs.
- [12] H. S. Lall and P. B. Percell (1990). A dynamic programming based gas pipeline optimizer. In A. Bensoussan and J. L. Lions (editors), Analysis and Optimization pp. 123-132, Springer-Verlag, Berlin.
- [13] R. Z.Wu , Model relaxations for the fuel cost minimization of steady-state gas pipeline networks , Mathematical and Computer Modeling. 2000.
- [14] D. Cobos Zaleta, Modelos de Optimización Entera Mixta no Lineal en Sistemas de Transporte de Gas Natural, tesis en opción al grado de mastero en ciencias en ingenía de sistemas, 2003.

- [15] A. Chebouba, Farouk Yalaoui, A. Smati, Lionel Amodeo, K. Younsi, A. Tairi, Optimization of natural gas pipeline transportation using Ant Colony, optimization algorithm computers and operations research 06/2009.
- [16] R.Hernandez, Optimization of gas transmission networks under energetic and environmental considerations, thèse doctorat en Génie de procédé et de l'environnement, 2011.
- [17] S.Hocine, Identification de modèles de procédés par programmation mixte déterministe , thèse doctorat, 2006.
- [18] S.Micheal, Technique Mathématique de la recherche opérationnelle Optimisation Combinatoire , Haermann, 1984.
- [19] barichard. v. Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs. PhD thesis, Ecole Doctorale d'Angers, 24 Novembre 2003.
- [20] J.Tegham, Recherche opérationnelle Tome1, Ellipses, 2012.
- [21] Goldberg D. E., Les algorithmes génétiques, éditions Addison Wesley, 1994.
- [22] R.G.Carter,Pipeline Optimization : Dynamic programming after 30 years, PSIG Annual Meeting, 28-30 October, Denver, Colorado 1998.
- [23] Hao J. K., Galinier P., Habib M.Identification de modeles de procédés par programmation mixte déterministe , Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contrainte, Revue d'Intelligence Artificielle, 1999.
- [24] Dietz A., Optimization multicritère pour la conception d'ateliers discontinus multiproduits : aspects économique et environnemental. Thèse de doctorat, INP ENSIACET, Toulouse, France, 2004.
- [25] Yuan X., Zhang S., Pibouleau L., Domenech S., Une méthode d'optimisation nonlinéaire en variables mixtes pour la conception de procédés. Recherche Opérationnelle/Opérations Reseach, 1988.
- [26] Hocine S., Elgue S., Montastruc L., Azzaro-Pantel C., Cabassud M., Pibouleau L., Domenech S., A hybrid optimization method (GA/SQP) for methyl acetate production process by reactive batch distillation, ICheaP-6, Pisa, Italy, 8-11 June 2003.
- [27] Montastruc L., Modélisation et optimisation d'un réacteur en lit fluidise de déphosphatation d'effluents aqueux, Thèse de doctorat, INP ENSIACET, 2003.
- [28] P.J.Wong and R.E.Larson , Optimization of natural-gas pipeline systems via dynamic programming . IEEE Transactions on Automatic Control, 1968.
- [29] Holland,Adaptation in naturel and artificial systems.University of Michigan Press,Ann Arbor,1975.
- [30] GAMS, GAMS The Solver Manuals, GAMS Development Corporation, 2004.

- [31] Duran M. A., Grossmann I.E., An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs. *Mathematical Programming*, 36, 307-339, 1986.

Annexe

Dénomination	GZ1	GZ2	GZ3
Diamètre (pouce)	40	40	42
Longueur (Km)	507	511	511
Facteur de marche (jours)	330	330	330
Capacité design ($10^9 Sm^3/an$)	13.679	12.507	14.462
Capacité réelle ($10^9 Sm^3/an$)	13.679	8.989	8.207

TABLE 6.5 – Descriptif du STC GZ1-GZ2-GZ3.

Les données	Les valeurs
Longueur (km)	507
Diamètre "en pouce"	40
Nuance d'acier	X60
Épaisseur du tube (mm)	11.9
Rugosité du tube (mm)	0.015
Nombre de station de compression	(05) $S_{c_1}, S_{c_2}, S_{c_3}, S_{c_4}, S_{c_5}$
Nombre de turbocompresseurs (par station)	04 (3+1)
Mode d'assemblage des compresseurs	Parallèle
Pression maximale du service design (bars)	70
Capacité maximale réelle ($10^9 Sm^3/ans$)	13.679
Le débit maximum de gazoduc	($36.10^6 m^3/h$)

TABLE 6.6 – Caractéristiques de la ligne GZ1.

Lieu	PK (km)	Altitude (m)
Terminal départ	0.000	749
Station 1	75	840
Station 2	149	1045
Station 3	226	970
Station 4	295	1235
Station 5	397	205
Terminal arrivée	507	56

TABLE 6.7 – Profil Altimétrie.

Les données	la valeur	Unité
Type (km)	Centrifuge	/
débit maximale	530000	m^3/min
débit minimale	126200	m^3/min
La vitesse minimale du compresseur	3250	RPM (Rotation Par Minute)
La vitesse maximale du compresseur	6825	RPM (Rotation Par Minute)
Le rendement mécanique (η_{tr})	0.95	/
Le rendement de la turbine (η_{mc})	0.35	/
La pression minimale d'aspiration	45	bar
La pression maximale de refoulement	70	bar

TABLE 6.8 – Caractéristiques des compresseurs.

Formules	Composés	%	Masse molaire
CH ₄	Méthane	0.862	16.04
C ₂ H ₆	Ethane	0.093	30.07
C ₃ H ₈	Propane	0.013	44.09
n-C ₄ H ₁₀	n-Butane	0.001	58.12
i-C ₄ H ₁₀	Isobutane	0.001	58.12
n-C ₅ H ₁₂	n-Pentane	-	72.15
i-C ₅ H ₁₂	Isopentane	-	72.15
n-C ₆ H ₁₄	n-Hexane	-	86.18
n-C ₇ H ₁₆	n-Heptane	-	100.21
H ₂ S	Hydrogène sulfuré	-	34.08
CO ₂	Dioxyde de carbone	0.020	44.01
N ₂	Azote	0.010	28.01
Masse Molaire	18.47		
Masse Volumique	0.78 kg / m ³		

TABLE 6.9 – Caractéristiques de gaz naturel.

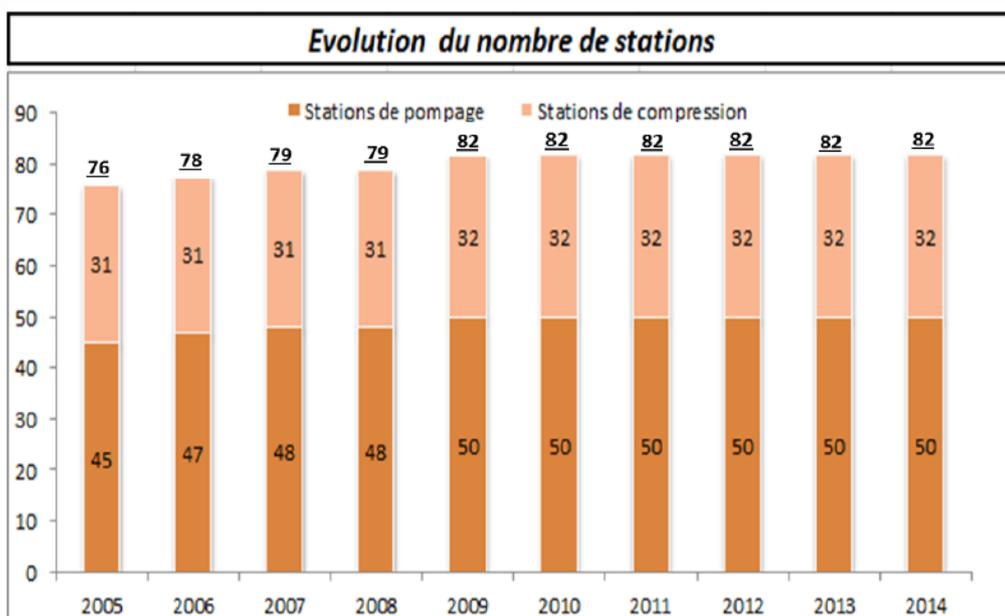


FIGURE 6.3 – Evolution en terme de nombre de stations (2005-2014)

INGERSOLL-RAND COMPANY
 POUR
 GENERAL ELECTRIC COMPANY
 ET
 SONATRACH

GAZODUC HASSI R'MEL - ARZEW
 PERFORMANCE ESTIMÉE
 DU COMPRESSEUR CDP-224
 STATIONS SC3 & SC5
 Voir GT-1694 pour SC1, 2, 4
 PLAN N° GT-1889

MW = 19,1
 K = 1,258
 T₁ = 51,0°C
 P₂ = 71,8 kg/cm²

Révision 1

● POINT DE GARANTIE

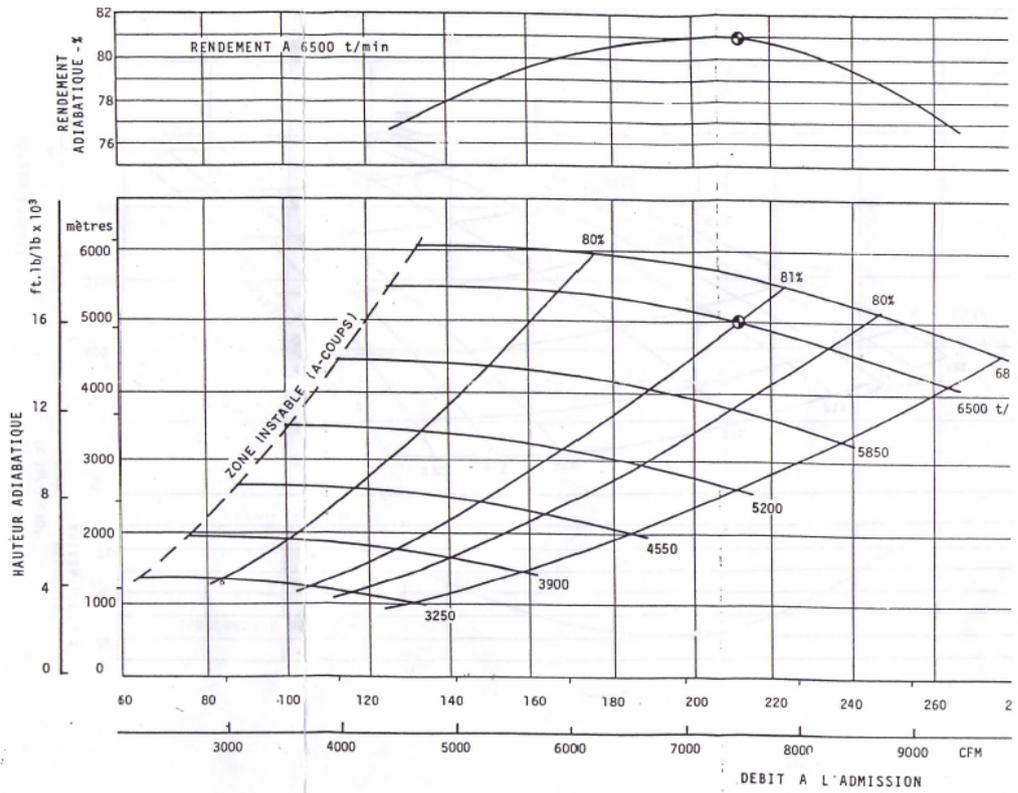


FIGURE 6.4 – Courbe caractéristique d'un compresseur centrifuge

Résumé : Ce travail est une modeste contribution à la formulation mathématique d'un problème qui répond à la détermination d'un régime de fonctionnement d'un gazoduc. Ce modèle a été appliqué au gazoduc GZ1 Hassi R'mel- Arzew, l'optimisation des régimes de de fonctionnement consiste à minimiser la consommation du gaz naturel par les stations de compression qui ont pour but de compenser la perte de charge en déterminant les stations à mettre en marche, ainsi que le nombre de turbocompresseurs en service dans chacune de ces stations. Une heuristique de type amélioratif a été proposée pour déterminer une configuration optimale. Cette heuristique représente une alternative intéressante pour l'optimisation du régime de fonctionnement d'un gazoduc.

MOTS CLÉS : optimisation du transport du gaz naturel, perte de charge, modélisation mathématique, programmation non linéaire mixte en nombre entier, estimation, heuristique, métaheuristique, hybridation, moindres carrées, algorithme génétique, recuit simulé.

Abstract : This thesis presents mathematical formulation proposed for determining gas pipeline operation, gas pipeline operation optimization consists in minimize the fuel consumption by compression stations which are designed to compensate pressure drop, the principal decisions variables are chosen to be the operating compression station and the number of operating turbo compressors in each of these stations. An ameliorative heuristic was proposed to determine a feasible solution.

KEYWORDS : Gas transport, Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem, pressure drop, mathematical modeling, Mixed Integer Nonlinear Programming, estimation, heuristic, metaheuristic, hybridization, least squares, genetic algorithm, simulated annealing

Résumé : Ce travail est une modeste contribution à la formulation mathématique d'un problème qui répond à la détermination d'un régime de fonctionnement d'un gazoduc. Ce modèle a été appliqué au gazoduc GZ1 Hassi R'mel- Arzew, l'optimisation des régimes de de fonctionnement consiste à minimiser la consommation du gaz naturel par les stations de compression qui ont pour but de compenser la perte de charge en déterminant les stations à mettre en marche, ainsi que le nombre de turbocompresseurs en service dans chacune de ces stations. Une heuristique de type amélioratif a été proposée pour déterminer une configuration optimale. Cette heuristique représente une alternative intéressante pour l'optimisation du régime de fonctionnement d'un gazoduc.

MOTS CLÉS : optimisation du transport du gaz naturel, perte de charge, modélisation mathématique, programmation non linéaire mixte en nombre entier, estimation, heuristique, métaheuristique, hybridation, moindres carrées, algorithme génétique, recuit simulé.

Abstract : This thesis presents mathematical formulation proposed for determining gas pipeline operation, gas pipeline operation optimization consists in minimize the fuel consumption by compression stations which are designed to compensate pressure drop, the principal decisions variables are chosen to be the operating compression station and the number of operating turbo compressors in each of these stations. An ameliorative heuristic was proposed to determine a feasible solution.

KEYWORDS : Gas transport, Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem, pressure drop, mathematical modeling, Mixed Integer Nonlinear Programming, estimation, heuristic, metaheuristic, hybridization, least squares, genetic algorithm, simulated annealing