

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'hamed Bouguerra Boumerdes



Faculté des Sciences
Département des Mathématiques

Pour l'obtention du diplôme de Master en Recherche Opérationnelle
Option : Recherche Opérationnelle, Mathématique de gestion (ROMAG)

Mémoire présenté le 01/07/2017,

Par :

M^{lle} HADDA Hadia

Optimisation
de l'expansion GR5 Reggane-Hassi R'Mel
TRC-SONATRACH

devant le jury composé de :

Présidente	M ^{me} R.FASS	M.A.A	U.M.B.B.
Promotrice	M ^{me} N.RAGGAS	M.A.A	U.M.B.B.
Examinatrice	M ^{me} S.ZOUAOU	M.A.A	U.M.B.B.
Examineur	M ^r A.MOUICI	Doctorant	U.S.T.H.B.
Encadreur	M ^r K.AZZI	SONATRACH-TRC.	

Année Universitaire 2016 – 2017

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	6
1 Présentation de l'entreprise d'accueil SONATRACH	8
1.1 Description du groupe SONATRACH	9
1.2 Missions et objectifs de SONATRACH	9
1.2.1 Missions	9
1.2.2 Objectifs	10
1.3 Les activités opérationnelles de SONATRACH	10
1.3.1 L'activité Exploration-Production (E&P)	10
1.3.2 L'activités Transport par Canalisation (TRC)	10
1.3.3 L'activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie (LRP)	11
1.3.4 L'activité Commercialisation (COM)	11
1.4 Les structures Fonctionnelles	11
1.5 Présentation de l'activité transport par canalisation	12
1.5.1 Organisation de l'Activité TRC	14
1.5.2 Missions de l'Activité TRC	14
1.5.3 Patrimoine de l'Activité TRC	15
1.5.4 Le réseau de transport de l'Activité TRC	15
2 Généralités et définitions	16
2.1 Généralité sur les hydrocarbures	16
2.2 Le gaz naturel	16
2.2.1 Origine et historique du gaz	16
2.2.2 Structure et caractéristiques du gaz naturel	17
2.2.3 Types de gaz naturel	18
2.2.4 La chaîne gazière	18
2.3 Composants des réseaux de transport par canalisation	19

2.3.1	Stations d'injection ou de départ	19
2.3.2	Les gazoducs	20
2.3.3	Station de compression	22
2.3.4	Poste de sectionnement	23
2.3.5	Poste de Coupure	24
2.4	Formule d'écoulement du gaz	25
2.5	Formule de chute de pression (perte de charge)	27
3	Problématique et Modélisation	28
3.1	Position du Problème	29
3.2	Descriptif et Consistance du STC GR5 Reggane-Hassi R'mel	30
3.2.1	Description du STC GR5	30
3.2.2	Consistance du STC GR5	31
3.3	Situation Géographique des Gisements	34
3.4	Profils prévisionnels de gaz de vente du Sud-Ouest	35
3.4.1	Caractéristiques des Points d'Injections de gaz naturel	36
3.4.2	Spécification du Fluide	36
3.5	Hypothèses de base retenues	37
3.5.1	Hypothèses sur les régimes de pression	37
3.5.2	Hypothèses sur les calculs thermiques	37
3.5.3	Hypothèses sur les stations de compression	37
3.5.4	Hypothèse sur les postes de coupure	38
3.5.5	Hypothèse sur le facteur de marche	38
3.6	Modélisation du problème	38
3.6.1	Définition des données	38
3.6.2	Définition des Variables de décision	39
3.6.3	La fonction objectif	42
3.6.4	Contraintes	42
3.6.5	Le modèle mathématique	44
4	Méthodes de Résolution	46
4.1	Notions de base sur l'optimisation	46
4.1.1	Modèles d'optimisation	47
4.1.2	Programmation Mathématique	47
4.1.3	Programmation linéaire	48
4.1.4	Programmation non linéaire	49
4.1.5	Comment juger la difficulté d'un problème?	49

4.1.6	Les classes de problèmes	50
4.2	État de l'art sur les méthodes exactes	51
4.2.1	Méthode de pénalisation quadratique	52
4.2.2	Méthode de lagrangien augmenté	53
4.2.3	Méthodes de points intérieurs	54
4.2.4	Méthode de programmation quadratique successive	55
4.2.5	Programmation dynamique	55
4.3	Méthodes approchées	58
4.3.1	Méthode Recuit Simulé	59
4.3.2	Méthode de Recherche Tabou	61
4.3.3	Méthodes génétiques	63
4.4	Choix des Méthodes de résolution	65
4.5	Adaptation de la programmation dynamique	66
4.6	Proposition d'une nouvelle méthode recherche tabou	66
5	Implémentation et Interprétation des résultats	68
5.1	Présentation du Matlab	68
5.1.1	Pourquoi programmé en Matlab	69
5.2	Insatallation du logiciel	69
5.3	Présentation du logiciel	71
5.4	Résolution du problème	73
5.4.1	Comparaison des résultats obtenues par la présente étude par rapport à ceux de SONATRACH	78
5.5	Comparaison des deux méthodes	78
5.5.1	Interprétation des résultats obtenus	79
	<i>Conclusion générale</i>	80

Table des figures

1.1	Organigramme de la Macrostructure de SONATRACH	12
1.2	Processus du transport des hydrocarbures	13
1.3	Organigramme de l'Activité TRC	14
1.4	Schéma du réseau de transport de TRC	15
2.1	Processus de transformation du gaz naturel	19
2.2	Gazoducs	20
2.3	Canalisation en acier	21
2.4	Station de Compression	22
2.5	Poste de Sectionnement	23
2.6	Configuration technique de poste de coupure	24
2.7	Travaux de raccordement d'un looping	24
2.8	Schéma d'un tube	25
3.1	Situation Géographique du gazoduc GR5	30
3.2	Schéma d'équipements du STC GR5	32
3.3	Schéma Descriptif du STC GR5	34
3.4	Situation Géographique des Gisements	34
3.5	Conduite de N tronçons	45
4.1	Modèles d'optimisation	47
4.2	Croissance exponentielle et polynômial	50
4.3	Classes des problèmes	51
4.4	Méthodes de résolution	51
4.5	Trajectoire Optimale	57
4.6	Blocage d'une heuristique calssique dans un minimum local	58
4.7	comparaison entre le recuit simulé et une heuristique classique	60
4.8	Simple croisement	64

4.9	Double croisement	64
4.10	Mutation sur un individu ayant un seul chromosome.	64
5.1	Installation du logiciel.	69
5.2	Fenêtre du logiciel.	70
5.3	Installation du logiciel.	70
5.4	Fenêtre Principale	71
5.5	Fenêtre de la programmation dynamique	71
5.6	Fenêtre de la Recherche Tabou	72
5.7	Fenêtre de Générateur	73
5.8	Ligne avec la station de Krachba	74
5.9	Résultat du 1er sous système par la programmation dynamique	74
5.10	Résultat du 2 ème sous système par la programmation dynamique	75
5.11	Résultat du 1er sous système par la Recherche Tabou	75
5.12	Résultat du 2ème sous système par la Recherche Tabou	76
5.13	Résultat du système par la programmation dynamique	76
5.14	Résultat du système par la recherche tabou	77
5.15	Schéma de l'expansion de GR5	78

Liste des tableaux

3.1	Caractéristique de la ligne GR5	31
3.2	Localisation géographique des Postes de Coupure	31
3.3	Localisation géographique des Postes de Sectionnement	33
3.4	Profils prévisionnels de gaz de vente du sud-ouest	35
3.5	Les coordonnées des différents points d'injection	36
3.6	Les spécifications de la qualité de gaz des gisements	36
3.7	Les coefficients de sécurité de chaque zones	40
3.8	Table des épaisseurs commerciales	41
4.1	Croissance exponentielle et polynômial	49
5.1	Tableau comparatif de deux méthodes	79

Remerciements

Premièrement, je remercie **ALLAH** le Miséricordieux, qui me a éclairé sur le chemin du savoir pour me avoir donné la volonté et la force pour accomplir ce modeste travail. je exprime mon remerciement le plus sincères à ma promotrice **Mme. RAGGAZ Nassima** pour avoir accepté de m'encadrer, et son exigence critique, la confiance et le soutien qu'il m'a accordée.

Je tiens ensuite à remercier le personnel de SONATRACH TRC Siège. A ce titre, je cite Monsieur **AZZI Khaled**, Messieurs **LEFGOUNE Madjid** et **BOURERSA Mohamed**, pour leurs suivi et conseils, aussi pour la documentation qu'ils ont mis à ma disposition et l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury : **Mme.ZOUAOUI Selma** , **Mme.FASS Razika** et **Mr.MOUICI Aissa**, d'avoir accordé de leurs temps précieux pour expertiser mon travail, j'espère qu'ils en soient satisfaits.

Je remercie **YOUCEF Djeddi** pour son aide et pour ses précieux conseils et orientations.

Je remercie toute ma famille pour m'avoir soutenu et redonné confiance.

Enfin, Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et à tous ceux qui m'ont incité à faire mieux, veuillez trouver ici le témoignage de ma très profonde gratitude.

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 mes chers soeurs et frère.

A Youcef Djeddi pour son aide.

A tous mes chers amies.

Hadia

Avant Propos

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

Ce stage s'est déroulé au niveau de l'activité 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 différentes 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 un problème d'expansion d'un gazoduc qui répond à la détermination des diamètres de loopings et leurs épaisseurs commerciaux selon les zones traversées. Ce modèle a été appliqué au gazoduc GR5 Reggan-Hassi R'mel. Le critère retenu concerne la minimisation de l'investissement de l'expansion. Afin de garantir l'obtention d'une solution optimale, nous avons adapté le principe de la programmation dynamique qui consiste à examiner tous les cas possibles mais conduit à des algorithmes exponentiels, ce qui nous a incité à proposer une nouvelle méthode basée sur le principe de la recherche tabou qui est une résolution approchée afin de réduire le temps d'exécution.

Abstract : This work is a modest contribution of The problem of expansion of a gas pipeline which corresponds to the determination of the diameters of loopings and their commercial thicknesses according to the zones traversed. This model was applied to the GR5 Reggan-Hassi R'mel pipeline. The criterion adopted concerns the minimization of the investment of the expansion. In order to ensure that an optimal solution is obtained, we have adapted the principle of dynamic programming, which consists in examining all possible Leads to exponential algorithms, which has prompted us to propose a new method Based on the taboo search principle, which is an approximate resolution to reduce the execution time.

MOTS CLÉS : optimisation du transport du gaz naturel, perte de charge, modélisation mathématique, programmation non linéaire à variables mixtes, heuristique, métaheuristique, algorithme génétique, recuit simulé, recherche tabou.

KEYWORDS : Gas transport, Gaz Pipeline Fuel Consumption Minimisation Problem, pressure drop, mathematical modeling, Integer Nonlinear Programming, estimation, heuristic, metaheuristic, genetic algorithm, simulated annealing, Tabu Search.

Introduction générale

Pour assurer leur pérennité, faire face à la concurrence et s'imposer sur la scène mondiale, les entreprises pétrolières doivent maximiser au plus haut point leurs potentiels en plus des progrès techniques et développements économiques qu'elles ont à assumer.

Le développement de l'entreprise, entraîne entre autre la nécessité d'augmenter les bénéfices et de réduire les dépenses. Ces constats englobent toutes les activités : exploration, forage, production, transport des hydrocarbures, commercialisation...etc. Le réseau de transport du gaz naturel par canalisation de la SONATRACH, doit assurer l'évacuation du gaz naturel de telle sorte à satisfaire la demande des clients à moindre coût.

Le système de transport du gaz naturel par canalisation (STC) est largement développé et complexe, l'importance de l'optimisation de l'exploitation et la planification de ses équipements est l'un des objectifs majeurs des compagnies pétrolières et gazières. Le coût d'investissement et les dépenses d'exploitation du réseau de transport par canalisation sont très importants. Une petite amélioration dans l'utilisation du système peut impliquer des montants substantiels importants.

Dans ce projet, nous nous intéressons à la réduction du coût d'investissement de l'expansion de STC GR5 reliant Reggane et Hassi R'mel situés dans la région du Sud-Ouest de Hassi R'mel, tout en respectant les contraintes de perte de pression et la limitation sur le débit du STC GR5 à l'aide des méthodes de la recherche opérationnelle qui sont des démarches rationnelles basées sur des concepts et outils mathématiques et statistiques. Généralement ces méthodes sont employées sur des problèmes tels que leur utilisation manuelle devient impossible. C'est pour quoi du fait qu'elle soient rationnelles, les démarches proposées par la recherche opérationnelle peuvent être traduites en programmes informatiques.

Parmi les questions auxquelles s'intéresse la (RO), citons les problèmes liés au domaine de transport des hydrocarbures dont notre étude fait l'objet.

Pour mieux développer le sujet proposé par l'entreprise nous avons élaboré le plan de travail qui s'articule autour des chapitres suivants :

- Nous avons commencé par une introduction générale.
- Le premier chapitre est consacré à une brève présentation de l'entreprise d'accueil SONATRACH.
- Le second chapitre aborde des généralités et des définitions.
- Le troisième chapitre pose la problématique et sa formulation mathématique (modélisation) comportant les variables de décision, les contraintes et la fonction Objectif.
- Le quatrième chapitre est réservé aux méthodes de résolution.
- Le cinquième chapitre porte sur la description générale du logiciel informatique, implémentation des deux méthodes proposées et interprétation des résultats obtenus.
- Enfin, nous achèverons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE D'ACCUEIL SONATRACH

Introduction

La Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures SONATRACH est la compagnie nationale algérienne de recherche, d'exploitation, de transport par canalisation, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivés. Elle a pour mission de valoriser de façon optimale les ressources nationales d'hydrocarbures et de créer des richesses au service du développement économique et social du pays.

Historiquement, SONATRACH a joué un rôle primordial dans le développement de l'industrie gazière ; elle a été le premier fournisseur du GNL aux Etats Unis d'Amérique, l'Europe et l'Asie pacifique.

SONATRACH est aujourd'hui la première compagnie d'hydrocarbures en Afrique et en Méditerranée. Elle exerce ses activités dans quatre principaux domaines l'Amont, l'Aval, le Transport par Canalisation et la Commercialisation. Elle est présente dans plusieurs projets avec différents partenaires en Afrique, en Amérique Latine et en Europe. Depuis sa création, SONATRACH a réussi à acquérir une forte capacité d'intégrer les nouvelles technologies, à asseoir une présence prouvée et fiable sur les marchés.

Aujourd'hui, SONATRACH s'affirme non seulement comme un groupe international à vocation pétrolière et gazière, mais comme une compagnie solidaire, responsable et citoyenne.

1.1 Description du groupe SONATRACH

- Forme juridique : Société par action (SPA).
- Effectif de SONATRACH : 59 304 agents en 2016 [45].
- Chiffre d'affaires à l'exportation en 2016 : 58.4 milliards de dollars, contre 63.5 en 2015, soit une baisse de 8%.
- Production totale d'hydrocarbures en 2016 : 195,2 millions TEP [48].
- La production de gaz naturel en 2016 : 130,9 milliards de m³ [48].
- Dettes envers groupes 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 [44] :
 1. Le groupe pétrolier et gazier est classé le premier en Afrique et 12^{ème} dans le monde en 2016.
 2. Quatrième exportateur mondial de Gaz Naturel Liquéfié (GNL).
 3. Troisième exportateur mondial de Gaz Pétrole Liquéfié (GPL).
 4. Cinquième exportateur de Gaz Naturel(GN).

1.2 Missions et objectifs de SONATRACH

Depuis 1971 l'entreprise SONATRACH a pris en charge les missions et les objectifs stratégiques suivants pour valoriser ses ressources en hydrocarbures[34] :

1.2.1 Missions

- La liquéfaction du gaz naturel, le traitement et la valorisation des hydrocarbures gazeux.
- La transformation et le raffinage des hydrocarbures.
- Le développement de toutes formes d'activités conjointes en Algérie et à l'étranger avec des sociétés algériennes et étrangères.
- L'approvisionnement du pays en hydrocarbures à moyen et long terme.
- L'étude, la promotion et la valorisation de toute activités ayant un lien direct ou indirect avec l'industrie des hydrocarbures et toute activité pouvant engendrer un intérêt a SONATRACH, généralement toute opération quelque soit sa nature pouvant se rattacher directement ou indirectement à son objet social.

1.2.2 Objectifs

- La maîtrise continue de ses matières de base.
- Le renforcement des ces capacités technologiques et managériales.
- Le développement international et partenariat.

SONATRACH est organisée autour de quatre (4) activités opérationnelles, qui exercent les métiers de la chaîne hydrocarbure, soutenues par des structures fonctionnelles :

1.3 Les activités opérationnelles de SONATRACH

Chaque activité exerce ses métiers et développe son portefeuille d'affaires. Elle contribue également par les métiers relevant de son domaine de compétences au développement des activités internationales de la société.

1.3.1 L'activité Exploration-Production (E&P)

L'activité Exploration-Production est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies d'exploration, de développement et d'exploitation de l'amont pétrolier et gazier.

L'activité Exploration-Production couvre notamment les domaines opérationnels suivants :

- Recherche et Développement.
- Production et Exploitation.
- Engineering et construction. Ainsi que le domaine fonctionnel.
- Gestion des Associations.

1.3.2 L'activités Transport par Canalisation (TRC)

L'activité Transport par Canalisation est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies en matières de transport des hydrocarbures par canalisation. L'activité Transport par Canalisation couvre, notamment les domaine opérationnels suivants :

- Etudes et Développement.
- Exploitation des ouvrages de transport des hydrocarbures et des installations portuaires.
- Maintenance des ouvrages de transport des hydrocarbures et des installations portuaires.

1.3.3 L'activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie (LRP)

L'activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies de développement et d'exploitation de l'aval pétrolier et gazier. L'activité Liquéfaction, Raffinage et Pétrochimie couvre l'exploitation, notamment dans les domaines opérationnels suivants :

- Liquéfaction du gaz naturel.
- Séparation des GPL.
- Raffinage du pétrole brut et du condensat.
- Pétrochimie.
- Etudes et Développement.

1.3.4 L'activité Commercialisation (COM)

L'activité Commercialisation est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies en matière de commercialisation extérieure des hydrocarbures et sur le marché national.

L'activité Commercialisation couvre, notamment les domaines opérationnels suivants :

- Commercialisation du Pétrole Brut et Produits Pétroliers.
- Commercialisation Gaz.
- Transport maritime des hydrocarbures.
- Importation des produits pétroliers selon la demande.

Chaque activité opérationnelle est dotée de structures fonctionnelles communes. Outre leurs missions au sein de l'activité, celles-ci assurent, chacune dans son domaine de compétences, le reporting aux structures fonctionnelles.

1.4 Les structures Fonctionnelles

Les structures Fonctionnelles sont organisées autour de onze directions, réparties comme suit :

- **Les Directions Corporates :**
 - Planification et Economie (SPE).
 - Finances (FIN).
 - Ressource Humaines (RHU).
- **Les Directions Centrales :**
 - Filiales et Participations (FIP).

- Activité Centrale (ACT).
- Juridique (JUR).
- Informatique et système d'information (ISI).
- Marchés et Logistique (MLG).
- Santé, Sécurité et Environnement (HSE).
- Business Développement(BSD).
- La Direction Centrale Recherche et Développement (RDT).

L'Organigramme de la Macrostructure de SONATRACH est représenté comme suit :

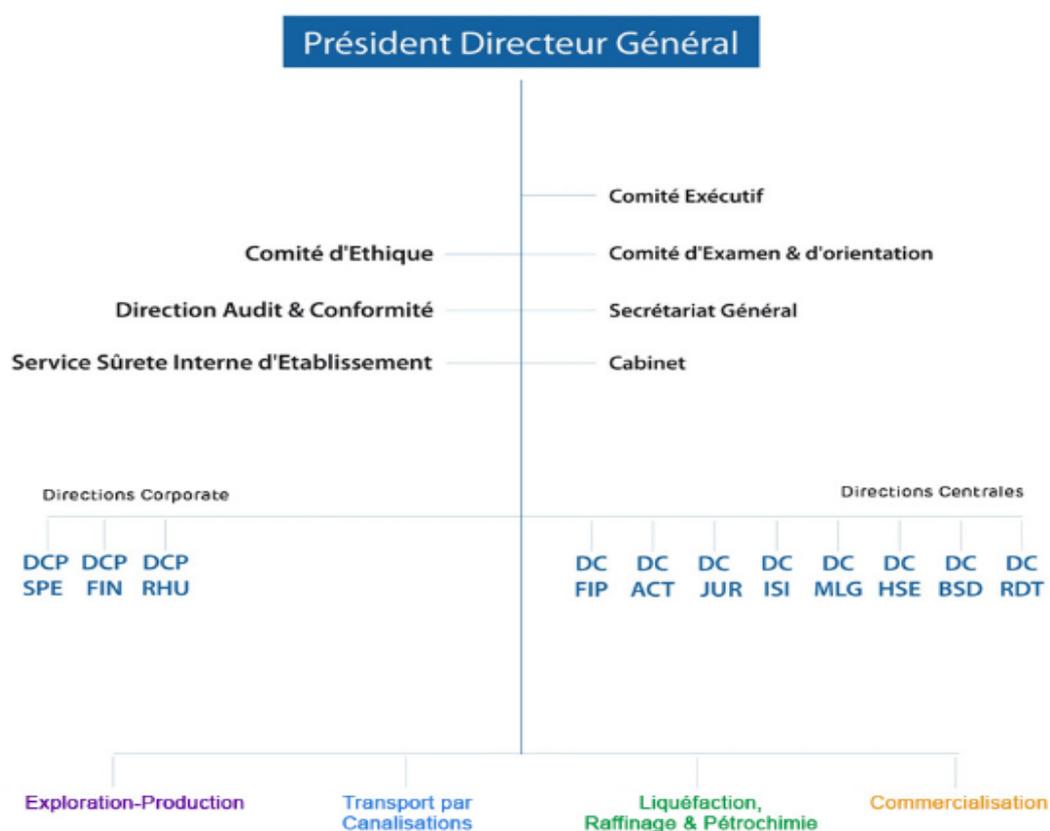


FIGURE 1.1 – Organigramme de la Macrostructure de SONATRACH

1.5 Présentation de l'activité transport par canalisation

Au sein du groupe SONATRACH, l'activité Transport par Canalisation (TRC) est en charge de l'acheminement et la livraison des hydrocarbures (pétrole brut, gaz, GPL et condensat), depuis les zones de stockage aux complexes GNL, aux usines de séparation des GPL, aux raffineries, aux ports pétroliers ainsi que l'export du gaz naturel à travers les gazoducs à destination

de l'Italie et de l'Espagne.

L'activité Transport par Canalisation a la charge de définir, de réaliser, d'exploiter, d'assurer la maintenance et de faire évoluer les réseaux de canalisation ainsi que les différentes installations qui s'y rattachent. TRC veille également au respect des conditions de sécurité et de préservation de l'environnement [46]. L'Activité Transport par Canalisations est un maillon important de la chaîne des hydrocarbures et ce, d'un point de vue historique, stratégique et opérationnel[44]. La figure ci-dessous le montre bien :

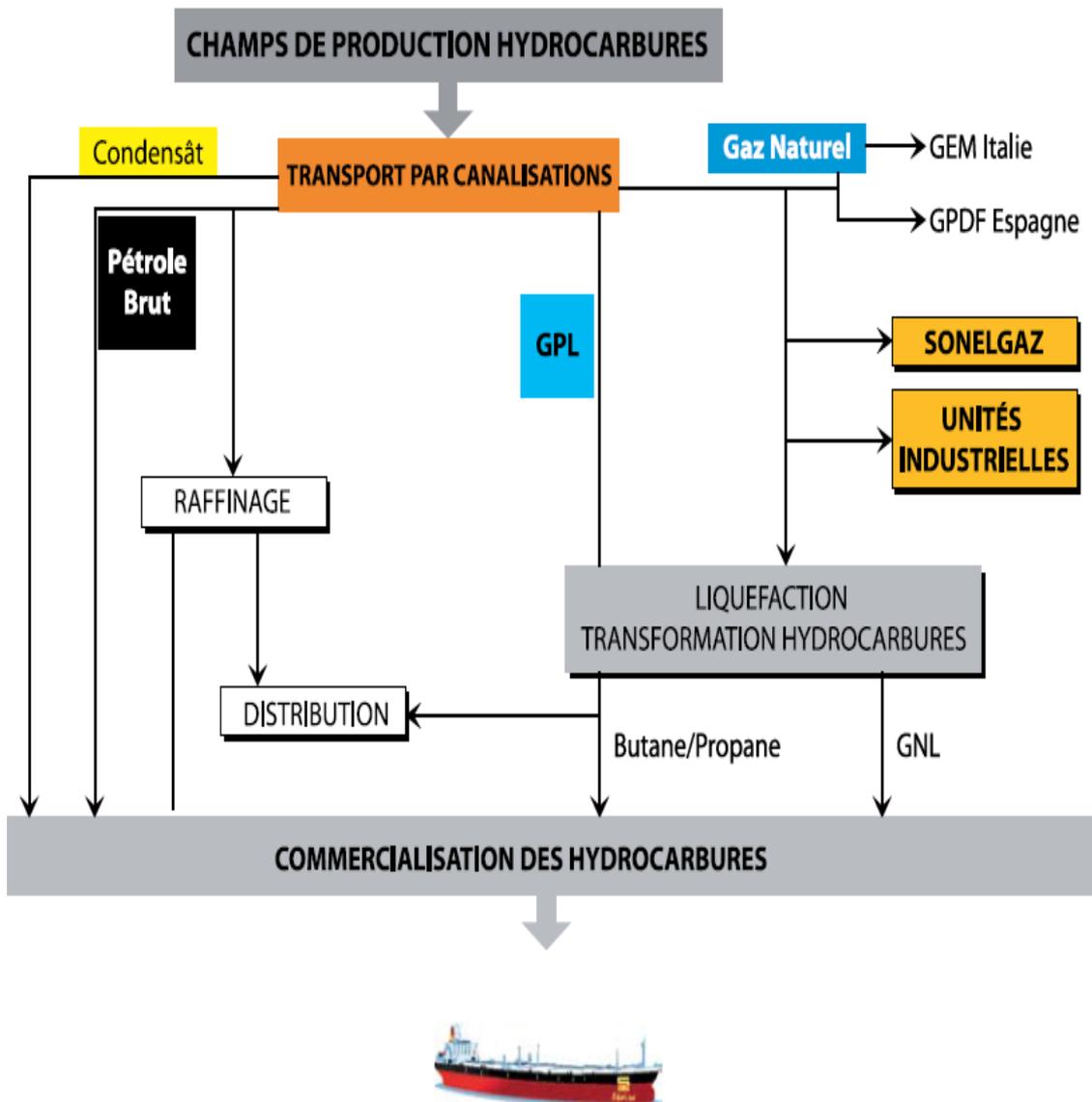


FIGURE 1.2 – Processus du transport des hydrocarbures

Le Transport par Canalisation constitue le maillon régulateur de la chaîne hydrocarbures.

1.5.1 Organisation de l'Activité TRC

L'activité Transport par Canalisation est organisée autour des Structures Opérationnelles et des Structures Fonctionnelles [46]. La figure suivante montre l'organigramme de TRC :

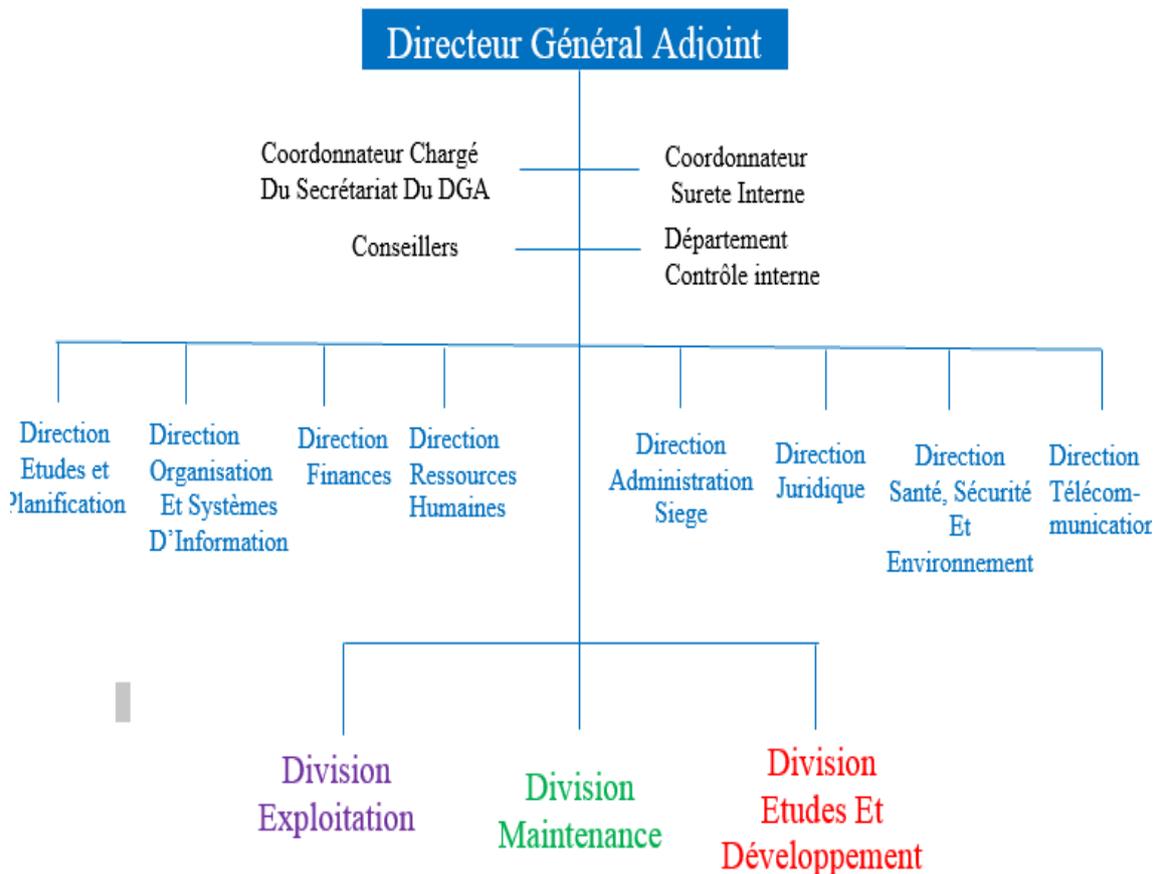


FIGURE 1.3 – Organigramme de l'Activité TRC

1.5.2 Missions de l'Activité TRC

L'activité de transport par canalisation a pour missions :

- La gestion et l'exploitation des ouvrages de transport des hydrocarbures.
- 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 et canalisation de transport des hydrocarbures.
- La conduite des études, la réalisation et la gestion des projets de développement du réseau.

1.5.3 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)[44].

1.5.4 Le réseau de transport de l'Activité TRC

SONATRACH assure l'acheminement et le transport des hydrocarbures via l'activité TRC, la figure suivante montre le réseau de transport de TRC :



FIGURE 1.4 – Schéma du réseau de transport de TRC

Chapitre 2

GÉNÉRALITÉS ET DÉFINITIONS

Introduction

Avant d'entamer notre étude, il est nécessaire de commencer par l'analyse de l'environnement du problème, afin de mieux maîtriser le domaine de ce dernier.

2.1 Généralité sur les 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 qui sont deux carburants importants. Par ailleurs, ils ne se mélangent pas à l'eau.

2.2 Le gaz naturel

2.2.1 Origine et historique du gaz

Bien que le gaz naturel soit connu depuis l'antiquité, son exploitation à grande échelle est une affaire relativement récente. Au début, la consommation du gaz provenait de la captation d'émanations naturelles et était utilisé surtout pour l'éclairage, cette pratique était courante dans l'ancienne Chine et sur les bords de la mer Caspienne, près de Bakou il y a plus de deux millénaires. Cependant ce n'est qu'en 1824 que le premier puits commercial de gaz fût foré dans l'état du New Jersey, et le premier gazoduc important de 160 km fût construit aux États-Unis d'Amérique en 1891.

Au début de l'année 1910, une industrie organisée du gaz ayant pour objectif le long terme a commencé à faire son apparition. A partir de cette époque, le gaz naturel commence à gagner du terrain comme source d'énergie (essentiellement aux Etats-Unis). Ce pays demeurera pratiquement le seul producteur, consommateur du monde jusqu'à la deuxième guerre mondiale, ceci malgré l'existence de marchés potentiels ailleurs (notamment en Europe occidentale) et d'une certaine production du gaz associé au pétrole dans d'autres régions (essentiellement au Venezuela et au Proche-Orient), mais le transport de grandes quantités de gaz n'était pas possible à cette époque.

En Algérie, les premières découvertes de champs gaziers a eu lieu en 1956 sous le régime colonial. Depuis, les capacités de production et d'exportation du gaz naturel n'ont cessé de se développer, à tel point que l'Algérie occupe actuellement le rang du troisième pays producteur de gaz à l'échelle mondiale.

En raison de ses avantages économiques et écologiques, le gaz naturel devient chaque jour plus actif pour beaucoup de pays. Les propriétés de ce produit, comme par exemple le faible intervalle de combustion du caractérisant, en font l'une des sources d'énergie les plus fiables connues à ce jour. Actuellement, il représente la deuxième source d'énergie la plus utilisée après le pétrole. D'après le département américain de l'énergie, la part du gaz naturel dans la production énergétique mondiale était de 23% en 1999 et les perspectives de développement de la demande sont excellentes[2].

2.2.2 Structure et caractéristiques du gaz naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile extrait de gisements naturel issu de la dégradation d'anciens organismes vivants et produits à partir des couches souterraines poreuses, il est souvent présent dans les même zones de production que le pétrole.

Avec une structures moléculaire simple, naturelle et propre, Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures saturés gazeux tel que : le méthane CH_4 , l'éthane C_2H_6 , le propane C_3H_8 et le butane C_4H_{10} , contenant aussi des hydrocarbures liquides comme le pentane C_5H_{12} , l'hexane C_6H_{14} et d'autres composants tels que l'oxyde de carbone, le dioxyde de carbone CO_2 , l'azote N_2 et l'hydrogène sulfuré H_2S .

En règle générale, le méthane est le principal constituant. Il représente environ 70 à 95% du volume total du mélange, et c'est pourquoi on emploie souvent le mot « méthane » pour désigner le gaz naturel lui-même. Les autres hydrocarbures gazeux sont beaucoup moins abondants ensemble, ils dépassent rarement 15 à 20% du mélange ; lorsque la teneur en éthane est élevée le gaz naturel devient très intéressant comme source d'éthylène pour l'industrie pétrochimique.

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 . Pour des raisons de sécurité, un parfum chimique nommé "le mercaptan" qui lui donne une odeur d'oeuf pourri, lui est souvent ajouté de sorte qu'une fuite de gaz puisse ainsi détectée.

2.2.3 Types de gaz naturel

Il existe plusieurs formes de gaz naturel, se distinguant par leur origine, composition et le type de réservoirs dans lesquels ils se trouvent. Par exemple :

- **Gaz conventionnel non associé** : C'est la forme la plus exploitée de gaz naturel. Son processus de formation est similaire à celui du pétrole.
- **Gaz associé** : Il s'agit de gaz présent en solution dans le pétrole. Il est séparé lors de l'extraction de ce dernier.
- **Gaz biogénique** : Le gaz biogénique est issu de la fermentation par des bactéries de sédiments organiques.
- **Gaz de charbon** : Le gaz de charbon contient naturellement du méthane et du CO_2 dans ses pores. Historiquement, ce gaz a surtout été connu pour la menace mortelle qu'il présentait sur la sécurité des mineurs, il est alors resté dans la mémoire collective sous le nom « grisou ».
- **Gaz de schiste** : Certains schistes contiennent aussi du méthane piégé dans leurs fissurations. Ce gaz est formé par la dégradation du kérogène présent dans le schiste.

2.2.4 La chaîne gazière

Le processus de production du gaz naturel est très simple et très proche de celui du pétrole. Le gaz naturel est tout d'abord extrait du sol ou des océans par forage, puis transporté par

gazoducs (sur terre) ou méthaniers (par mer) jusqu'à l'installation de traitement et de transformation pour être ensuite acheminé vers une zone de stockage. Le schéma suivant illustre les étapes de transformation du gaz naturel :

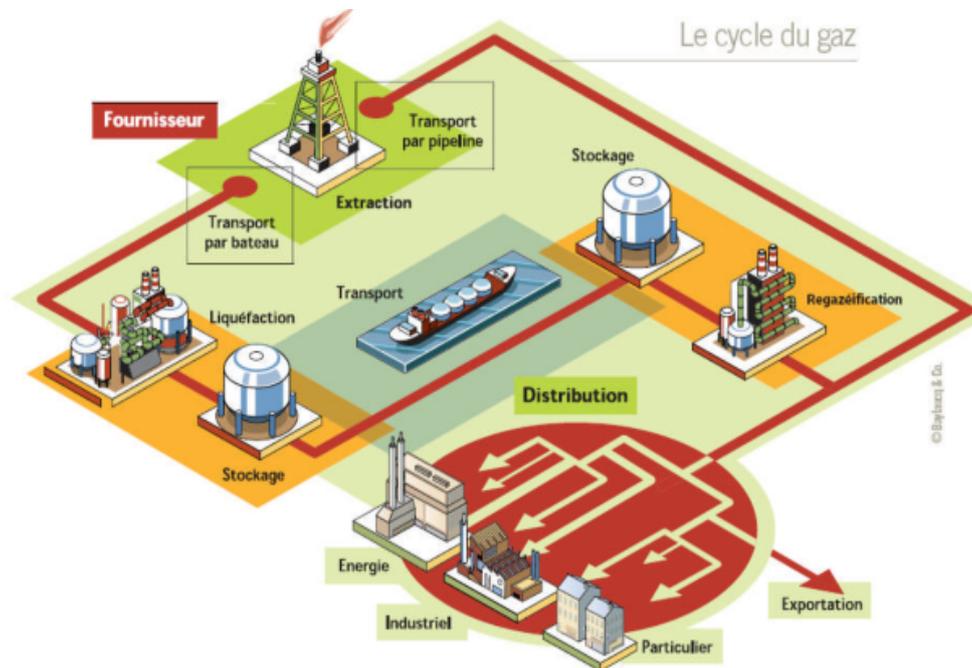


FIGURE 2.1 – Processus de transformation du gaz naturel

2.3 Composants des réseaux de transport par canalisation

Le transport du gaz naturel est difficile et coûteux. Néanmoins, étant donné que la demande mondiale s'accroît, les approvisionnements provenant de sources plus lointaines devront être acheminés sur des distances toujours plus grandes. Le réseau de transport du gaz se constitue de :

2.3.1 Stations d'injection ou de départ

Elles constituent les points d'entrée du réseau de transport. Suivant leur configuration et leur position géographique, ces stations peuvent être des stations d'atterrissage, des terminaux ou des stations d'entrée (gisement).

2.3.2 Les gazoducs

Un gazoduc est une canalisation destinée au transport des matières gazeuses sous pression, la plupart du temps des hydrocarbures, sur de longues distances. La majorité des gazoducs acheminent le gaz naturel entre les zones d'exploitation et les zones de consommation ou d'exportation. On estime la longueur totale des gazoducs dans le monde à un million de kilomètres, soit plus de 25 fois la circonférence terrestre.

Les gazoducs sont en général terrestres, soit enfouis à un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol dans les zones désertiques, ou en sol dur. Leurs diamètres varient entre 20 et 48 pouces pour les plus importants. Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoduc sous-marin.

Un gazoduc est un système étendu en longueur qui se compose d'un certain nombre de stations de compression dans le but de fournir l'énergie de pression nécessaire à l'écoulement du gaz. Une part non négligeable de la quantité de gaz transportée est prélevée pour la consommation propre du gazoduc.



FIGURE 2.2 – Gazoducs

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

- Les tronçons.
- La longueur.
- Le diamètre.

- Le produit qu’il transporte .
- Le nombre de stations de compression.
- La provenance et la destination.

Selon leur nature d’usage, les gazoducs peuvent être classés en trois familles principales :

1. **Gazoducs de collecte** : ramenant le gaz sorti des gisements ou des stockages souterrains vers des sites de traitement.
2. **Gazoduc de transport ou de transit** : Acheminant sous haute pression le gaz traité (déshydraté, désulfuré,...) aux portes des zones urbaines ou des sites industriels de consommation.
3. **Gazoduc de distribution** : Répartissant le gaz à basse pression au plus près des consommateurs domestiques ou des petites industries.

Les tubes utilisés actuellement pour la construction des gazoducs transportant du gaz naturel à longue distance, sont exclusivement fabriqués en acier à haute résistance ayant un grade élevé. L’emploi de ces aciers a permis de réduire l’épaisseur des tubes, qui sont obtenus par cintrage d’une tôle et soudure le long d’une génératrice, puis soudés entre eux et enfouis à une profondeur d’environ 1,5 mètre.



FIGURE 2.3 – Canalisation en acier

Les spécifications auxquelles doivent répondre les tubes d'aciers destinés au transport du pétrole et du gaz naturel sont fixées par la norme API mise au point par l'American Petroleum Institute en collaboration avec American Gas Association. La méthode de détermination des épaisseurs des tubes se fait en fonction de la pression maximale de service et de la nuance de l'acier.

Cependant, l'acier présente l'inconvénient d'être très sensible à la corrosion lorsqu'il est enterré dans le sol, donc son utilisation pour le transport des hydrocarbures, exige l'emploi de moyens efficaces pour le protéger contre l'agressivité des sols due à des phénomènes électrochimiques et bactériologiques liés à la teneur en eau et à la quantité de sels solubles contenus dans les sols.

Les moyens de protection utilisés contre la corrosion, peuvent être classés en deux catégories :

- **Moyens passifs** : peintures spéciales, revêtements isolants.
- **Moyens actifs** : protection cathodique.

2.3.3 Station de compression

Une station de compression est située en un point intermédiaire d'un gazoduc et est destinée à élever la pression du gaz dans la canalisation afin qu'il puisse atteindre la destination finale. Le gaz est comprimé par les compresseurs centrifuges entraînés par des turbines à gaz considérées comme étant très avantageuses du point de vue entretien.

Chaque station de compression contient des turbogénérateurs et des aéroréfrigérants qui sont des échangeurs de chaleur servant à abaisser la température du gaz à la sortie des compresseurs jusqu'à 60°C afin de prévenir la détérioration et le décollement du revêtement du gazoduc comme le montre la figure ci dessous :



FIGURE 2.4 – Station de Compression

2.3.4 Poste de sectionnement

Le rôle d'un poste de sectionnement est d'interrompre la circulation du gaz naturel dans les canalisations par l'intermédiaire d'un robinet et de permettre la décompression du gazoduc par un évent ou gas booster. Ce procédé innovant permet de limiter les rejets de méthane dans l'atmosphère et les indisponibilité pour les clients. Concrètement, un compresseur mobile aspire le gaz dans le tronçon à inspecter, puis le recomprime pour le réinjecter dans la canalisation en service. Le procédé gas booster peut également être mis en place sur les postes de coupure[?]. Ce type de poste est utilisé dans deux situations :

- Durant une opération de maintenance programmée, la fermeture de deux robinets de sectionnement successifs va entraîner la décompression du tronçon et va permettre aux exploitants d'effectuer les travaux en toute sécurité.
- En cas d'urgence sur la canalisation, la fermeture des robinets situés de part et d'autre du tronçon neutralisé va permettre de réduire la quantité de gaz naturel émise dans l'atmosphère.

la figure suivante illustre un poste de sectionnement :



FIGURE 2.5 – Poste de Sectionnement

2.3.5 Poste de Coupure

Afin d'entretenir les canalisations, il est nécessaire de les « nettoyer ». Les postes de coupure permettent d'introduire et de réceptionner les pistons (racleurs) de nettoyage et l'outil d'inspection. Le schéma ci-après illustre la configuration technique d'un poste de coupure :

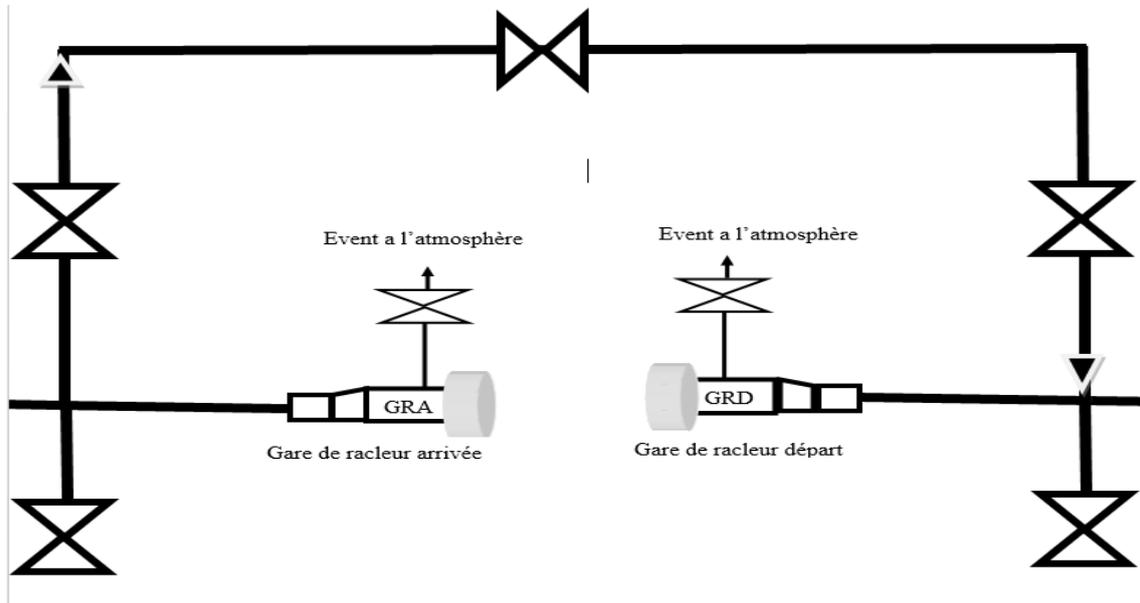


FIGURE 2.6 – Configuration technique de poste de coupure

Ces postes sont parfois utilisés en cas de travaux sur le réseau lorsqu'il est nécessaire d'isoler une partie des canalisations ou d'augmenter sa capacité. La figure suivante présente les travaux de raccordement d'une expansion (looping) sur la canalisation principale au niveau d'un poste de coupure afin d'augmenter sa capacité :



FIGURE 2.7 – Travaux de raccordement d'un looping

2.4 Formule d'écoulement du gaz

L'écoulement des gaz est différent de celui des liquides, car ils sont compressibles d'où incidence des frottements qui génèrent une perte de charge (diminution de la pression) progressive le long du parcours. Ils sont en outre plus sensibles à la température[36].

La formule générale d'écoulement s'écrit comme suit :

$$Q = \sqrt{\left(\frac{(P_i^2 - P_{i+1}^2) * D^5}{6000 * \lambda * d * Z * T_{moy} * L_i} \right)}$$

avec :

Q : Débit du gaz (Nm^3 par heure).

d : Densité relative du gaz.

Z : Facteur de compressibilité (sans unité).

T_{moy} : Température moyenne du gaz dans la conduite en kelvin ($K^\circ = 273,15 + C^\circ$).

λ : Coefficient de perte de charge.

P_i : Pression initiale dans le tronçon (i) (bar).

P_{i+1} : Pression terminale sur le tronçon (i) et initial sur le tronçon ($i + 1$) (bar).

D : Diamètre intérieur de la conduite (mm).

$$D = D_{ext} - 2.e$$

Où

D_{ext} : Diamètre extérieur du tube qui est donné (m) .

e : Épaisseur de la paroi du tube (m).

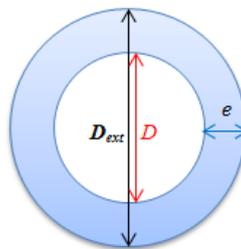


FIGURE 2.8 – Schéma d'un tube

L_i : Longueur du tronçon (km).

1. Le facteur de compressibilité

On dit qu'un fluide est compressible, si pour une quantité massique donnée de gaz qui occupe un volume donné V_1 , dans les conditions de pression et de température $(P_1; T_1)$, occupe un autre volume V_2 en changeant les conditions de $(P_1; T_1)$ à $(P_2; T_2)$. [36]

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. Le facteur Z est donné par :

$$Z = 1 - 0.4247 * \left(\frac{P_{moy}}{P_{cr}} \right) * \left(\frac{T_{moy}}{T_{cr}} \right)^{-3.668}$$

avec :

P_{cr} : Pression critique (bar).

T_{cr} : Température critique en kelvin ($K^\circ = 273.15 + C^\circ$).

T_{moy} : Température moyenne en kelvin ($K^\circ = 273.15 + C^\circ$).

P_{moy} : Pression moyenne donnée par :

$$P_{moy} = \frac{2}{3} * \frac{P_i + P_{i+1}^2}{(P_i + P_{i+1})}$$

2. Coefficient de perte de charge

Le coefficient de perte de charge (résistance hydraulique) établi par Darcy est calculé de la même manière que pour les liquides. Le calcul du coefficient de perte de charge peut se faire par l'intermédiaire de la formule suivante : [36]

$$\lambda = 0.067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2.Rug}{D} \right)^{0.2}$$

$$\lambda(\text{corrigée}) = 1.05 * \frac{\lambda}{I^2}$$

avec :

Re : Nombre de Reynolds (sans unité).

Rug : La Rugosité de la conduite avec $Rug = 0,00003 \text{ m}$.

I : Coefficient d'efficacité avec $I = 0.92$.

3. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est un paramètre important pour caractériser le type de mouvement des fluides circulant dans un gazoduc, il dépend du débit Q , de diamètre intérieur du gazoduc et de la densité et peut être calculé par la relation : [36]

$$Re = \frac{0.4344 * Q * d}{D * 0.01249}.$$

Q : Débit du gaz (m^3 par heure).

D : Diamètre intérieur de la conduite (m).

d : Densité relative du gaz.

2.5 Formule de chute de pression (perte de charge)

Tout fluide circulant dans une conduite perd de sa pression initiale (de sa charge), cette perte est due aux frottements contre les parois de la conduite et aux variations d'altitudes.

A partir de l'équation générale d'écoulement, on déduit l'équation de perte de charge :

$$P_i^2 - P_{i+1}^2 = \frac{Q^2 * 6000 * \lambda * d * Z * T_{moy} * L_i}{D^5}.$$

P_i : Pression initiale dans le tronçon (bar).

P_{i+1} : Pression terminale sur le tronçon (bar).

d : Densité relative du gaz.

Z : Facteur de compressibilité (sans unité).

T_{moy} : Température moyenne du gaz dans la conduite.

λ : Coefficient de perte de charge.

D : Diamètre intérieur de la conduite (mm).

L_i : Longueur du tronçon .

Conclusion

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

Chapitre 3

PROBLÉMATIQUE ET MODÉLISATION

Introduction

En date du 26 Octobre 2011, SONATRACH a obtenu le titre de concession du **S**ystème de **T**ransport par **C**analisation (STC) Gaz Naturel GR5 reliant Reggane et Hassi R'mel. Le STC GR5 assure l'évacuation vers Hassi R'mel de la production de gaz naturel issue des champs exploités par SONATRACH, seule et en association, situés dans la région du Sud-Ouest de Hassi R'mel. Les gisements à l'origine de l'octroi de la concession du STC GR5 sont : Timimoun, Reggane Nord et Touat.

La configuration technique de ce système, qui permet d'évacuer 8.80 milliards Sm^3 par ans (sans la station de krachba) et 12.4 milliards Sm^3 par ans avec la station de krachba, se présente comme suit :

- Une (01) canalisation de 765 Km en 48 pouce entre le Terminal Départ (TD) de Reggane (PK0) et la station de compression de Hassi R'mel.
- Deux (02) Stations de Compression localisées à Krachba et à Hassi R'mel.
- Une (01) canalisation de 05 Km en 56 pouce qui relie la Station de Compression de Hassi R'mel au Centre National de Dispatching Gaz (CNDG).
- Deux (02) canalisations de 05 Km chacune en 42 pouce qui assurent l'interconnexion, au niveau de Hassi R'mel de la station de compression du STC GR5 avec la station de compression du gazoduc GR4.
- Une base de vie à Hassi R'mel.

3.1 Position du Problème

Selon le Profil de production à Moyen Terme(PMT) 2016-2020, l'évacuation des quantités additionnelles en gaz naturel issues de nouveaux gisements : Hassi Ba Hamou, Hassi Mouina, Ahnet, Akabli et Tidikelt sud, **nécessitera une expansion du STC GR5**.

L'expansion signifie l'identification de la section existante de pipeline à renforcer et à soulager techniquement. Trois variantes sont envisageables :

- L'expansion du STC GR5 avec la solution Looping seul (développement de pipeline) sans Station de Compression.
- L'expansion du STC GR5 avec la solution station de compression.
- L'expansion du STC GR5 avec la solution Mixte (Loop + Station de Compression).

La présente étude traitera l'expansion du STC GR5 selon la variante looping. Concrètement, il s'agit de procéder comme suit :

- Identifier les sections de canalisations à renforcer .
- Déterminer les diamètres des loopings et leurs épaisseurs selon les zones traversées de manière à maintenir la pression et évacuer l'excédant (les quantités additionnelles) du gaz naturel tout en minimisant les coûts d'investissement y afférents.

Pour chaque section à dédoubler, un coût lui est associé. Celui-ci est en fonction de :

- Coût d'acquisition des tubes en acier.
- Coût de la pose (construction).

Les contraintes sont :

- La valeur de diamètre a choisir parmi un ensemble fini d'entier comprenant (0, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 46, 48) pouces.
- La valeur d'épaisseur a choisir parmi un ensemble fini de réel appartient à la liste des épaisseurs commerciaux selon les zones traversées.
- Equation de chute de pression sur le pipeline.
- Pressions minimales et limites maximales.
- Limitation sur le débit.

La difficulté du problème réside dans :

- La nature discrète de l'ensemble des diamètres et des épaisseurs.
- La fonction coût associée.
- La non-linéarité des équations de perte de pression.

3.2 Descriptif et Consistance du STC GR5 Reggane-Hassi R'mel

3.2.1 Description du STC GR5

Le tracé du gazoduc GR5 a été effectuée sur la partie sud (Reggane – Krechba) et ce, suite à une série de missions de reconnaissance effectuées par les services de SONATRACH qui ont permis d'identifier un couloir ayant des avantages certains sur les plans relief (contourner certaines zones rocheuses. La figure suivante illustre la situation Géographique du gazoduc GR5 :

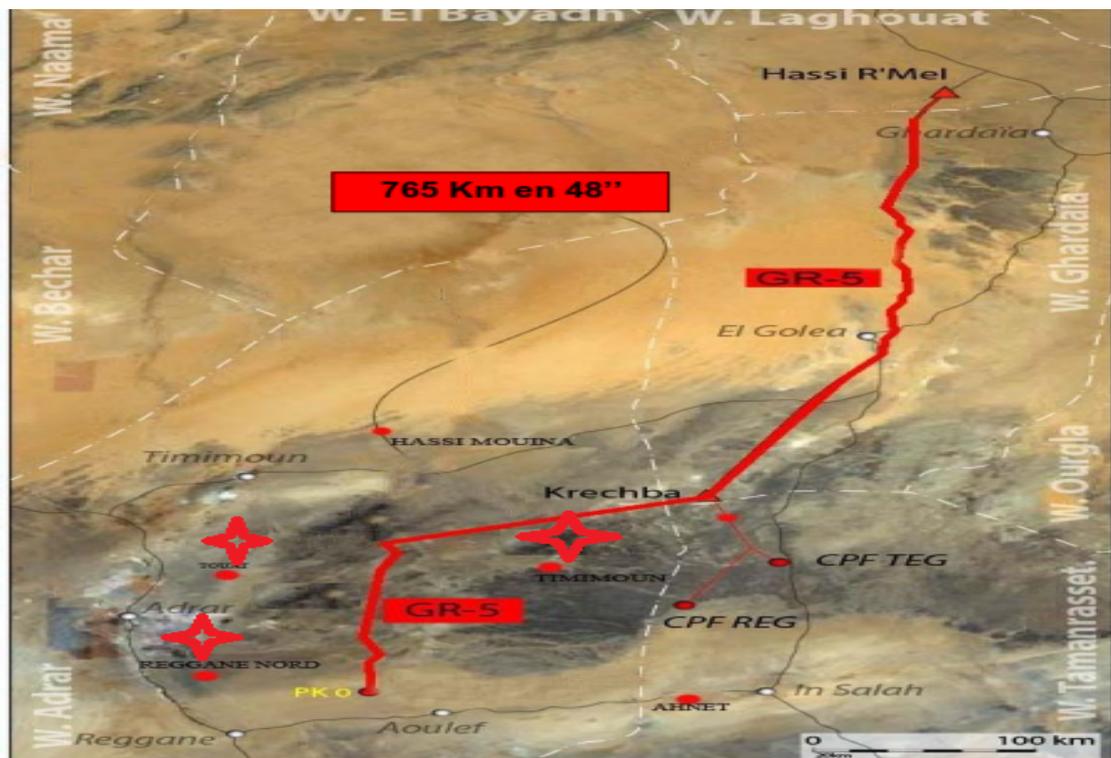


FIGURE 3.1 – Situation Géographique du gazoduc GR5

3.2.2 Consistance du STC GR5

Les Caractéristiques de la ligne GR5

Le tableau suivant représente les caractéristique de la canalisation GR5

Longueure (km)	770	Facteur de marche(par jour)	310
Diamètre (pouce)	765 km en 48" 05 km en 56"	Pression Maximale de Service (bar)	70
Epaisseurs minimale du tube (mm)	12.48/13.61/20.79 24.26	Pression Minimal (bar)	45
Nuance d'acier	API 5L X70 PSL2 Welded	Date prévisionnelle de mise en service	juin 2017
Rugosité du tube (mm)	0.015	Constructeur	Consider

TABLE 3.1 – Caractéristique de la ligne GR5

En sus de la canalisation, le STC GR5 possède huit (08) postes de coupures (PC), deux (02) stations de compressions et (28) postes de sectionnement, dans la suite nous allons donné la position géographique de chaque composante :

1. les Postes De Coupure

Le tableau suivant montre le point kilométrique, l'altitude et la localisation géographique des postes de coupure [47] :

Station/poste de coupure	PK/ Altitude(m)	Localisation	
		Nom	Wilaya
TD-Reggane	0/305	Reggane	ADRAR
Poste de Coupure n°1	75/416	-	
Poste de Coupure n°2	176/410.5	-	
SC Krachba (Poste de Coupure n°3)	310/429	Krachba	GHARDAIA
Poste de Coupure n°4	419/425	Hassi El Gara	
Poste de Coupure n°5	533+500/458	El Golea	
Poste de Coupure n°6	650/538	Mansouarh	
SC Hassi R'mel (Poste de Coupure n°7)	764+500/763	Hassi R'mel	LAGHOUAT
TA-Hassi R'mel	769+500/762	CNDG	

TABLE 3.2 – Localisation géographique des Postes de Coupure

2. Les Stations De Compression

Les stations de compression sont localisés aux postes de coupure N°03 et N°07 comme le montre la figure suivante :

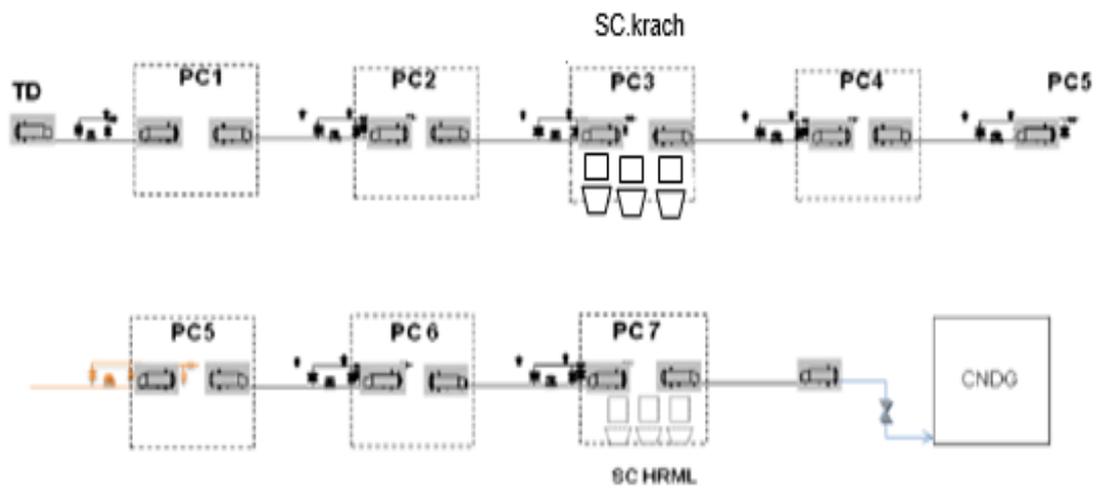


FIGURE 3.2 – Schéma d'équipements du STC GR5

3. Postes de Sectionnement

Le règlement exige de placer un poste de sectionnement chaque 20 à 40km. Le tableau suivant montre la localisation géographique des postes de sectionnement du STC GR5[47] :

Poste de Sectionnement	PK(km)	Altitude(m)	Localisation (Commune/Wilaya)
Poste de sectionnement n°1	20	337.3	ADRAR
Poste de sectionnement n°2	39+500	335	
Poste de sectionnement n°3	58	352	
Poste de sectionnement n°4	95	405	
Poste de sectionnement n°5	115	406	
Poste de sectionnement n°6	135	413	
Poste de sectionnement n°7	156	424	
Poste de sectionnement n°8	198	411	
Poste de sectionnement n°9	220	443	
Poste de sectionnement n°10	242+500	444	
Poste de sectionnement n°11	264+500	426	
Poste de sectionnement n°12	287	444	
Poste de sectionnement n°13	330	444	
Poste de sectionnement n°14	352	430	
Poste de sectionnement n°15	375	465	
Poste de sectionnement n°16	397	460	
Poste de sectionnement n°17	441	423	
Poste de sectionnement n°18	464	387	El Golea /GHARDAIA
Poste de sectionnement n°19	487	409	
Poste de sectionnement n°20	510	453	
Poste de sectionnement n°21	557	520	
Poste de sectionnement n°22	579	540	
Poste de sectionnement n°23	602	626	
Poste de sectionnement n°24	626	511	
Poste de sectionnement n°25	672	676	
Poste de sectionnement n°26	695	679	Metlili/GHARDAIA
Poste de sectionnement n°27	718	720	Dayat Bendaoua/GHARDAIA
Poste de sectionnement n°28	742	750	

TABLE 3.3 – Localisation géographique des Postes de Sectionnement

Le schéma suivant résume les composants de gazoduc GR5 y compris les point kilométrique de chaque équipements :

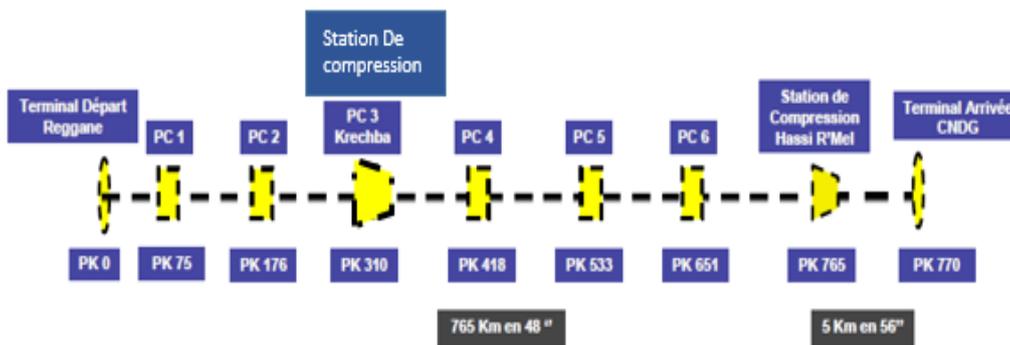


FIGURE 3.3 – Schéma Descriptif du STC GR5

3.3 Situation Géographique des Gisements

La carte ci-dessous illustre les délimitations et la situation des gisements découverts dans le sud-ouest algérien comme Hassi Mouina, Hassi Ba Hamou, Ahnet, Akabli et Tidikelt sud.

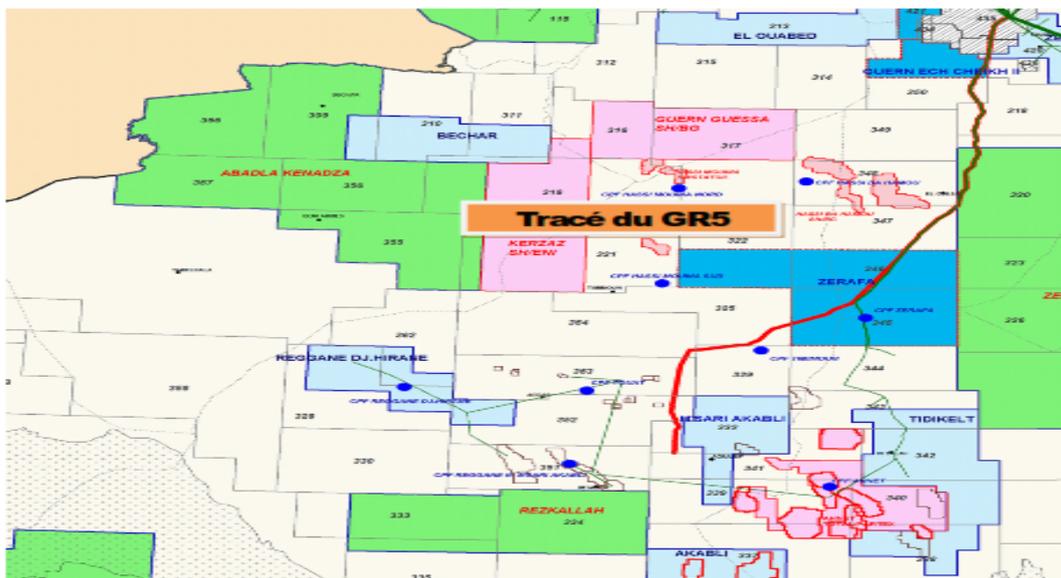


FIGURE 3.4 – Situation Géographique des Gisements

3.4 Profils prévisionnels de gaz de vente du Sud-Ouest

Ci-après, le profil prévisionnel de gaz de vente à moyen termes 2016-2020 des gisements du Sud-Ouest pris en compte dans l'élaboration des simulations des différentes configurations du développement du STC GR5 à l'horizon de 2020 :

	Unité :10 ⁶ Sm ³				
Gisements/Champs	2016	2017	2018	2019	2020
SONATRACH en Association					
TIMIMOUN	-	129	1552	1514	1514
TOUAT GAZ	-	2629	4506	4506	4506
REGGANE NORD	-	1640	2810	2810	2810
SONATRACH en Effort Propre					
HASSI BAHAMOU	-	-	-	1326	1768
HASSI MOUINA	-	-	-	1657	2209
AHNET	-	-	-	1395	5455
AKABLI	-	-	-	-	1086
TIDIKELT SUD	-	-	-	-	1818
TOTAL		4398	8868	13208	21166

TABLE 3.4 – Profils prévisionnels de gaz de vente du sud-ouest

Les simulations hydrauliques ont confirmé la nécessité d'une expansion du STC GR5 (la demande à moyen terme dépasse la capacité de GR5 : $12.4 < 21.166$); la finalité de cette expansion est de prendre en charge les volumes de gaz naturel issus des nouveaux gisements : Hassi Mouina, Hassi Ba Hamou, Ahnet, Akabli et Tidikelt sud. Pour lever ce déficit et afin de répondre à la demande à moyen terme du transport, plusieurs données doivent être prise en compte, à savoir :

- Le tracé du STC, profils altimétrique (points kilométriques et altitudes).
- Les débits d'injections des différents gisements.
- Les paramètres d'exploitation (PMS, Pression à l'aspiration et au refoulement, Température) de la ligne et de la station de compression.
- La composition moyenne du gaz naturel transporté.
- Les caractéristiques du tube (diamètre, rugosité, épaisseur).
- Les caractéristiques de la Station de Compression.

3.4.1 Caractéristiques des Points d'Injections de gaz naturel

Les coordonnées des différents points d'injection des gisements sur le STC GR5 sont comme suit :

gisement	PK	Ouvrage Concentré	PK(km)
Ahnet	TD	0	305
Reggane Nord			
Tidikelt Sud			
Akabli			
Touat	PS 04	95	405
Timimoun	PS 08	198	411
Hassi Mouina	PC 04	419	425
Hassi Ba Hamou	PC 05	534	538

TABLE 3.5 – Les coordonnées des différents points d'injection

3.4.2 Spécification du Fluide

Les spécifications de la qualité du gaz sec de certains gisements sont comme suit :

		Touat	Timimoun	Reggane Nord	Hassi Mounia	Hassi Ba Hamou	Spéc. TRC	
							Min	Max
Composition molaire (%mole)	Azot	0.03	2.07	0.38	0.261	3.08	0.37	5.50
	Gaz carbonique	2.00	1.57	1.74	2.00	0.03	/	2.00
	Méthane	90.02	87.58	96.06	95.49	88.18	83.80	98.00
	Ethane	3.85	6.76	1.57	1.97	5.87	0.5	10.70
	Propane	1.05	1.38	0.20	0.22	1.77	0.01	2.00
	i-Butane	0.14	0.19	0.02	0.02	0.27	0.01	1.00
	n-Butane	0.20	0.21	0.02	0.02	0.47	0.01	1.00
	i-Pentane	0.08	0.10	0.01	0.01	0.11	0.00	0.04
	n-Pentane	0.05	0.03	/	0.00	0.12	0.00	0.04
Hexane et plus	0.09	0.09	/	0.00	0.09	0.00	0.00	

TABLE 3.6 – Les spécifications de la qualité de gaz des gisements

3.5 Hypothèses de base retenues

3.5.1 Hypothèses sur les régimes de pression

1. La Pression Maximale de Service (PMS) de la canalisation de transport de gaz GR5 est fixée à 70 bar,
2. La pression d'injection sur la ligne principale GR5 est de 70 bar.

3.5.2 Hypothèses sur les calculs thermiques

Les profils de température des produits transportés sont calculés en prenant en compte les pertes par conduction et convection :

1. Convection forcée interne entre le fluide et la paroi.
2. Conduction à travers les différentes couches de la paroi de la canalisation.
3. Conduction externe à travers le sol.
4. Le refroidissement dû à la détente (Effet de joule-Thomson) est également pris en compte dans les simulations.
5. La température du gaz aux points d'injection sur le GR5 est égale à 40°C .
6. La température maximale du gaz à la sortie de la station de compression est fixée à 60°C après refroidissement .
7. La conductivité thermique moyenne du sol est égale à $0,3W.m^{-1}.K^{-1}$.
8. L'étude hydraulique a été réalisée dans les conditions climatiques "Eté" considérées comme le cas le plus défavorable pour le transport des capacités sous-indiquées :
 - Température Ambiante : Eté.....45°.
 - Température du Sol : Eté.....25°.

3.5.3 Hypothèses sur les stations de compression

Afin d'approcher les paramètres de pression, température et de consommation de gaz carburant, les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

1. La perte de charge entre l'entrée de la Station de Compression et l'aspiration du compresseur égal à 0,5 bar.
2. La perte de charge entre le refoulement des compresseurs et la sortie de la Station de Compression égal à 1,5 bar.
3. La pression d'aspiration minimale de toutes les stations de compression est fixée à 45 bar.
4. La pression de refoulement des stations de compression sur la ligne principale (Krechba, Hassi R'Mel) est égale à 70 bar.

3.5.4 Hypothèse sur les postes de coupure

1. Une perte de charge estimée est égal à 0,3 bar pour chaque poste de coupure est considérée.

3.5.5 Hypothèse sur le facteur de marche

1. Aucune variation saisonnière n'est prise en compte. Le débit nominal est le volume de gaz annuel livré par chaque gisement divisé par un facteur de marche de 310 jours.

3.6 Modélisation du problème

La modélisation du problème comporte la modélisation de la ligne en tenant compte le fonctionnement des deux stations de compression Krachba et Hassi R'mel .

3.6.1 Définition des données

Les données pour notre problème sont présentées de la manière suivante :

P_i : Pression entrante dans le tronçon (i).

P_{i+1} : Pression sortante du tronçon (i) et entrante dans le tronçon ($i + 1$).

Q_i : Débits entrant dans le tronçon (i).

L_i : Longueur du tronçon (i).

λ_i : Coefficient de perte de charge du tronçon (i).

Z_i : Facteur de compressibilité du tronçon (i).

T_{moy_i} : Température moyenne du tronçon (i).

d : Densité relative du gaz.

D : Diamètre extérieur du tronçon existant.

N : Nombre de tronçons dans la ligne.

3.6.2 Définition des Variables de décision

La variable de décision est le couple (x_i, e_i) tel que :

1. x_i : est le diamètre extérieur de l'expansion du tronçon existant (i) (diamètre de looping) :
 - $x_i \in \{0, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 46, 48\}; i = \overline{1, N}$.
2. e_i : est l'épaisseur du tronçon (i) commerciale correspond au diamètre choisi de looping selon la zone traversée :
 - $e_i \in \{T : \text{la table des épaisseurs commerciales}\} \dots 3.6.2$

Sachant que l'acier utilisé pour cet ouvrage est un acier au carbone de nuance X70 PSL2 M Welded selon la norme «Specification for Line Pipe API 5L 45ème Edition 2012 ». Les épaisseurs des canalisations seront calculées selon le « Règlement Algérien de Sécurité pour les Canalisations de Transport de Gaz Combustibles » et varient le long de la ligne selon les zones traversées : zone Ia, zone II et zone III.

Les emplacements où les ouvrages de transport de gaz visés au présent règlement sont susceptibles d'être installés sont classés en quatre (04) zones :

Zône I : Comprend : les zones urbaines à forte densité de population.

Zône Ia : Comprend :

- Les zones urbaines dont la densité de population à l'hectare de logement et de locaux correspondant à une occupation équivalente calculée sur la surface d'un Carré axé sur la canalisation de côté égale à 200 m est inférieur à 40.
- Les zones rurales ou désertiques pour lesquelles l'une au moins des trois conditions suivantes est remplie :
 1. Ils sont situés à moins de 75 m d'un établissement public ou assujettis aux règles relatives à la protection contre les risques d'incendie ou de panique ou d'un établissement rangé pour risques d'incendie ou d'explosions dans la première classe des établissements dangereux, insalubres ou incommodes, ou d'une installation de Défense Nationale présentant des risques d'incendie ou d'explosion.
 2. La densité à l'hectare déterminée comme ci-dessus est supérieur à 4.
 3. Ils se trouvent dans le domaine public national.

Zône II : Comprend les emplacements situés dans les zones rurales , les pâturages, les terres de culture, les forêts et les approches des agglomérations.

Zône III : Comprend les emplacements situés dans les régions désertiques.

Calcul des Epaisseurs :

Selon les normes imposées par le Règlement Algérien de Sécurité pour les Canalisations de Transport de Gaz Combustibles la formule suivante, appelée formule de Barlow, a été utilisée pour calculer l'épaisseur minimale $Ecal$, pour une pression donnée :

$$Ecal_i = \frac{P * x_i}{2 * \sigma_{ad}}$$

Avec :

$Ecal_i$: Epaisseur calculée de looping (mm).

x_i : Diamètre Extérieur de looping (mm).

P : Pression Maximale de Service PMS = 70 bar.

σ_{ad} : Contrainte admissible de l'acier (bar)

Calcul des contraintes admissibles :

$$\sigma_{ad} = \min(K_e * \sigma_e, K_r * \sigma_r)$$

Où :

$\sigma_e = 4850 \text{ bar}$: la contrainte élastique minimale de l'acier nuance API5L X70 PSL2.

$\sigma_r = 5700 \text{ bar}$: la contrainte de rupture minimale de l'acier nuance API5L X70 PSL2.

Ke et Kr : sont les coefficients de sécurité qui dépendent des zones traversées.

Zones	Ke	Kr
Zone Ia	0.60	0.36
Zone II	0.73	0.55
Zone III	0.80	0.60

TABLE 3.7 – Les coefficients de sécurité de chaque zones

Après avoir déterminer la zone de chaque tronçon et calculer l'épaisseur minimal, il reste de trouver l'épaisseur commerciale e_i tel que : $e_i \in \{T : \text{la table des épaisseurs commerciales}\}$ et $e_i \geq Ecal_i$. Le tableau suivant représente la table des épaisseurs commerciales :

Epaisseurs commerciales (mm)	Diamètre (pouce)= 20	22	24	26 et 28	30,32,34 et 36	38 et 40	42,44 46,et 48
1	4,78	4,78	5,54	6,35	6,35	7,92	8,74
2	5,56	5,56	6,35	7,14	7,14	8,74	9,53
3	6,35	6,35	7,14	7,92	7,92	9,53	10,31
4	7,14	7,14	7,92	8,74	8,74	10,31	11,13
5	7,92	7,92	8,74	9,53	9,53	11,13	11,91
6	8,74	8,74	9,53	10,31	10,31	11,91	12,7
7	9,53	9,53	10,31	11,13	11,13	12,7	14,27
8	10,31	10,31	11,13	11,91	11,91	14,27	15,88
9	11,13	11,13	11,91	12,7	12,7	15,88	17,48
10	11,91	11,91	12,7	14,27	14,27	17,48	19,05
11	12,7	12,7	14,27	15,88	15,88	19,05	20,62
12	14,27	14,27	15,88	17,48	17,48	20,62	22,23
13	15,09	15,88	17,48	19,05	19,05	22,23	23,83
14	15,88	17,48	19,05	20,62	20,62	23,83	25,4
15	17,48	19,05	20,62	22,23	22,23	25,4	26,97
16	19,05	20,62	22,23	23,83	23,83	26,97	28,58
17	20,62	22,23	23,83	25,4	25,4	28,58	30,18
18	22,23	23,83	24,61		26,97	30,18	31,75
19	23,83	25,4	25,4		28,58	31,75	
20	25,4	26,97	26,97		30,18		
21	26,19	28,58	28,58		31,75		
22	26,97	30,18	30,18				
23	28,58	31,75	30,96				
24	30,18	33,32	31,75				
25	31,75	34,93	33,32				
26	32,54	36,53	34,93				
27	33,32	38,1	36,53				
28	34,93	41,28	38,1				
29	38,1	47,63	38,89				
30	44,45	53,98	39,67				
31	50,01		46,02				
32			52,37				
33			59,54				

TABLE 3.8 – Table des épaisseurs commerciales

3.6.3 La fonction objectif

Notre objectif est de minimiser le coût d'investissement qui se compose de :

- **Coût d'acquisition du tube** : 1500\$ /Tonne.
- **Coût de la pose de la canalisation** : 16\$ /pouce/mètre.
- **Autre coût** :
- Protection cathodique : 1.5% du coût de tube.
- Les terminaux : 7% du coût de tube.
- Vannes et accessoires : 8.5% du coût de tube.
- Coût annuel d'entretien de la ligne : est estimé 1% du coût de tube.

Donc la fonction objectif va être égale à la somme des coûts envisagés pour chaque looping (tronçon ajouté). D'où :

$$\min(z) = ((1500 * 0.18) + 1500) \sum_{i=1}^n M_i + 16 \sum_{i=1}^n (x_i * L_i).$$

Avec :

$$M_i = \Pi * d * 10^{-6} * (x_i - e_i) * e_i * L_i.$$

On a :

M_i : la masse volumique du looping (i) en Tonne.

x_i : le diamètre extérieure du looping (i) en mm .

d : densité du tronçon $d = 7850kg/m^3$.

e_i : l'épaisseur du looping (i) en mm .

L_i : longueur du looping (i) en m .

3.6.4 Contraintes

- La pression d'injection au terminal de départ est fixé à 70 bar donc la pression initiale égale à 70 bar :

$$P_1 = 70.$$

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

$$P_{min} \leq P_i \leq P_{max} \quad i = \overline{1, N}.$$

- La pression de refoulement P_{i+1} d'une station de compression ($i, i+1$) est supérieure ou égale à la pression d'aspiration P_i de cette station. En effet, si la station de compression fonctionne alors $P_{i+1} > P_i$, sinon $P_{i+1} = P_i$.

Ce qui est présenté par la double contrainte suivante :

$$1 \leq \frac{P_{i+1}}{P_i} \leq \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad i = \overline{1, N}.$$

- Le coefficient de perte de charge λ_i de chaque tronçon est en fonction de diamètre et le nombre de Reynolds :

$$\lambda_i = 0.067 \left(\frac{158}{Re_i} + \frac{2.Rug}{(D + (x_i - 2 * e_i))} \right)^{0.2} \quad i = \overline{1, N}.$$

- Nombre de Reynolds Re_i de chaque tronçon est en fonction de débit et de diamètre :

$$Re_i = \frac{0.4344 * Q_i * d}{(D + (x_i - 2 * e_i)) * 0.01249} \quad i = \overline{1, N}.$$

- Une perte de charge estimée égale à 0,3 bar pour chaque poste de coupure est considérée :

$$P_{i+1} - 0.3 \quad i = \overline{1, N}.$$

- La pression sortante dans chaque tronçon doit être supérieur à 45 bar. D'après l'équation de chute de pression on a :

$$P_i^2 - P_{i+1}^2 = \frac{Q_i^2 * 6000 * \lambda_i * d * Z_i * Tmoy_i * L_i}{(D + (x_i - 2 * e_i))^5}.$$

On suppose que R_i est une constante qui dépend de paramètre du tronçon (i) tel que :

$$R_i = 6000 * \lambda_i * d * Z_i * Tmoy_i * L_i.$$

Donc l'équation de chute devient :

$$P_i^2 - P_{i+1}^2 = \frac{Q_i^2}{(D + (x_i - 2 * e_i))^5} * R_i. \quad (3.1)$$

D'après l'équation (3.1) on fait sortir la pression sortante P_{i+1} :

$$P_{i+1}^2 = P_i^2 - \frac{Q_i^2}{(D + (x_i - 2 * e_i))^5} * R_i \quad i = \overline{1, N}.$$

donc

$$P_i^2 - \frac{Q_i^2}{(D + (x_i - 2 * e_i))^5} * R_i \geq 45^2 \quad i = \overline{1, N}.$$

Alors on a :

- La première pression est égale à 70 bar (la pression d'injection au premier tronçon) :

$$P_1 \geq 45 \text{ bar.}$$

- P_2 doit être supérieure à 45 bar : $P_2 \geq 45 \Leftrightarrow P_1^2 - \frac{Q_1^2}{(D + (x_1 - 2 * e_1))^5} * R_1 \geq 45^2$.

- P_3 doit être supérieure à 45 bar : $P_3 \geq 45 \Leftrightarrow P_2^2 - \frac{Q_2^2}{(D+(x_2-2*e_2))^5} * R_2 \geq 45^2$.
- .
- .
- .
- P_{N+1} doit être supérieure à 45 bar : $P_{N+1} \geq 45 \Leftrightarrow P_N^2 - \frac{Q_N^2}{(D+(x_N-2*e_N))^5} * R_N \geq 45^2$.

Donc il s'agit de vérifier les N contraintes de chute de pression .

Remarque : Nous constatons que nous avons une relation de récurrence entre les pressions qui définit chaque terme à partir du précédent.

3.6.5 Le modèle mathématique

Le programme mathématique associé au problème est comme suit :

$$\begin{cases}
 \min(Z) = ((1500 * 0.18) + 1500) \sum_{i=1}^N M_i + 16 \sum_{i=1}^N (x_i * L_i). \\
 S.C \\
 P_1 = 70. \\
 P_{N+1} = 45. \\
 P_i \geq P_{min} & i = \overline{1, N}. \\
 P_i \leq P_{max} & i = \overline{1, N}. \\
 \frac{P_{i+1}}{P_i} \geq 1 \dots \dots \dots i = \overline{1, N}. \\
 \frac{P_{i+1}}{P_i} \leq \frac{P_{max}}{P_{min}} & i = \overline{1, N}. \\
 Ecal_i = \frac{P * x_i}{2 * \sigma_{ad}} & i = \overline{1, N}. \\
 e_i \geq Ecal_i & i = \overline{1, N}. \\
 (P_N) \left\{ \begin{array}{l}
 P_i^2 - \frac{Q_i^2}{(D+(x_i-2*e_i))^5} * R_i \geq 45^2 - 0.3 & i = \overline{1, N}. \\
 \lambda_i = 0.067 \left(\frac{158}{Re_i} + \frac{2.Rug}{(D + (x_i - 2 * e_i))} \right)^{0.2} & i = \overline{1, N}. \\
 Re_i = \frac{0.4344 * Q_i * d}{(D+(x_i-2*e_i))*0.01249} & i = \overline{1, N}. \\
 Z_i = 1 - 0.4247 * \left(\frac{P_{moy_i}}{P_{cr}} \right) * \left(\frac{T_{moy_i}}{T_{cr}} \right)^{-3.668} & i = \overline{1, N}. \\
 P_{moy_i} = \frac{2}{3} * \frac{P_i + P_{i+1}}{(P_i + P_{i+1})} & i = \overline{1, N}. \\
 \lambda(\text{corrigée})_i = 1.05 * \frac{\lambda_i}{T^2} & i = \overline{1, N}. \\
 R_i = 6000 * \lambda_i * d * Z_i * T_{moy_i} * L_i & i = \overline{1, N}. \\
 \\
 x_i \in \{0, 2, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 46, 48\} & i = \overline{1, N}. \\
 e_i \in \{T\} & i = \overline{1, N}.
 \end{array} \right.
 \end{cases}$$

La figure ci-dessous illustre le cas général où la conduite possède N tronçons :

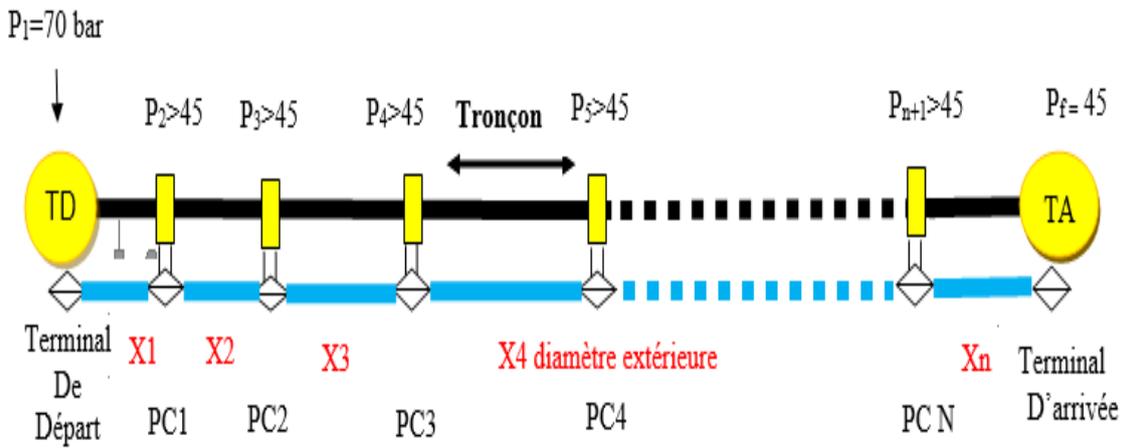


FIGURE 3.5 – Conduite de N tronçons

Conclusion

Nous constatons que ce modèle est non linéaire à variable discrètes. Dans la suite, nous nous intéresserons à la résolution du modèle (P_N) et la recherche de la méthode la plus adéquate pour le résoudre.

Chapitre 4

MÉTHODES DE RÉOLUTION

Introduction

Pour la résolution des problèmes d'optimisation non linéaires, en recherche opérationnelle, le choix de la méthode de résolution constitue une étape cruciale. Il existe deux grandes familles de méthodes de résolution :

- Les méthodes exactes (complètes) qui garantissent l'exactitude de la résolution.
- Les méthodes approchées (heuristiques et métaheuristiques incomplètes) qui perdent en complétude pour gagner en efficacité.

Dans la suite nous allons donner les notions de base sur l'optimisation et quelques méthodes existantes (des deux classes) pour la résolution de de problème non linéaire .

4.1 Notions de base sur l'optimisation

L'optimisation est une discipline mathématique à part entière, elle est présentée partout où il y a nécessité de rationaliser la conception d'un système ou l'exploitation d'un procédé qu'il soit industriel ou autre.

L'optimisation peut être définie comme :

- Une opération permettant de trouver la meilleure solution possible et imaginable ;
- Le choix parmi une série de possibilités, de la meilleure solution suivant un critère défini à l'avance.

Enfin, optimiser c'est toujours trouver les valeurs extrémales d'une fonction permettant de minimiser ou de maximiser cette dernière.

4.1.1 Modèles d'optimisation

Pour désigner le type de modèle, il suffit de déterminer la nature de la fonction objectif, les contraintes et les variables de décisions, le schéma suivant le montre bien :

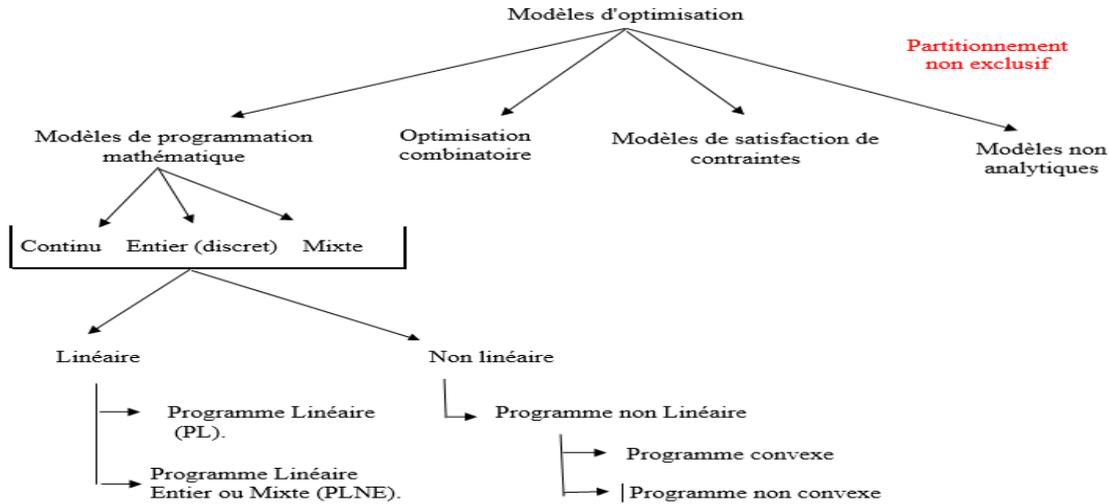


FIGURE 4.1 – Modèles d'optimisation

4.1.2 Programmation Mathématique

Un Programme Mathématique (mathematical program), noté PM est un problème d'optimisation sous contrainte (PM) qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$(PM) : \begin{cases} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{sous les contraintes} \\ g_i(x) \geq 0 \text{ ou } g_i(x) \leq 0 \quad i = \overline{1, m} \\ x \in S \end{cases}$$

où :

- S est une partie de \mathbb{R}^n et x est un vecteur appelé variable, ces "n" composantes sont dites les inconnues du problème.
- La fonction $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ est appelée fonction objectif.
- Les fonctions $g_i : S \rightarrow \mathbb{R}, i = \overline{1, m}$, forment des inégalités qui sont appelées les contraintes du problème.

On peut remarquer qu'un PM peut être une maximisation ou une minimisation (il suffit de poser la fonction $maximiser f(x) = -minimiser f(x)$) :

Un vecteur \bar{x} vérifiant les contraintes d'un PM est dit solution ou solution réalisable du PM. L'ensemble des solutions d'un PM forme un domaine de définition. Le domaine de définition d'un PM peut être : vide (dans ce cas, le problème n'admet pas de solutions), dans le cas contraire,

le PM admet des solutions. Sous certaines conditions, il peut exister des solutions x^* dites optimales, c'est-à-dire qui minimisent (maximisent) la fonction $f(x)$ sur toutes les solutions du PM.

Plusieurs cas de PM sont à mettre en évidence :

- Si l'ensemble S est continu, on parle de programme mathématique continu (continuous)
- Si l'ensemble S est discret (c'est-à-dire isomorphe à \mathbb{N}^n), on parle de programme mathématique discret (discrete) que l'on notera ici (PMD); on le dit également entier (integer program) si $S \subset \mathbb{N}^n$ ou même binaire si $S \subset \{0, 1\}^n$. En fait tout PMD peut se ramener au cas d'un programme entier, voir même d'un programme binaire.
- Si certaines composantes du vecteur solution x prennent leurs valeurs dans un ensemble discret et les autres dans un ensemble continu, on le dit programme mathématique mixte (Mixed Integer Program ou MIP).

Dans le cas des programmes entiers (donc discrets également), on peut noter alors un (PMD) de la façon suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{sous les contraintes} \\ g_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \\ x \in \mathbb{N}^n. \end{array} \right.$$

On désigne alors $x \in \mathbb{N}^n$ comme étant la contrainte d'intégrité.

On appelle relaxation le fait de 'relâcher', c'est-à-dire supprimer une contrainte du problème. Ainsi, un programme relaxé désignera un programme où l'on aura supprimé une ou plusieurs contraintes.

4.1.3 Programmation linéaire

La programmation linéaire (Dantzig and Cottle, 2003) s'intéresse à la maximisation ou à la minimisation d'une fonction objectif linéaire définie sur un ensemble fini de variables qui vérifient un nombre fini de demi-espaces. Les contraintes définies peuvent être écrites par des fonctions linéaires[23]. Un problème de programmation linéaire (PL) peut s'écrire comme suit :

$$(PL) : \left\{ \begin{array}{l} \min Z = c^T x. \\ \text{s.c} \quad Ax = b. \\ \quad \quad x \geq 0 \end{array} \right.$$

Où $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $c \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $b \in \mathbb{R}^{m \times 1}$, $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$. Un problème linéaire continu peut être résolu en temps polynomial (Khachiyan 1979). Il existe des algorithmes polynomiaux efficaces pour résoudre un programme linéaire comme ceux dits de points intérieurs initiés par Karmarkar

(1984). Néanmoins l'algorithme du simplexe (Dantzig 1947) est le plus célèbre (et le plus efficace dans le cas général) des algorithmes de résolution, bien qu'il ne soit pas polynomial !

4.1.4 Programmation non linéaire

On parle de modèle d'optimisation non linéaire lorsque l'on doit maximiser ou minimiser une fonction sous contraintes et que cette fonction objectif, ou au moins une contrainte est non linéaire.

Un problème d'optimisation non linéaire peut s'écrire sous de nombreuses formes équivalentes parmi lesquelles nous citons la formulation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{S.C. } g(x) = 0 \\ h(x) \geq 0 \\ x \in \mathbb{R}^n. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

où $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ et $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ sont des fonctions suffisamment régulières.

4.1.5 Comment juger la difficulté d'un problème ?

La complexité en temps est le temps d'exécution d'un algorithme en fonction de la taille du problème. On utilise souvent la notation 'big-O' : $O(\dots)$ pour noter la complexité d'un algorithme.

- Un algorithme est dit polynomial en temps si et seulement si sa complexité en temps est bornée par un polynôme $p(n)$, ie. $f(n) = O(p(n))$.
- Un algorithme est dit exponentiel si sa complexité en temps ne peut pas être bornée par un polynôme, ie. $f(n) = a^n$ avec $a > 1$ une constante.

L'esprit humain a du mal à appréhender ce qu'est une croissance exponentielle. Le tableau suivant illustre ces croissances, par rapport à des croissances polynomiales.

Complexité	taille=10	20	30	40	50
$O(n)$	0.00001 s	0.00002 s	0.00003 s	0.00004 s	0.00005 s
$O(n^2)$	0.0001 s	0.0004 s	0.0009 s	0.0016 s	0.0025 s
$O(n^5)$	0.1 s	0.32 s	24.3 s	1.7 min	5.2 min
$O(2^n)$	0.001 s	1.0 s	17.9 min	12.7 ans	35.7 ans
$O(3^n)$	0.059 s	58.0 min	6.5 ans	3855 siècles	$2 * 10^8$ siècles

TABLE 4.1 – Croissance exponentielle et polynômial

la figure suivante montre bien la croissance exponentielle et polynômial :

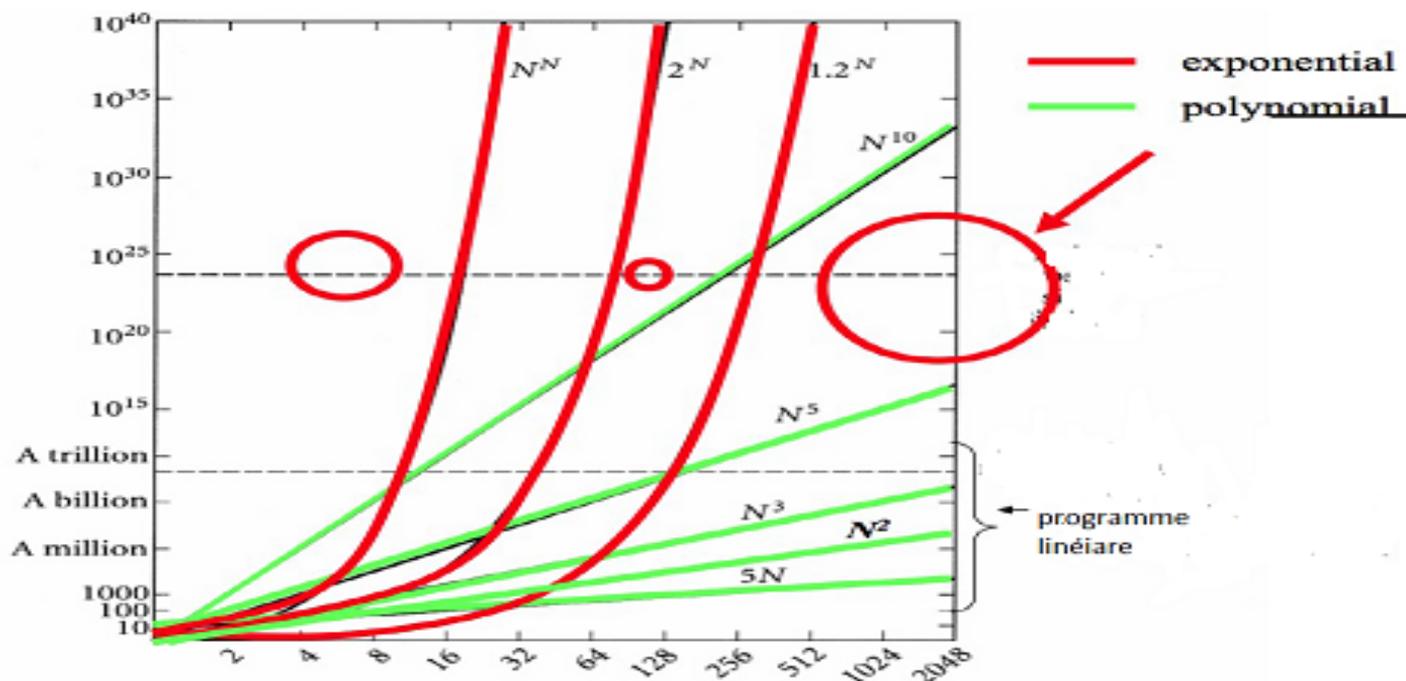


FIGURE 4.2 – Croissance exponentielle et polynômial

Ces calculs montrent qu'il est faux de croire qu'un ordinateur peut résoudre tous les problèmes est telle que l'augmentation de la puissance des ordinateurs ne change pas fondamentalement la situation. En particulier, il faut se méfier des méthodes énumératives, consistant à examiner tous les cas possibles, puisqu'elles conduisent à des algorithmes exponentiels.

4.1.6 Les classes de problèmes

On distingue trois classes de problèmes :

- **Classe P** : contient les problèmes de décision pour lesquels on connaît des algorithmes polynômiaux.
- **Classe NP** : contient les problèmes de décision qui peuvent être décidés sur une machine non déterministe en temps polynomial. C'est la classe des problèmes qui admettent un algorithme polynomial capable de tester la validité d'une solution du problème.
- **NP-complet** : parmi l'ensemble des problèmes appartenant à NP, il en existe un sous ensemble qui contient les problèmes les plus difficiles : on les appelle les problèmes NP-complets. Un problème NP-complet possède la propriété que tout problème dans NP peut être transformé (réduit) en celui-ci en temps polynomial. C'est à dire qu'un problème est NP-complet quand tous les problèmes appartenant à NP lui sont réductibles. Si on trouve un algorithme polynomial pour un problème NP-complet, on trouve alors automatiquement une résolution polynomiale de tous les problèmes de la classe NP.

Le schéma suivant résume bien les classes de problèmes :

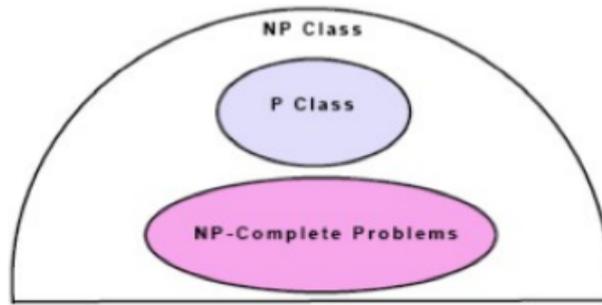


FIGURE 4.3 – Classes des problèmes

Pour la résolution des problèmes non linéaire, il existe deux grande familles de résolution en recherche opérationnelle, la figure suivante le montre bien :

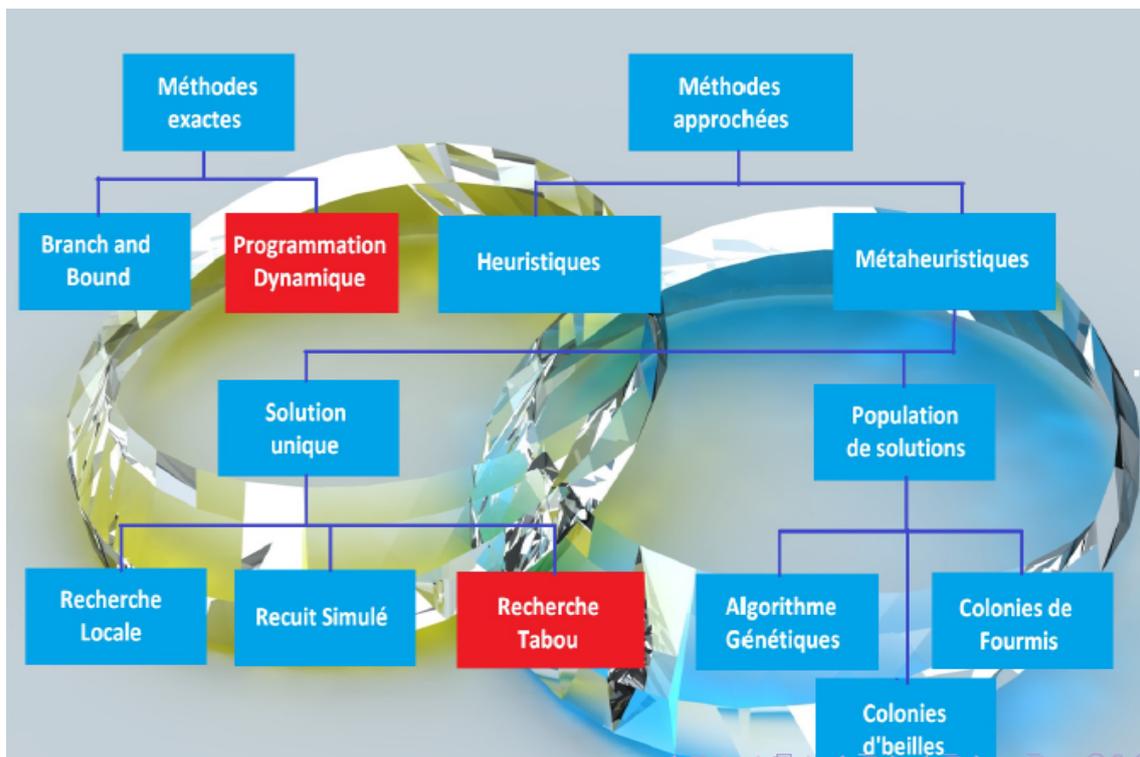


FIGURE 4.4 – Méthodes de résolution

4.2 État de l'art sur les méthodes exactes

Le développement de nouvelles méthodes fiables et efficaces pour la résolution des problèmes d'optimisation non linéaire a suscité beaucoup d'intérêt depuis les années 40. Ceci est principalement motivé par ses applications très variées dans de nombreuses disciplines telles

que l'aéronautique, le commerce, l'ingénierie, la physique...etc. Des dizaines de livres et centaines d'articles ont été publiés. Pendant les deux dernières décennies et avec le développement des puissances de calcul, plusieurs solveurs d'optimisation non linéaire ont vu le jour. Dans la section suivante, nous allons donner quelques méthodes de cette dernière.

4.2.1 Méthode de pénalisation quadratique

Les méthodes de pénalisation sont parmi les premières méthodes proposées pour la résolution des problèmes d'optimisation avec contraintes d'égalité (P_E) :

$$P_E : \begin{cases} \text{Minimiser } f(x) \\ \text{S.C. } g(x) = 0 \\ x \in \mathbb{R}^n. \end{cases}$$

Cette approche consiste à remplacer le problème original par une suite de problèmes sans contrainte dont la fonction objectif est une combinaison de la fonction f et d'une fonction mesurant la violation des contraintes. Un exemple populaire qui est la méthode de pénalisation quadratique consistant à résoudre une suite de problèmes de la forme :

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \varphi(x) := f(x) + \frac{1}{2 * \sigma} \|g(x)\|^2 \quad (4.2)$$

où ($\sigma > 0$) est le paramètre de pénalisation. Cette méthode a été proposée pour la première fois en 1943 par Courant [14]. Sous des conditions standards, Fiacco et McCormick [19] ont montré que la suite des minima du problème (4.2) converge vers une solution du problème initial lorsque $\sigma \rightarrow 0$. Afin d'obtenir une convergence rapide dans la résolution du problème (4.2), la méthode de Newton doit être utilisée. La direction de Newton à un point (x) est la solution du système linéaire :

$$\nabla^2 \varphi_\sigma(x) d^x = -\nabla \varphi_\sigma(x), \quad (4.3)$$

où la matrice $\nabla^2 \varphi_\sigma(x)$ est donnée par :

$$\nabla^2 \varphi_\sigma(x) = \nabla^2 f(x) + \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^m g_i(x) \nabla^2 g_i(x) + \frac{1}{\sigma} \nabla g(x) \nabla g(x)^T.$$

Lootsma [35] et Murray [37] ont montré que cette matrice devient de plus en plus malconditionnée lorsque σ devient petit ce qui entraîne des difficultés numériques en résolvant le système linéaire (4.3). Pour faire face à cet inconvénient, des solutions ont été proposées par Broyden et Attia [10], Coleman et Hempel [13] et Gould [28].

Au lieu de résoudre le système de Newton (4.3), ils proposent de le reformuler en introduisant une variable auxiliaire :

$$y = \frac{1}{\sigma} \nabla g(x)^T d^x.$$

Ceci donne un nouveau système augmenté de la forme :

$$\begin{pmatrix} \nabla^2 f(x) + \frac{1}{\sigma} \sum_{i=1}^m g_i(x) \nabla^2 g_i(x) & \nabla g(x) \\ \nabla g(x)^T & -\sigma I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\nabla \varphi_\sigma(x) \\ 0 \end{pmatrix}$$

Dont le conditionnement reste borné lorsque x est proche de la solution et la valeur de σ est suffisamment petite.

4.2.2 Méthode de lagrangien augmenté

La méthode de lagrangien augmenté, encore connue sous le nom de la méthode des multiplicateurs, a été proposée en 1969 indépendamment par Hestenes [29] et Powell [40] essentiellement pour résoudre les problèmes d'optimisation avec contraintes d'égalité et faire face aux difficultés dues au mauvais conditionnement associé à la méthode de pénalisation quadratique. Au début des années 70, Rockafellar [41][42] et Buys[12] ont étendu le lagrangien augmenté au cas des problèmes d'optimisation avec contraintes d'inégalité.

Le lagrangien augmenté associé au problème P_E est défini par :

$$\psi_{\lambda,\sigma}(x) := f(x) + \lambda^T g(x) + \frac{1}{2\sigma} \|g(x)\|^2, \quad (4.4)$$

où $\sigma > 0$ est le paramètre de pénalisation et λ est une estimation du multiplicateur de Lagrange. La méthode de lagrangien augmenté consiste à résoudre, exactement ou approximativement, une suite de problèmes de minimisation sans contrainte de la forme :

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \psi_{\lambda,\sigma}(x). \quad (4.5)$$

Après chaque minimisation, le paramètre de pénalisation et le multiplicateur de Lagrange sont mis à jour en fonction de la réalisabilité des contraintes. Si la violation des contraintes est inférieure à une valeur cible, alors σ est maintenu fixe et une nouvelle valeur du multiplicateur de Lagrange λ_+ est calculée par la formule suivante :

$$\lambda_+ = \lambda + \frac{g(x)}{\sigma},$$

où x est la solution de (4.5). Sinon, σ est diminué suffisamment et λ_+ est maintenu constant afin d'éviter une mauvaise estimation du multiplicateur de Lagrange. Une autre méthode de

mise à jour du multiplicateur de Lagrange consiste à le traiter comme une fonction en x plutôt que comme une variable séparée. Une estimation du multiplicateur de Lagrange $\lambda(x)$ est définie comme une solution du problème de minimisation suivant :

$$\lambda(x) \in \arg \min \frac{1}{2} \|\nabla f(x) + \nabla g(x)\lambda\|^2 \quad (4.6)$$

Les propriétés théoriques et pratiques de cette approche ont été analysées par Bertsekas [7], Boggs et Tolle [9], Di Pillo et Grippo [15], Fletcher [20] et Glad et Polak [25]. Les principaux inconvénients de cette approche sont le coût de résolution de (4.6) et le fait que $\lambda(x)$ n'est pas unique lorsque $\nabla g(x)$ n'est pas de plein rang.

L'avantage de la méthode de lagrangien augmenté par rapport à celle de pénalisation quadratique est que le processus de minimisation sans contrainte (4.5) converge sans la nécessité de conduire le paramètre de pénalisation vers zéro. En effet, si x est un minimum local du problème initial (P_E) et λ^* est le multiplicateur de Lagrange associé, alors x^* est un minimum local strict de $x \mapsto \psi_{\lambda^*, \sigma}$ pour tout σ suffisamment petit (voir par exemple [38]). Par conséquent, le mauvais conditionnement associé aux méthodes de pénalisation quadratique est évité.

4.2.3 Méthodes de points intérieurs

Les méthodes de points intérieurs ont initialement été proposées par Frisch [22] en 1955. L'idée générale de ces méthodes consiste à approcher d'une manière itérative la solution des problèmes d'optimisation avec contraintes d'inégalité (P_i) de la forme :

$$P_i : \begin{cases} \text{Minimiser } f(x) \\ h(x) \geq 0, \end{cases} \quad x \in \mathbb{R}^n.$$

à partir de l'intérieur de l'ensemble réalisable $x : h(x) > 0$. Ces méthodes sont basées sur les méthodes barrières. Dans la littérature, quelques exemples de fonctions barrières ont été proposés (par exemple la fonction inverse, la fonction quadratique inverse), mais la fonction barrière logarithmique, proposée par Frisch [22], reste l'exemple le plus répandu. La fonction barrière logarithmique associée au problème P_i est donnée par :

$$\beta_\mu := f(x) - \mu \sum_{i=1}^p \log(h_i(x)), \quad (4.7)$$

où $\mu > 0$ est le paramètre barrière. La méthode barrière logarithmique consiste à trouver une solution du problème (P_i) en résolvant une suite de problèmes sans contrainte :

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} \beta_\mu(x), \quad (4.8)$$

en conduisant le paramètre barrière vers zéro. Les conditions d'optimalité du premier ordre de ce problème sont données par :

$$\nabla f(x) - \sum_{i=1}^p \frac{\mu}{h_i(x)} \nabla h_i(x) = 0, \quad (4.9)$$

Une étude extensive de cette méthode a été établie par Fiacco et McCormick [19]. Ces derniers ont montré que si x^* est une solution du problème (P_i) et $x^*(\mu)$ est une solution du problème (4.8), alors sous des hypothèses standards, on a :

$$\lim_{\mu \rightarrow 0} x^* \text{ et } \lim_{\mu \rightarrow 0} \frac{\mu}{h_i(x^*(\mu))} = z^*,$$

où z^* est le multiplicateur de Lagrange optimal associé aux contraintes d'inégalité.

4.2.4 Méthode de programmation quadratique successive

La méthode de programmation quadratique successive (SQP) reste, sans doute, parmi les méthodes efficaces pour résoudre (P_i) . Cette méthode, proposée pour la première fois en 1963 dans la thèse de Wilson [49], consiste à minimiser successivement un modèle quadratique de la fonction objectif sujet à une linéarisation des contraintes autour de l'itéré actuel. Beaucoup de solveurs sont basés sur cette méthode. Parmi eux, nous citons FILTERSQP [21] et SNOPT [24].

4.2.5 Programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation procédant par énumération implicite des solutions. Bien que déjà pratiquée auparavant, elle est élevée au rang de méthode générale de résolution avec les travaux de Bellman[6, 5], qui formalise l'approche et la baptise. Cette approche permet de résoudre efficacement des problèmes de décision séquentiels en temps polynômial. Plus généralement, elle consiste à aborder des problèmes d'optimisation avec une stratégie consistant en deux points essentiels[17] :

- Décomposer le problème en une séquence de problèmes.
- Établir une relation de récurrence entre les solutions optimales des problèmes.

La programmation dynamique s'appuie sur un principe simple, appelé le principe d'optimalité de Bellman :

Le principe d'optimalité de Bellman

Toute solution optimale s'appuie elle-même sur des sous-problèmes résolus localement de façon optimale. Concrètement, cela signifie que l'on peut déduire la solution optimale d'un problème en combinant des solutions optimales d'une série de sous-problèmes. Les solutions des

problèmes sont calculées de manière ascendante, c'est-à-dire qu'on débute par les solutions des sous-problèmes les plus petits pour ensuite déduire progressivement les solutions de l'ensemble [5].

Soit f une fonction réelle de x et $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$. Si f est décomposable, sous la forme :

$$f(x, y) = f_1(x, f_2(y))$$

Alors, on a :

$$Opt_{x,y} f(x, y) = Opt_x f_1(x, Opt_y f_2(y))$$

où Opt représente Min ou Max.

Remarque : Le principe d'optimalité s'applique sous la même forme en présence de contraintes : $(x, y) \in \mathcal{U}, y \in \mathcal{U}_x$.

Equation de la programmation dynamique

Pour une séquence de décisions u_0 et u_1, \dots, u_T ; une séquence d'états x_0, x_1, \dots, x_T nous avons :

- **Une fonction de transition :** la transition entre l'état X_{k+1} à l'étape $k + 1$ dépend de l'état x_k et de décision u_k prise à l'étape k .

$$x_{k+1} = \theta_k(x_k, u_k)$$

- **Une fonction objectif séparable :** on définit pour chaque étape une fonction de coût optimal à venir (cas additif) :

$$F_k(x_k) = Opt_{u_k} \{f_k(x_k, u_k) + F_{k+1}(\theta_k(x_k, u_k))\}.$$

Les états successifs du système constituent une trajectoire. Le coût de la trajectoire est la somme des coûts ressentis à chaque étape. Il s'agit de trouver la trajectoire de coût minimum ou maximum.

Types de récurrence

1. **Récurrence avant :** Soit $\Phi(x_t)$ le coût d'une politique optimale entre l'état initial x_0 et l'état $x_k \in \Theta_k$ à l'étape k ; $k = 0; \dots; T$, avec Θ_k l'ensemble des états possibles à l'étape k (à chaque étape le système peut prendre un nombre fini d'états).

calcul de $\Phi(x_k)$:

$$\begin{cases} \Phi(x_k) = 0. \\ \Phi(x_k) = \min(F_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}) + \Phi(x_{k-1})); \{x_{k-1} \in \Theta_{k-1}, x_k = \theta_{k-1}(x_{k-1}, u_{k-1}), k = 1, \dots, T.\} \end{cases}$$

2. **Récurrance arrière** : Soit $\psi(x_k)$ le coût d'une politique optimale entre l'état $x_k \in X_k$ et l'état final x_T à l'étape k . Calcul de $\psi(x_k)$:

$$\begin{cases} \psi(x_T) = 0. \\ \psi(x_k) = \min(F_k(x_k, u_k) + \psi(x_{k+1})); \{x_{k+1} \in \Theta_{k+1}, x_{k+1} = \theta_k(x_k, u_k)\} \end{cases} .$$

On peut alors procéder récursivement à partir de la période terminale T (Procédure en arrière) :

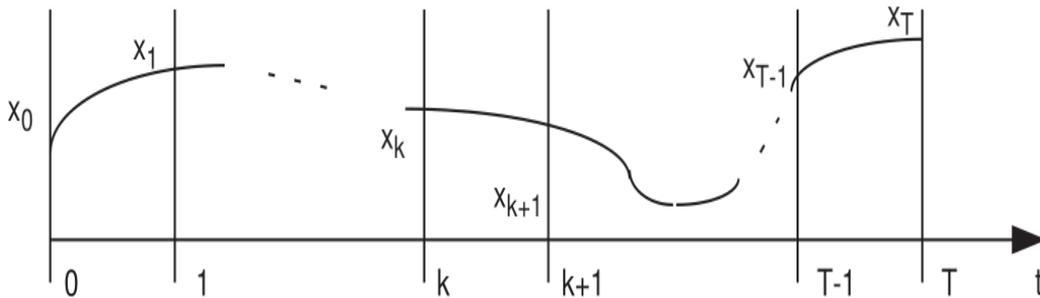


FIGURE 4.5 – Trajectoire Optimale

Propriété Fondamentale

Toute sous-trajectoire de la trajectoire optimale est optimale pour le problème à horizon réduit associé.

Algorithme de la programmation dynamique (Procédure arrière)

Étape 1 : Calculer pour chaque valeur possible de x_T :

La solution optimale satisfait :

$$F_T(x_T) = \text{Opt}_{u_T} f_T(x_T, u_T).$$

Étape 2 : Calculer successivement, pour $k = T - 1, \dots, 1$, et pour chaque valeur possible de x_k :

$$F_k(x_k) = \text{Opt}_{u_k} f_k(x_k, u_k) + F_{k+1}(\theta_k(x_k, u_k)).$$

Étape 3 : Calculer

$$J^* = F^*(x_0) = \text{Opt}_{u_0} f_0(x_0, u_0) + F_1(\theta_0(x_0, u_0)).$$

Réseau associé[33]

Supposons que le système est à l'état initial, l'état final est fixe, l'ensemble des états possibles du système à l'étape k : $x_{\Theta_k} = \{x_k^1, x_k^2, x_k^3, \dots, x_k^n\}$ et à chaque étape x_k^i un sommet du réseau R .

- Pour pousser l'état x_k^i à l'état x_{k+1}^j , il faut créer un arc (x_k^i, x_{k+1}^j) dans le réseau R .
- Le coût de l'arc (x_k^i, x_{k+1}^j) sera le coût ressenti à l'étape k pour faire pousser le système de x_k^i à x_{k+1}^j , si u_k est la meilleure décision le coût de l'arc $f(x_k^i, u_k)$.

Le réseau ci-dessus est sans circuit, par ailleurs la fonction coût est additive, la trajectoire optimale est le plus court chemin entre le sommet x_0 et le sommet x_t du réseau. Un tel chemin est déterminée par l'algorithme de Bellman.

4.3 Méthodes approchées

Dans les problèmes de complexité exponentielle, il est souvent hors de question de réaliser une exploration, même partielle, de l'arborescence des solutions.

Pour palier à ces problèmes, les chercheurs ont introduit des méthodes approchées appelées heuristiques, elles présentent l'avantage d'un temps de calcul réduit mais ne donnent aucune information sur la qualité de la solution trouvée, de plus elles ne sont en général applicables qu'à un seul type de problèmes[3].

Par exemple la méthode de la descente consiste à partir d'une solution S à choisir une solution S' dans un voisinage de S , telle que S' améliore la solution. La recherche s'arrête donc au premier minimum (ou maximum) local rencontré, c'est là son principal défaut. Pour améliorer les résultats, on peut relancer plusieurs fois l'algorithme mais la performance de cette technique décroît rapidement.

Ce qui a poussé les chercheurs à proposer de nouvelles méthodes générales (applicables à la plupart des problèmes d'optimisation) appelées métaheuristiques, dont la méthode du recuit simulé, recherche tabou, génétique...etc ; conçu pour rechercher un optimum global parmi plusieurs minimas (ou maximas) locaux.

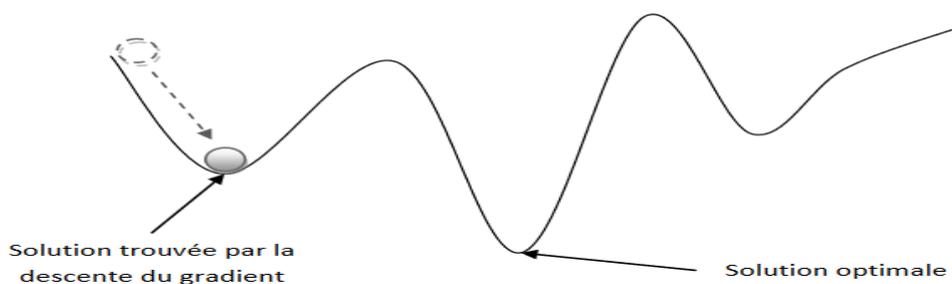


FIGURE 4.6 – Blocage d'une heuristique classique dans un minimum local

Dans la suite, nous allons donner les métaheuristique les plus utilisées en pratique.

4.3.1 Méthode Recuit Simulé

Le recuit simulé est la première métaheuristique qui a été proposée[39]. Elle est inspirée d'un processus utilisé en métallurgie. On alterne dans cette dernière des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit) qui ont pour effet de minimiser l'énergie du matériau. Cette méthode est transposée en optimisation pour trouver les extrema d'une fonction.

Elle a été mise au point par trois chercheurs de la société IBM, S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi en 1983, et indépendamment par V. Cerny en 1985.

La méthode vient du constat que le refroidissement naturel de certains métaux ne permet pas aux atomes de se placer dans la configuration la plus solide. La configuration la plus stable est atteinte en maîtrisant le refroidissement et en le ralentissant par un apport de chaleur externe, ou bien par une isolation.

Principe de la méthode Recuit Simulé

L'idée principale du recuit simulé tel qu'il a été proposé par Metropolis en 1953 est de simuler le comportement de la matière dans le processus du recuit très largement utilisé dans la métallurgie. Le but est d'atteindre un état d'équilibre thermodynamique, cet état d'équilibre (où l'énergie est minimale) représente - dans la méthode du recuit simulé - la solution optimale d'un problème. L'énergie du système sera calculé par une fonction coût (ou fonction objectif) spécifique à chaque problème [11]. La méthode va donc essayer de trouver la solution optimale en optimisant une fonction objectif, pour cela, un paramètre fictif de température a été ajouté par Kirkpatrick, Gelatt et Vecchi[32].

En gros le principe consiste à générer successivement des configurations à partir d'une solution initiale S_0 et d'une température initiale T_0 qui diminuera tout au long du processus jusqu'à atteindre une température finale ou un état d'équilibre (optimum global).

L'algorithme de Metropolis

Dans l'algorithme de Metropolis, on part d'une configuration donnée, et on lui fait subir une modification aléatoire. Si cette modification fait diminuer la fonction objectif (ou énergie du système), elle est directement acceptée; Sinon, elle n'est acceptée qu'avec une probabilité égale à $\exp(\Delta E/T)$ (avec E=énergie, et T=temperature), cette règle est appelée critère de Metropolis [3].

L'algorithme du Recuit Simulé

Le recuit simulé applique impérativement l'algorithme de Metropolis, pour engendrer une séquence de configurations qui tendent vers l'équilibre thermodynamique :

Etape 1 : Choisir une température de départ $T = T_0$ et une solution initiale $S = S_0$;

Etape 2 : générer une solution aléatoire dans le voisinage de la solution actuelle ;

Etape 3 : comparer les deux solutions selon le critère de Metropolis ;

Etape 4 : répéter 2 et 3 jusqu'à ce que l'équilibre statistique soit atteint ;

Etape 5 : décroître la température et répéter jusqu'à ce que le système soit gelé.

Dans un premier temps, T étant généralement choisi très grand, beaucoup de solutions (même celles dégradant la valeur de f) sont acceptées, et l'algorithme équivaut à une visite aléatoire de l'espace des solutions. Mais à mesure que la température baisse, la plupart des solutions augmentant l'énergie sont refusés, et l'algorithme se ramène à une amélioration itérative classique.

A température intermédiaire, l'algorithme autorise de temps en temps des transformations qui dégradent la fonction objectif. Il laisse ainsi une chance au système de s'extraire d'un minima local[3].

Notons aussi que si la température est égale à 0, seules les solutions optimisant f sont acceptées. L'algorithme se comportera donc comme la méthode de la descente du gradient.

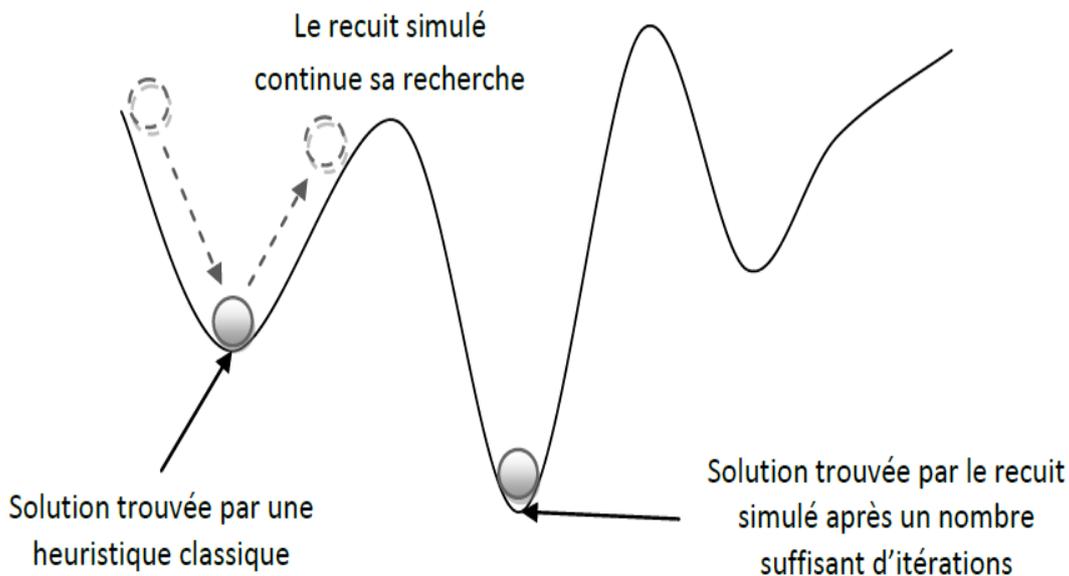


FIGURE 4.7 – comparaison entre le recuit simulé et une heuristique classique

Avantages et Inconvénients

Avantages :

- Facile à implémenter ;
- Donne généralement de bonnes solutions par rapport aux algorithmes de recherche classiques ;
- Peut être utilisé dans la plupart des problèmes d'optimisation ;
- Il converge vers un optimum global (lorsque le nombre d'itérations tend vers l'infini [3]). Cela fait de lui une option attrayante pour les problèmes d'optimisation difficiles.

Inconvénients :

Le principal inconvénient du recuit simulé est qu'une fois l'algorithme piégé à basse température dans un minimum local, il lui est impossible de s'en sortir. Plusieurs solutions ont été proposées pour tenter de résoudre ce problème, par exemple en acceptant une brusque remontée de la température de temps en temps, pour relancer la recherche sur d'autres régions plus éloignées.

4.3.2 Méthode de Recherche Tabou

La recherche tabou (RT) est une métaheuristique d'optimisation développée dans un cadre particulier par Glover en 1986 (et indépendamment par Hansen en 1986), c'est une méthode heuristique de recherche locale utilisée pour résoudre des problèmes complexes de très grande taille (souvent NP-difficile).

Principe de la Recherche Tabou

L'idée de la recherche tabou consiste à examiner la solution du voisinage de la solution courante qui minimise la fonction coût. Si la solution courante n'est pas un minimum local, on va rapidement trouver ce minimum. Si c'est déjà un minimum local, on s'intéresse à la solution qui fait augmenter le coût le moins possible.

On est sûr dans ce cas de tomber sur un cycle. Pour éviter cela, on garde à jour la liste des solutions déjà explorées (liste des solutions tabou), et on se limite aux solutions qui n'appartiennent pas à cette liste [18].

Cette liste peut devenir de taille trop grande. Plutôt que de retenir les solutions, on peut donc retenir les modifications locales ayant produit les solutions à partir de la solution initiale. On a donc une liste de modifications qu'on s'interdit de remonter. Pour éviter de bloquer complètement l'algorithme, il est bon de ne pas se souvenir de toutes les modifications depuis le début, mais seulement des dernières (de 3 à 15 environ), en les gérant sous forme d'une file, généralement les listes sont gérées en FIFO (first in first out).

Ceci dit, aucune garantie n'existe de convergence ni même de non-circularité. Il faut donc prévoir un test d'arrêt[26].

Lorsque l'algorithme s'arrête, on garde la meilleure solution rencontrée.

De nombreuses variantes ont été proposées, par exemple en autorisant des mouvements tabou lorsque l'amélioration du coût dépasse un certain seuil, ou bien en introduisant des choix aléatoires de mouvements, ...etc.

L'algorithme de la Recherche Tabou en générale

Définition des termes :

T : liste des mouvements tabous. Il peut exister plusieurs listes simultanément. Les éléments de la liste sont $t(i, m)$.

$a(i, m)$: critères d'aspiration. Déterminent quand il est avantageux d'entreprendre m , malgré son statut tabou.

Étape 1 : Choisir une solution initiale i dans S (l'ensemble des solutions)

Appliquer : $i^* = i$ et $k = 0$.

Étape 2 : Appliquer $k = k + 1$ et générer un sous-ensemble de solutions en $N(i, k)$ pour que :

- les mouvements tabous ne soient pas choisis.
- un des critères d'aspiration $a(i, m)$ soit applicable.

Étape 3 : Choisir la meilleure solution i' parmi l'ensemble de solutions voisines $N(i, k)$:

Appliquer : $i = i'$.

Étape 4 : Si $f(i) \leq f(i^*)$, alors nous avons trouvé une meilleure solution.

Appliquer : $i^* = i$.

Étape 5 : Mettre à jour la liste **T** et les critères d'aspiration.

Étape 6 : Si une condition d'arrêt est atteinte, stop. Sinon, retour à l'étape 2.

Critère d'arrêt

Plusieurs critères d'arrêt sont possibles, on cite :

- Si une solution prouvée optimale a été trouvée.
- Si une limite a été atteinte en ce qui concerne :
 - Le nombre d'itérations ;
 - Le temps de calcul.

– Si la recherche semble stagner : nombre d’itérations sans amélioration de la meilleure configuration trouvée.

Remarque : On peut arrêter la recherche à tout moment contrairement au recuit simulé.

Améliorations

La liste tabou peut s’avérer trop contraignante lors de la recherche d’une solution. Le mécanisme d’aspiration permet de lever ponctuellement le statut “tabou” afin d’atteindre des solutions inédites.

La recherche de la solution optimale peut être améliorée. Voici quelques options :

– **L’intensification** : est l’une des stratégies qui permet de mémoriser les meilleures solutions rencontrées (ou leur configuration) et les utilise afin d’améliorer la recherche.

– **La diversification** : cherche à utiliser des mouvements encore jamais réalisés afin d’explorer des régions nouvelles de l’espace de recherche en mémorisant bien sur les solutions les plus visitées.

Les deux stratégies sont complémentaires afin de sélectionner un meilleur voisin :

– **Best Fit** : le voisinage est exploré en entier.

– **First Fit** : une partie du voisinage est explorée.

Avantages et inconvénients de la Recherche Tabou

Avantage :

– Grande efficacité.

– Fonctionnement simple à comprendre.

Inconvénients :

– Paramètres peu intuitifs.

– Demande en ressources importantes si la liste des tabous est trop imposante.

– Aucune démonstration de la convergence.

4.3.3 Méthodes génétiques

L’utilisation d’algorithmes génétiques, dans la résolution de problèmes, est à l’origine le fruit des recherches de John Holland et de ses collègues et élèves de l’Université du Michigan qui ont, dès 1960, travaillé sur ce sujet[31]. La nouveauté introduite par ce groupe de chercheurs a été la prise en compte de l’opérateur d’enjambement en complément des mutations. Et c’est cet opérateur qui permet le plus souvent de se rapprocher de l’optimum d’une fonction en combinant les gènes contenus dans les différents individus de la population[30].

Principe :

Un algorithmes génétiques est un algorithme stochastique itératif qui utilise une population d'individus représentant les solutions potentielles du problème d'optimisation à résoudre[1, 43, 27]. Cette population va évoluer de générations en générations : les individus les « mieux adaptés » auront plus de chance de se reproduire et donc de transmettre leurs caractéristiques héréditaires[1, 27]. Pour se reproduire, deux mécanismes permettent de « fournir » de nouveaux individus :

– Le croisement ou l'hybridation est le résultat obtenue lorsque deux chromosomes partage leurs particularités. Celui-ci permet le brassage génétique de la population et l'application du principe d'hérédité de la théorie de Darwin[4]. Il existe deux méthodes de croisement, simple ou double enjambement :

1. Le simple enjambement consiste à fusionner les particularités de deux individus à partir d'un pivot, afin d'obtenir un ou deux enfants :



FIGURE 4.8 – Simple croisement

2. Le double enjambement repose sur le même principe, sauf qu'il y a deux pivots :



FIGURE 4.9 – Double croisement

– La mutation consiste à altérer un gène dans un chromosome selon un facteur de mutation. Voici un exemple de mutation sur un individu ayant un seul chromosome :



FIGURE 4.10 – Mutation sur un individu ayant un seul chromosome.

Avec ces trois opérateurs d'évolution, nous pouvons appliquer les algorithmes génétiques.

L'algorithme génétique

Étape 1 : Initialiser la population initiale P de N chromosomes est tirée aléatoirement .

Étape 2 : Évaluer P .

Étape 3 : Tant que (il n'y a pas de Convergence) faire :

1. $P' =$ Sélection des Parents dans P .
2. $P' =$ Appliquer Opérateur de Croisement sur P' .
3. $P' =$ Appliquer Opérateur de Mutation sur P' .
4. $P =$ Remplacer les Anciens de P par leurs Descendants de P' .
5. Évaluer P .

FinTantQue

Avantages et inconvénients

Avantages :

- Le grand avantage des algorithmes génétiques est qu'ils parviennent à trouver de bonnes solutions sur des problèmes très complexes, et trop éloignés des problèmes combinatoires classiques pour qu'on puisse tirer profit de certaines propriétés connues.
- L'efficacité d'un algorithme génétique dépend beaucoup de la façon dont on opère le croisement des individus.

Inconvénients :

- Les algorithmes génétiques sont coûteux en temps de calcul, puisqu'ils manipulent plusieurs solutions simultanément.
- Un problème surgit lorsque les différents individus se mettent à avoir des performances similaires : les bons éléments ne sont alors plus sélectionnés, et l'algorithme ne progresse plus.

4.4 Choix des Méthodes de résolution

Après l'élaboration du modèle mathématique associé au problème posé, de type non linéaire à variables discrètes, nous avons opté pour une résolution exacte basée sur le principe de la programmation dynamique. Cette méthode consiste à examiner tous les cas possibles mais conduit à des algorithmes exponentiels, ce qui nous a incité à proposer une deuxième (nouvelle) méthode basée sur le principe de la recherche tabou qui est une résolution approchée afin de réduire le temps d'exécution.

4.5 Adaptation de la programmation dynamique

Afin de garantir l'obtention d'une solution optimale pour notre problème, nous avons adapté le principe de la programmation dynamique au problème posé. les étapes de l'algorithme sont comme suite :

Étape 1 : Calculer successivement la fonction objectif séparable F_k pour ($k = 1 \dots N - 1$) et pour chaque valeur de diamètre x_k possible :

$$F_k(x_k) = \min_{x_{k+1} \in Dr} \{F_{k+1}(x_{k+1}) + V_k(x_k)\}.$$

Avec $V_k(x_k)$ c'est le coût de l'expansion du tronçon k et Dr l'ensemble des diamètres (solution x_K) qui vérifiant les contraintes.

Étape 2 : Calculer la fonction de transition finale F_N pour chaque diamètre réalisable :

$$F_N(x_N) = \min\{V_N\}.$$

Étape 3 : Calculer l'optimum :

$$F^* = F_1(x_1).$$

4.6 Proposition d'une nouvelle méthode recherche tabou

A fin de réduire le temps d'exécution, nous avons proposé une nouvelle méthode approchée basée sur le principe de la recherche tabou ; qui consiste à intensifier la recherche dans le voisinage de solutions qui semblent propices à mener à des solutions proches ou égales à l'optimum. Ensuite diversifier la recherche en éloignant celle-ci du voisinage à l'aide de la liste tabou et le critère d'aspiration dans le but d'améliorer cette dernière tout en vérifiant les contraintes, surtout celles de pressions qui sont recursives. Les étapes de cet algorithme sont représentés comme suite :

- T : La liste tabou.
- $a(i_j)$: Critères d'aspiration, il est avantageux d'entreprendre le diamètre de l'expansion du tronçon (i), malgré son statut tabou quand $a(i_j) \geq tt$ (i.e Le tronçon (j) sort de la liste tabou après tt itérations de ça entré) avec $tt = \frac{N}{2}$ si $N \leq 20$ sinon $tt = 10$.
- N : le nombre de tronçons.
- it : le nombre d'itérations.

Étape 1 : Initialiser une solution réalisable et le nombre d'itération :

1. Calculer les épaisseurs (E) correspondants aux diamètres choisis selon les zones traversées;
2. Calculer les pressions (P) toute au long de la conduite;
3. calculer le coût (Z^*) de l'expansion.
4. Aller à l'étape 2.

Étape 2 : Intensifier la recherche en améliorant la solution si c'est possible sinon aller à l'étape 3 :

1. Ordonner les tronçons selon l'ordre décroissant de leurs diamètres puis les diminuer du plus grand au plus petit.
2. Pour chaque changement :
 - (a) Augmenter le nombre d'itération : $it = it + 1$;
 - (b) Calculer E' , P' et Z' ;
 - (c) Si les contraintes sont vérifiées comparer la solution Z^* avec Z' si $Z^* \geq Z'$ alors $Z^* = Z'$, $X = X'$, $E = E'$ et $P = P'$ donc nous avons trouvé une meilleure solution .
3. Aller à l'étape 4.

Étape 3 : Diversifier la recherche :

1. Augmenter le nombre d'itération : $it = it + 1$.
2. Choisir un tronçon (j) aléatoire et augmenter son diamètre d'un niveau, on obtient une nouvelle solution X' .
3. Mettre à jour la liste tabou en ajoutant le tronçon modifié dans la liste $T = T \cup \{j\}$ et initialiser le critère d'aspiration $a(i_j) = 1$.
4. Calculer E' , P' et Z' .
5. Aller à l'étape 4.

Étape 4 : Si le nombre d'itération (it_{max}) est atteint, stop. Sinon, mettre à jour la liste tabou en supprimant tout tronçon (i) de la liste tabou $T = T - \{i\}$ tel que $a(i_j) \geq tt$ et retour à l'étape 2.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux méthodes de résolutions pour les problèmes non linéaire (exacte et approchée) et nous avons illustré deux méthodes adaptés avec leurs définition complète, maintenant vient l'implémentation de ces dernières qui sera dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

IMPLÉMENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Introduction

En informatique, un langage de programmation est une notation conventionnelle destinée à formuler des algorithmes et produire des programmes informatiques qui les appliquent. D'une manière similaire à une langue naturelle, un logiciel commercial est devenu, ces dernières années, presque incontournable : il s'agit de Matlab de société The Mathworks [8].

5.1 Présentation du Matlab

Le logiciel Matlab est un logiciel de manipulation de données numériques et de programmation dont le champ d'application est essentiellement les sciences appliquées. Son objectif, par rapport aux autres langages, est de simplifier au maximum la transcription en langage informatique d'un problème mathématique, en utilisant une écriture la plus proche possible du langage naturel scientifique. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique. Il peut donc être utilisé pour la résolution approchée d'équations différentielles, d'équations aux dérivées partielles ou de systèmes non linéaires, etc...

MATLAB a été développé par la société The MathWorks, MATLAB permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, Java, et Fortran. Les utilisateurs de MATLAB sont de milieux très différents comme l'ingénierie, les

sciences et l'économie dans un contexte aussi bien industriel que pour la recherche. 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.

5.1.1 Pourquoi programmé en Matlab

Le choix s'est porté sur l'emploi du langage du logiciel Matlab 8.1.0.604(R2013a), car il répond aux critères suivants :

- La maniabilité du langage : constitué d'un ensemble de possibilités faisant en sorte que le programmeur travaille avec aisance, assuré d'une part par la syntaxe du langage et d'autre part par un aspect visuel clair représentatif à la fois du détail et du global[16].
- Le bagage du langage : il contient une interface graphique puissante ainsi qu'une grande variété de méthodes scientifiques implémentées (prédéfinies).
- MATLAB possède une programmation facile, une continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes.
- Une bibliothèque mathématique très compréhensive avec l'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires.
- la possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C ou Fortran).

5.2 Installation du logiciel

Nous avons conçu un logiciel qui résoud les problèmes d'optimisation de l'investissement de développement de pipeline par looping. Pour que notre logiciel soit utilisable dans n'importe quel micro ordinateur nous avons créé un installable. Les étapes d'installation sont comme suit :

1. On ouvre le DVD ou le fichier qui contient l'installable.

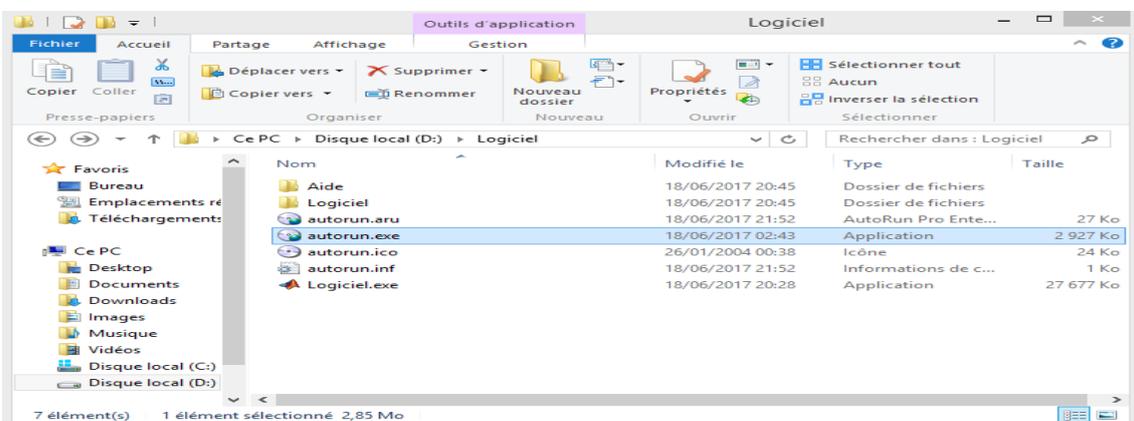


FIGURE 5.1 – Installation du logiciel.

2. Puis on ouvre le fichier "autorun.exe" qu'est en bleu, on obtiens la fenêtre suivante :



FIGURE 5.2 – Fenêtre du logiciel.

3. On clique sur "Installer" et on suit les étapes d'installation. Quand l'installation se termine on ouvre le fichier "Logiciel.exe" et c'est terminé.

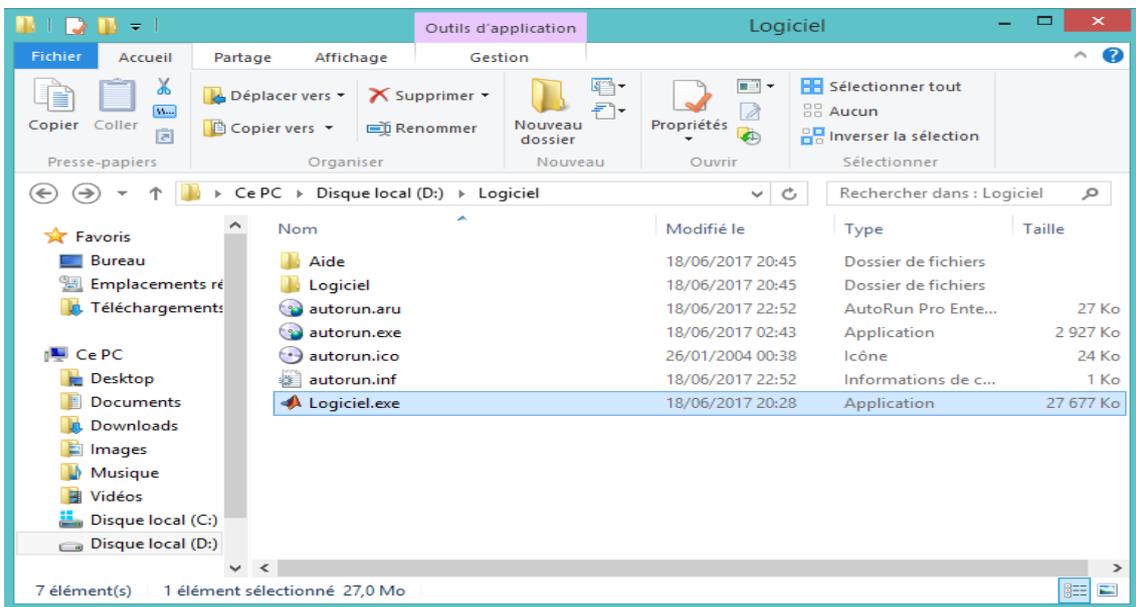


FIGURE 5.3 – Installation du logiciel.

Remarque :

Si Matlab 8.1.0.604(R2013a) est déjà installé sur une machine, on peut utiliser le logiciel directement en ouvrant le fichier "logiciel.exe" sans passer aux étapes précédentes.

5.3 Présentation du logiciel

Une fois logiciel lancé l'interface suivante apparait :



FIGURE 5.4 – Fenêtre Principale

1. Le bouton «Aide» qui donne un aperçu sur le problème de looping et comment le résoudre.
2. Le bouton « Programmation dynamique» nous conduit à l'interface de la résolution avec la programmation dynamique :



FIGURE 5.5 – Fenêtre de la programmation dynamique

Cette fenêtre est composée de 4 champs que l'utilisateur doit les remplir :

- **Nombre** : Nombre de tronçons.
- **Débit** : Débit qui transite chaque tronçon en m^3 par heure.
- **Longueur** : Longueur de chaque tronçon en km.
- **Zone** : Zones traversées par chaque tronçon.

Après avoir rempli les champs :

- Le bouton « Calculer » permet d'avoir les résultats
- Le bouton « Retour » nous conduit à l'interface principale.
- Le bouton « Fermer » permet de fermer la fenêtre.

3. Le bouton « Recherche Tabou » nous conduit à l'interface de la résolution avec l'heuristique Recherche Tabou :



FIGURE 5.6 – Fenêtre de la Recherche Tabou

Cette fenêtre est composée de 4 champs à remplir comme dans la programmation dynamique plus le nombre d'itération (Itération).

- Le bouton « Calculer » permet d'avoir les résultats.
- Le bouton « Retour » nous conduit à l'interface principale.
- Le bouton « Fermer » permet de fermer la fenêtre.

4. Le bouton « Générateur » nous conduit à l'interface de la résolution avec la programmation dynamique ou bien avec l'heuristique Recherche Tabou en générant des données aléatoire :

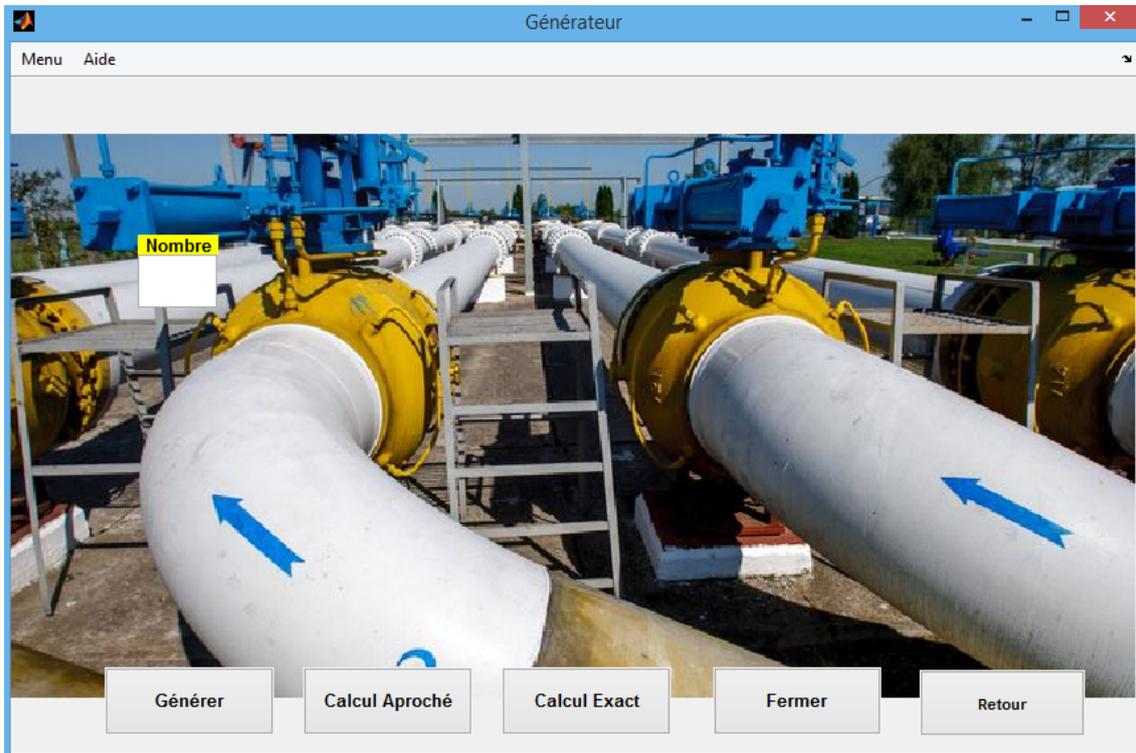


FIGURE 5.7 – Fenêtre de Générateur

- Le bouton « Générer » permet de générer des données aléatoire.
- Le bouton « Calcul Exacte » permet de calculer le résultat par la programmation dynamique.
- Le bouton « Calcul Approché » permet de calculer le résultat par la Recherche tabou.
- Le bouton « Retour » nous conduit à l'interface principale.
- Le bouton « Fermer » permet de fermer la fenêtre.

5.4 Résolution du problème

Notre principale objectif est de minimiser le coût d'investissement de l'expansion de GR5 qui se compose de 7 tronçons y compris 2 stations de compression, nous allons tester s'il est avantageux de mettre en marche la station de karachba :

- **Coût d'investissement de la ligne avec la station de Krachba :**

Il s'agit de résoudre le problème en tenant compte du fonctionnement de la station, alors on obtient deux sous systèmes de taille 3 et 4 comme le montre la figure suivante :

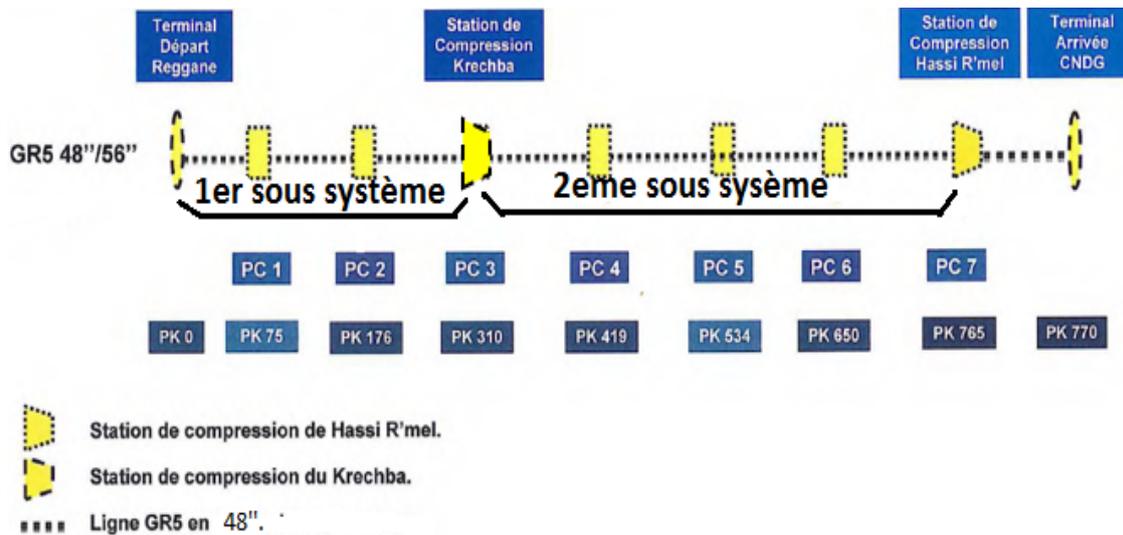


FIGURE 5.8 – Ligne avec la station de Krachba

1. Résultat par la programmation dynamique :

- Résultat de 1er sous système :

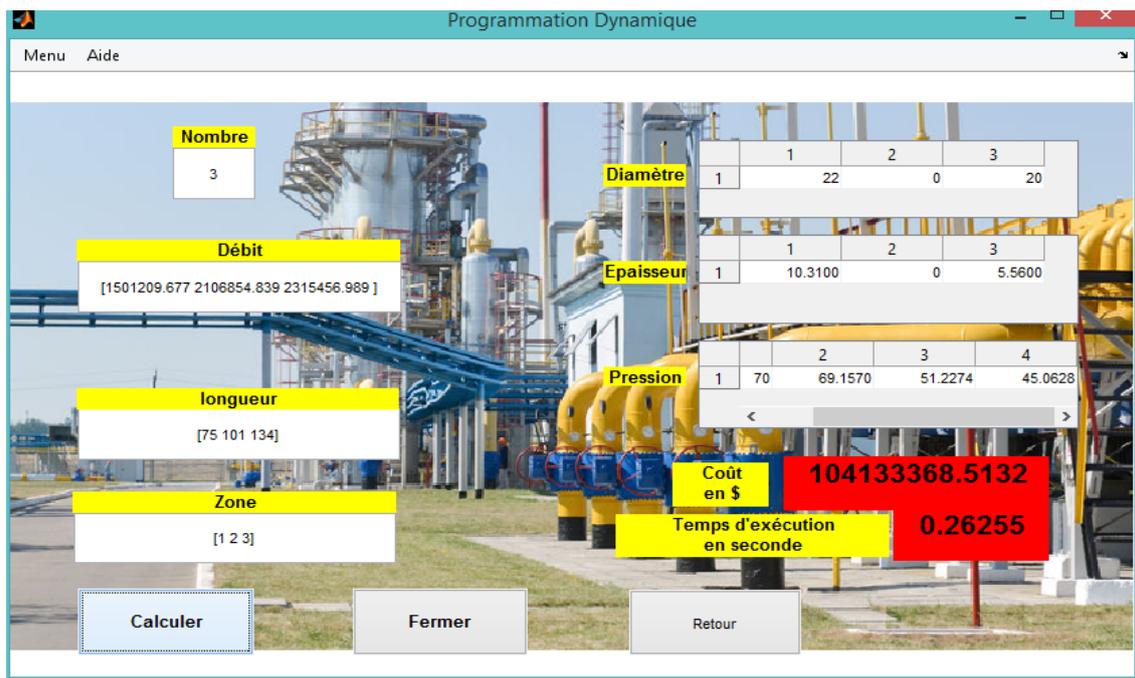


FIGURE 5.9 – Résultat du 1er sous système par la programmation dynamique

- Diamètre : Diamètre de chaque tronçon en pouce.
- Épaisseur : Épaisseur correspond au diamètre choisis de chaque tronçon selon la zone traversée en *mm*.
- Pression : Pression entrante dans chaque tronçon en bar.

- Résultat de 2ème sous système :

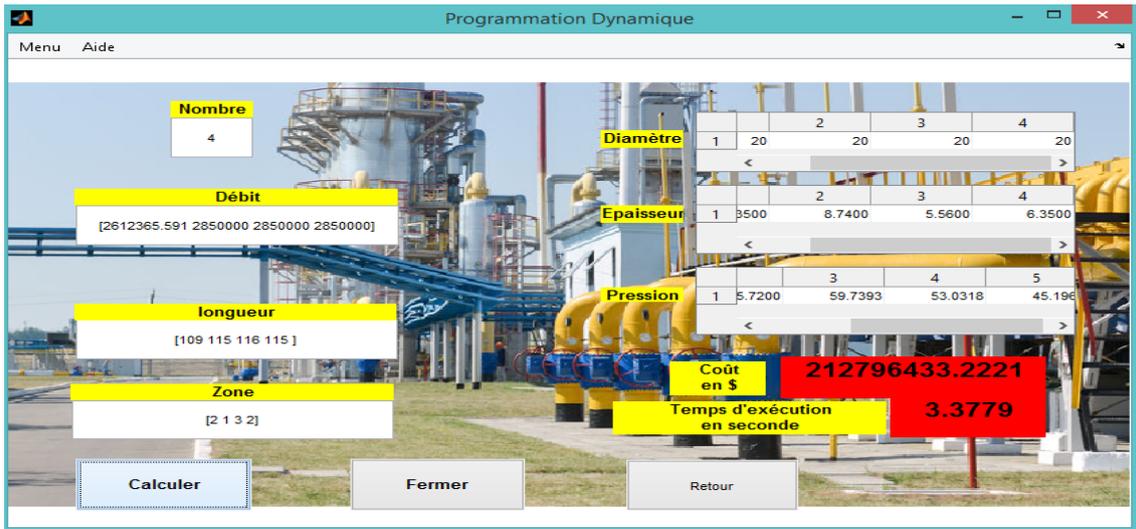


FIGURE 5.10 – Résultat du 2 ème sous système par la programmation dynamique

Le coût d’investissement de la ligne en tenant compte la station de Krachba égale à la somme des coût d’investissement de l’expansion des deux sous systèmes plus celui de Krachba qui est égale à 190 000 000\$:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 104.13 * 10^6 + 212.80 * 10^6 + 190 * 10^6 = 506.930 * 10^6.$$

Le coût total d’investissement de la ligne toute en prenant compte la station de Krachba est égale à 506 930 000 \$.

2. Résultat par la recherche tabou :

- Résultat de 1er sous système :

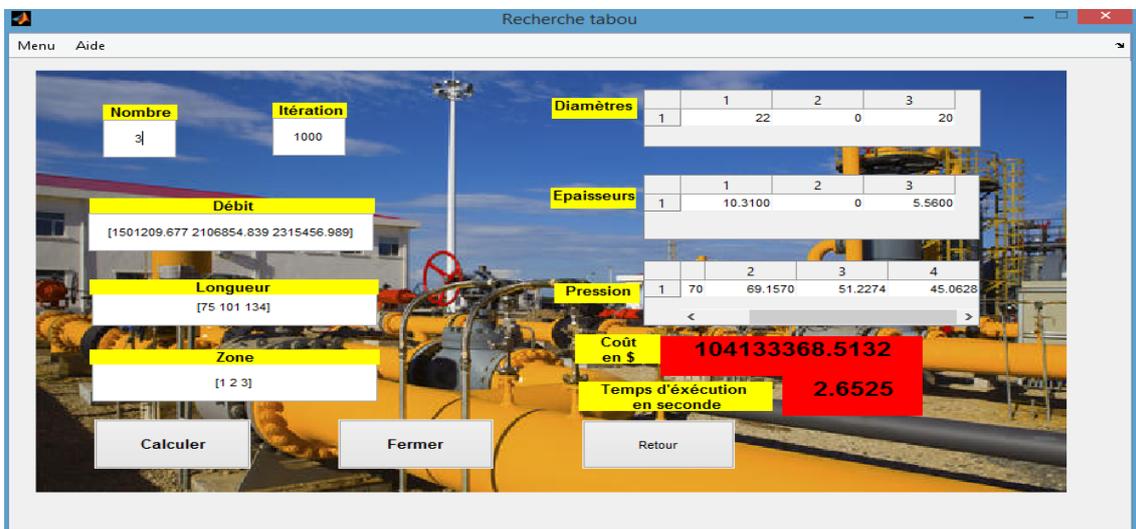


FIGURE 5.11 – Résultat du 1er sous système par la Recherche Tabou

- Résultat de 2ème sous système :

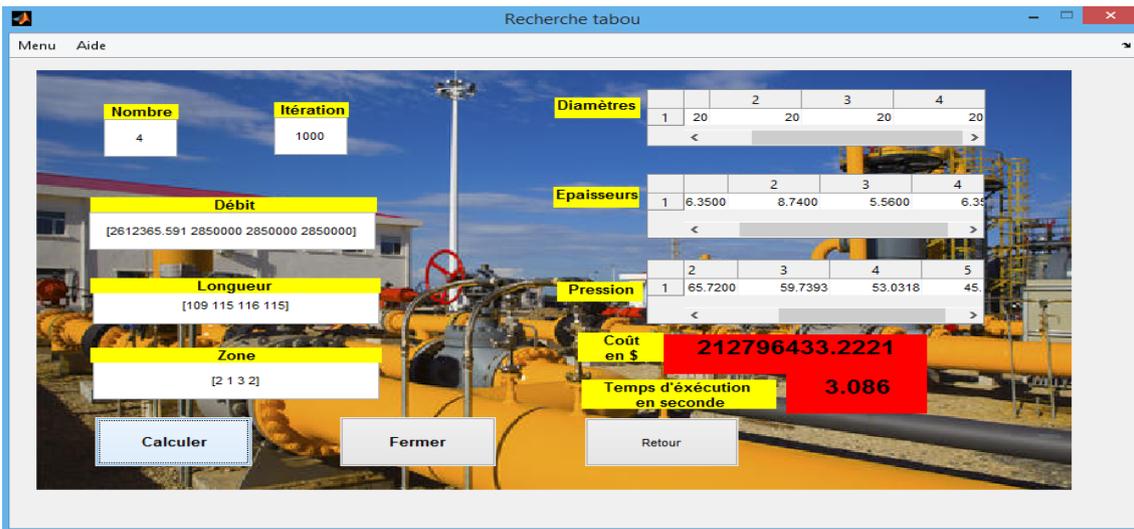


FIGURE 5.12 – Résultat du 2ème sous système par la Recherche Tabou

Nous remarquons que la Recherche tabou donne les même résultats que ceux de la programmation dynamique.

- **Coût d'investissement de la ligne sans la station de Krachba :** Il s'agit de résoudre le système complet composant de 7 tronçons :

1. Résultat par la programmation dynamique :

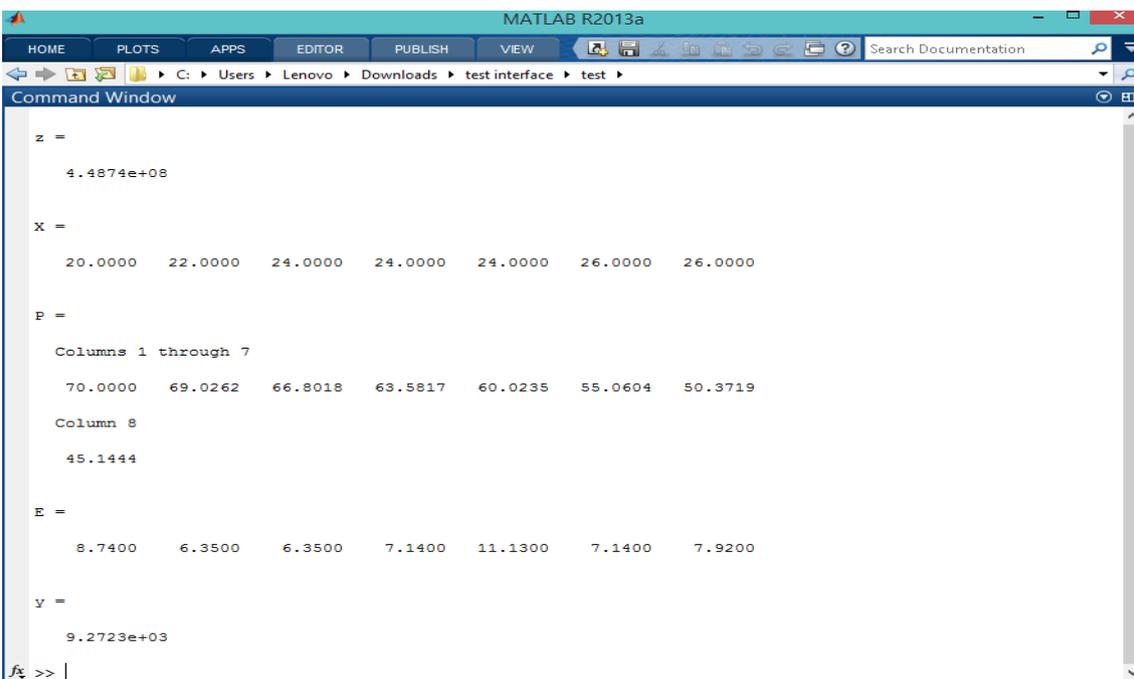


FIGURE 5.13 – Résultat du système par la programmation dynamique

- Z : Coût de l'expansion en \$.
- X : Diamètres des loopings de chaque tronçon en pouce.
- P : Presion sortante de chaque tronçon en bar.
- E : Épaisseurs correspond aux diamètres choisis selon les zones traversées en *mm*.
- y : Temps d'exécution en seconde.

Le coût d'investissement de l'expansion sans la station de compression de Krachba est égale à 448 740 000\$.

2. Résultat par la recherche tabou :

```

MATLAB R2013a
C:\Users\Lenovo\Downloads\test interface\test
Command Window
z =
    4.4874e+08

X =
Columns 1 through 5
    20.0000    22.0000    24.0000    24.0000    24.0000
Columns 6 through 7
    26.0000    26.0000

P =
Columns 1 through 5
    70.0000    69.0262    66.8018    63.5817    60.0235
Columns 6 through 8
    55.0604    50.3719    45.1444

E =
Columns 1 through 5
    8.7400    6.3500    6.3500    7.1400    11.1300
Columns 6 through 7
    7.1400    7.9200

y =
    37.4269

fx >>

```

FIGURE 5.14 – Résultat du système par la recherche tabou

Le coût d'investissement de l'expansion par la recherche tabou est égale au coût d'investissement de l'expansion par la programmation dynamique.

Nous constatons que le coût d'investissement de l'expansion sans station (avec looping seul) est moins coûteux, avec une différence de **58 190 000\$** par rapport à celui avec station.

5.4.1 Comparaison des résultats obtenues par la présente étude par rapport à ceux de SONATRACH

SONATRACH aurait effectué l'expansion avec looping de 48 pouce plus la station de Krachba a fin de répondre à la problématique posée (gérer l'excédant de gaz naturel issus des nouveaux gisements) comme le montre la figure suivante :

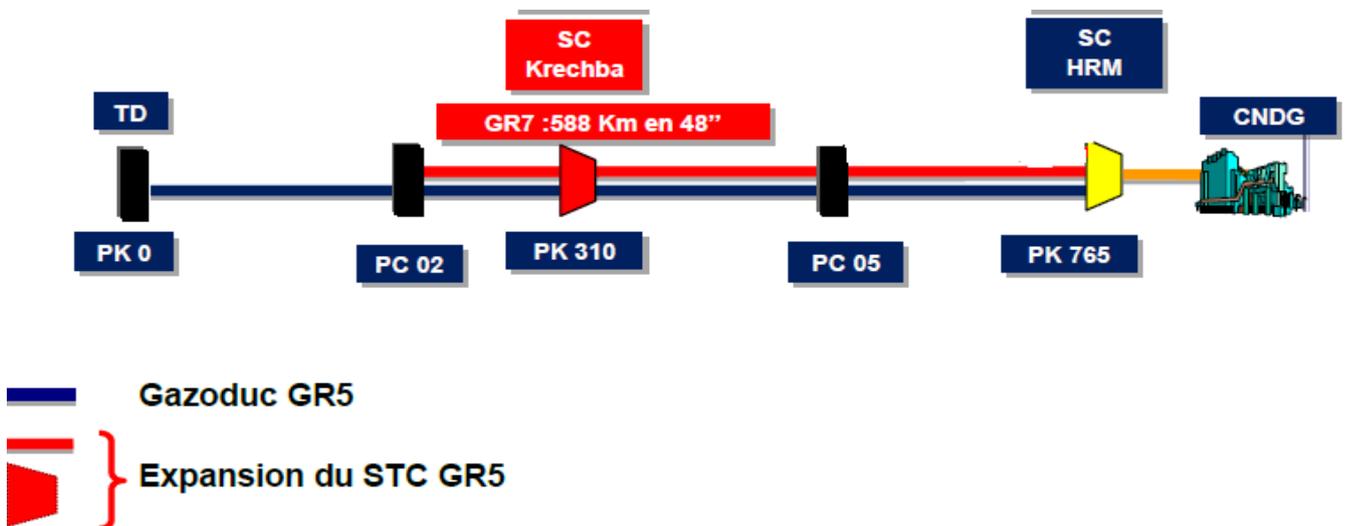


FIGURE 5.15 – Schéma de l'expansion de GR5

Cette expansion aurait coûté à SONATRACH **1 068 720 000\$**, par contre les résultats obtenus par la présente étude montre que l'expansion GR5 peut coûter uniquement **448 740 000\$** soit un gain de **57%**, ce qui représente **619 260 000\$**.

5.5 Comparaison des deux méthodes

Afin de mieux voir la performance des deux méthodes implémentées, nous donnons dans la suite, un tableau comparatifs sur le comportement de chaque méthode implémentée, et ça dans un même environnement de programmation et pour les mêmes instances. Le temps d'exécution d'un programme dépend de beaucoup de choses. Tout d'abord de la machine sur laquelle le

code est exécuté (plus elle est puissante, plus le programme sera rapide). La machine utilisée pour l'implémentation est dotée d'un processeur intel(R) core(TM) i3-5005U CPU, mémoire installée (RAM) de 4 Go et système d'exploitation de 64 bits.

Taille De Problème	L'efficacité de RT	Temps moyen d'exécution de la Programmation Dynamique (PD)	Temps moyen d'exécution,de la Recherche Tabou (RT)
3	100%	0,26 s	2,70 s
4	100%	3,8 s	5,60 s
5	100%	51,49 s	8,89 s
6	100%	11,09 min	12,31 s
7	100%	2h 45 min	37,42 s
10	100%	1 semaine et 21 h	42,36 s
15	-	-	1,7 min
20	-	-	3,8 min
25	-	-	4,9 min

TABLE 5.1 – Tableau comparatif de deux méthodes

Notons que pour chaque taille, nous avons généré 100 problèmes, afin de calculer la moyenne de temps d'exécution de deux méthodes et tester l'efficacité de la recherche tabou (combien de fois la recherche tabou a touché l'optimum).

5.5.1 Interprétation des résultats obtenus

D'après les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus, nous constatons que le temps d'exécution de la recherche tabou est raisonnable par rapport à la programmation dynamique et qu'elle atteint l'optimum dans les problème de petite taille, tandis que dans les problème de grande taille, il reste à appliquer la technique MULTIRESTART et prendre la meilleur solution.

Conclusion

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'investissement de l'expansion sans la station de compression est moins coûteux et l'implémentation des deux méthodes proposées sous le logiciel Matlab, nous a montré, l'efficacité de la recherche tabou.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressé à l'optimisation de l'expansion GR5 Reggane-Hassi R'mel. Notre travail consiste à la conception d'un modèle mathématique du problème de recherche de conditions optimales de l'expansion de GR5. Il s'agit d'un problème d'optimisation non-linéaire à variables discrètes dont les variables d'optimisation sont les diamètres extérieurs des loopings et les épaisseurs commerciaux correspond aux diamètres choisis selon les zones traversées. Le critère retenu concerne la minimisation de l'investissement de l'expansion.

Pour la réalisation de ce travail, nous avons adapté le principe de la programmation dynamique qui est une démarche déterministe (exacte) consistant à examiner tous les cas possibles mais elle conduit à des algorithmes exponentiels, cette difficulté nous a incité(ramener) à proposer une deuxième (nouvelle) méthode approchée qui est la recherche tabou afin de réduire le temps d'exécution. L'implémentation de ces deux dernières sous le langage MTALAB a montrer qu'il est désavantageux de mettre en marche la station de Krachba et l'efficacité de la deuxième approche.

Le test effectué a montré que notre méthode est bien adaptée à la problématique posée et offre de bons résultats qui sont admis par l'entreprise car le gain trouvé a atteint les 57% , ce qui représente 619 260 000,00\$.

Ce travail que nous venons d'effectuer, n'est qu'une parcelle de ce qui pourrait être fait dans l'avenir pour ce domaine qu'est l'exploitation de canalisations de transport des hydrocarbures. Nous souhaitons qu'il fasse l'objet d'améliorations en tenant compte le régime de de fonctionnement qui 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.

Bibliographie

- [1] AMÉDÉE, S., AND FRANCOIS-GÉRARD, R. Algorithmes génétiques. *TE de fin d'année* (2004).
- [2] ANGELIER, J.-P. Gaz naturel. In *Cyclope : les marchés mondiaux*. Economica, 2006, pp. 601–610.
- [3] AUTIN, B. Les méaheuristiques en optimisation combinatoire. *Mémoire pour l'obtention l'examen probatoire en informatique, Conservatoire Nationales des Arts et des Métiers Paris* (2006).
- [4] BARNIER, N. Optimisation par hybridation d'un algorithme génétique avec la programmation par contraintes. *Rapport de DEA, Institut National Polytechnique de Toulouse* (1997).
- [5] BELLMAN, R., AND KALABA, R. E. *Dynamic programming and modern control theory*, vol. 81. Academic Press New York, 1965.
- [6] BELLMAN, R. E., AND DREYFUS, S. E. *Applied dynamic programming*. Princeton university press, 2015.
- [7] BERTSEKAS, D. P. *Constrained optimization and Lagrange multiplier methods*. Academic press, 2014.
- [8] BEZOUÏ.M. *Méthode adaptée de programmation quadratique convexe -Théorie et applications-*. Editions Universitaire Européennes, 2011.
- [9] BOGGS, P. T., AND TOLLE, J. W. A family of descent functions for constrained optimization. *SIAM Journal on Numerical Analysis* 21, 6 (1984), 1146–1161.

- [10] BROYDEN, C. G., AND ATTIA, N. F. A smooth sequential penalty function method for solving nonlinear programming problems. In *System Modelling and Optimization*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1984, pp. 237–245. DOI : 10.1007/BFb0008897.
- [11] BURKE, E. K., KENDALL, G., AND WHITWELL, G. A simulated annealing enhancement of the best-fit heuristic for the orthogonal stock-cutting problem. *INFORMS Journal on Computing* 21, 3 (2009), 505–516.
- [12] BUYS, J. D. *Dual algorithms for constrained optimization problems*. PhD thesis, Rijksuniversiteit te Leiden, 1972.
- [13] COLEMAN, T., AND HEMPEL, C. Computing a Trust Region Step for a Penalty Function. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 11, 1 (Jan. 1990), 180–201.
- [14] COURANT, R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics* (1994), 1–1.
- [15] DI PILLO, G., AND GRIPPO, L. A New Class of Augmented Lagrangians in Nonlinear Programming. *SIAM Journal on Control and Optimization* 17, 5 (Sept. 1979), 618–628.
- [16] DJEDDI, Y. G. *Résolution des problèmes multicritères par la méthode MOORA*. Mémoire de fin de cycle Mastère. Université M’hamed Bouguerra Boumerdes, 2015.
- [17] DREYFUS, S. Richard Bellman on the birth of dynamic programming. *Operations Research* 50, 1 (2002), 48–51.
- [18] DRÉO, J., PÉTROWSKI, A., SIARRY, P., AND TAILLARD, E. *Métaheuristiques pour l’optimisation difficile*. Eyrolles, 2003.
- [19] FIACCO, A. V., AND MCCORMICK, G. P. *Nonlinear programming : sequential unconstrained minimization techniques*. SIAM, 1990.
- [20] FLETCHER, R. A class of methods for nonlinear programming with termination and convergence properties. *Integer and nonlinear programming* (1970), 157–173.
- [21] FLETCHER, R., AND LEYFFER, S. Nonlinear programming without a penalty function. *Mathematical programming* 91, 2 (2002), 239–269.
- [22] FRISCH, K. R. The logarithmic potential method of convex programming. *Memorandum, University Institute of Economics, Oslo* 5, 6 (1955).
- [23] GHAZLI, K. *Optimisation continue d’une fonction linéaire sur l’ensemble des solutions efficaces d’un problème linéaire stochastique multi-objectifs*. PhD thesis, 2008.
- [24] GILL, P. E., MURRAY, W., AND SAUNDERS, M. A. SNOPT : An SQP algorithm for large-scale constrained optimization. *SIAM review* 47, 1 (2005), 99–131.
- [25] GLAD, T., AND POLAK, E. A multiplier method with automatic limitation of penalty growth. *Mathematical Programming* 17, 1 (1979), 140–155.

- [26] GLOVER, F., AND LAGUNA, M. *Tabu Search*. Springer, 2013.
- [27] GOLDBERG, D. E., AND CORRUBLE, V. *Algorithmes génétiques : exploration, optimisation et apprentissage automatique*. Ed. Addison-Wesley France, 1994.
- [28] GOULD, N. I. M. On the Accurate Determination of Search Directions for Simple Differentiable Penalty Functions. *IMA Journal of Numerical Analysis* 6, 3 (July 1986), 357–372.
- [29] HESTENES, M. Multiplier and gradient methods. *Journal of optimization theory and applications*, Springer (1969).
- [30] HOLLAND, J. H. 1975, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [31] HOLLAND, J. H. Genetic algorithms. *Scientific american* 267, 1 (1992), 66–72.
- [32] KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., VECCHI, M. P., AND OTHERS. Optimization by simulated annealing. *science* 220, 4598 (1983), 671–680.
- [33] LARBI, A. Programmation dynamique.
- [34] LAZDAM.I. *Optimisation dans les réseaux, Mémoire de fin de cycle Mastère*. Université des sciences et de la technologie Houari-Boumediène, 2014.
- [35] LOOTSMA, F. A. Hessian matrices of penalty functions for solving constrained optimization problems. *Philips Research Reports* 24 (1969), 322–331.
- [36] MENON, E. S. *Gas Pipeline Hydraulics*. CRC Press, May 2005. Google-Books-ID : t1XMBQAAQBAJ.
- [37] MURRAY, W. Analytical expressions for the eigenvalues and eigenvectors of the Hessian matrices of barrier and penalty functions. *Journal of Optimization Theory and Applications* 7, 3 (Mar. 1971), 189–196.
- [38] NOCEDAL, J., AND WRIGHT, S. J. Springer series in operations research and financial engineering. *Numerical Optimization* (1999).
- [39] OLIVIER.D. Méthode du recuit simulé, complément recherche stochastique.
- [40] POWELL, M. J. D. *A Method for Nonlinear Constraints in Minimization Problems in Optimization* ed. by R. Fletcher, Academic Press, 1969.
- [41] ROCKAFELLAR, R. T. A dual approach to solving nonlinear programming problems by unconstrained optimization. *Mathematical Programming* 5, 1 (Dec. 1973), 354–373.
- [42] ROCKAFELLAR, R. T. The multiplier method of Hestenes and Powell applied to convex programming. *Journal of Optimization Theory and Applications* 12, 6 (Dec. 1973), 555–562.
- [43] SEFRIOUL, M. *Algorithmes évolutionnaires pour le calcul scientifique : application à l'électromagnétisme et à la mécanique des fluides numériques*. PhD thesis, 1998.

- [44] SITE, S. www.sonatrach.dz.
- [45] SONATRACH. *Code Réseau*.
- [46] SONATRACH. Décision a-589(r6) organisation de trc.
- [47] SONATRACH. Fiche technique système de transport par canalisation gaz naturel gr5.
- [48] SONATRACH. Rapport annuel.
- [49] WILSON, R. B. *A simplicial algorithm for concave programming*. Graduate School of Business Administration, George F. Baker Foundation, Harvard University, 1963.