

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Mémoire de MASTER

Présentée par

Soufi Ahmed Mustapha

Filière : Hydrocarbures.

Option : Economie des hydrocarbures

**Optimisation et Modélisation Graphique d'un réseau
de production, de traitement et transport du gaz :**

Projet In-Salah Gas

Devant le jury :

Mr	BOUHRI	Abdelkader	MCB	UMBB	Président
Mme	OUATIKI	Saliha	MCA	UMBB	Examineur
Mme	NAITBELKACEM	Salima	MCB	UMBB	Promotrice

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Tout au long de la rédaction de ce mémoire, j'ai reçu beaucoup d'aide et de soutien.

En tout premier lieu, je remercie le bon dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Je remercie profondément mes parents, pour leur confiance inconditionnelle, leurs encouragements opportuns et leur patience infinie. C'est leur amour qui m'a relevé lorsque j'étais fatigué.

*Je tiens d'abord à remercier mon encadreur, **Mme NAIT BELKACEM**. Dont l'expertise m'a été précieuse pour formuler les questions de recherche et la méthodologie.*

Vos commentaires perspicaces m'ont poussée à affiner ma réflexion et ont porté mon travail à un niveau supérieur.

*J'aimerais particulièrement distinguer mon superviseur à In-Salah Gas, **Mr Soufiane NESROUCHE**. Soufiane, je tiens à vous remercier pour votre soutien patient et pour toutes les occasions qui m'ont été données de faire avancer mes recherches.*

Je tiens également à remercier mes professeurs et enseignants, pour leurs précieux conseils tout au long de mes études. Vous m'avez fourni les outils dont j'avais besoin pour choisir la bonne direction et mener à bien travailler. Et aussi les remercier pour avoir pris le temps d'examiner mon travail, et lui porter leurs jugements.

*Je remercie profondément **Abderrahmane TAIBI** pour son soutien incommensurable et sa stimulation. Sans son mentorat, ce travail ne serait pas aussi éminent qu'il l'est présentement.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes parents, pour leur amour et leur soutien sans réserve, pour leurs concessions et leur compassion tout au long de ma trajectoire. Merci d'être les personnes qui m'ont appris à rêver et à persévérer dans la poursuite de mes ambitions.

*À ma grand-mère maternelle bien-aimée **BAYA**, que Dieu la préserve comme une couronne posée sur nos têtes.*

Je vous aime du fond du cœur. Et je suis toujours reconnaissant de vous avoir comme mes maillons les plus précieux. Que Dieu préserve votre santé et vous permette d'être le témoin de mes réalisations futures.

*A mes précieux frère et sœur **Ryma** et **Abdennour** et mes cousins **Imane** et **Ali**. Vous êtes la lumière de ma vie qui m'a permis de m'épanouir et de devenir l'être que je suis aujourd'hui.*

*A tous les membres de ma famille paternelle et maternelle, **SOUFI** et **BENLAIB**.*

*À **Imad LAFER**, je dédie cette thèse pour honorer l'impact profond que tu as eu sur ma vie, ton soutien indéfectible, ton enthousiasme contagieux et ta profonde amitié continuent de m'inspirer. Bien que ton absence physique m'attriste, je trouve du réconfort dans l'influence durable qu'e t'a eu sur mon parcours. Ta foi en moi alimente ma détermination à relever les défis et à atteindre mes objectifs. Cette dédicace est un hommage à nos rêves communs, à nos souvenirs et aux liens que nous avons tissés. Sa trace me rappelle qu'il faut saisir les opportunités, rechercher la connaissance et chérir les liens significatifs. Avec gratitude, je perpétue cet héritage en façonnant mes projets et en favorisant des relations durables. Je souhaite que, où que tu es, t'es fier de moi. Avec tout mon amour, Imad, je souhaite que tu reposes en paix et que Dieu t'accueille dans son vaste paradis.*

*Pour toutes mes familles **BOUNOUA**, **LAFER**, **TOUBAL**, **MEKHELFI**, **TAIBI**, **BOUREGHDA**. Merci d'avoir été des parents, des frères et des sœurs aimants dont la présence dans ma vie m'a apporté beaucoup de joie. Je vous adore tous très profondément.*

*A mes petits anges bien-aimés **Mohamed Anis**, **Louai**, **Oudai**, **Ahmed**. J'espère que ce travail nourrira vos ambitions dans la vie. Même si vous ne savez pas encore lire, je vous promets, ainsi qu'à moi-même, que je serai le mentor qui vous aidera à surmonter tous les*

obstacles. Vous êtes la lumière qui m'a aidé à traverser le vide. Je vous aime du fond de mon âme.

à mon extraordinaire cercle d'amis, dont le soutien infailible, les encouragements sans limites et la confiance inébranlable en moi ont été une source de force tout au long de ce parcours universitaire. Vous avez été mes piliers d'inspiration, mes caisses de résonance et mes rappels constants du pouvoir de l'amitié. Votre présence dévouée et votre camaraderie authentique ont insufflé de la joie, des rires et d'innombrables souvenirs précieux dans ma vie. Ce travail témoigne de l'impact profond que chacun d'entre vous a eu sur mon développement, tant sur le plan personnel que sur le plan académique. Merci d'avoir été là dans les hauts et les bas, de m'avoir relevée lorsque j'ai trébuché et d'avoir célébré chaque triomphe en cours de route. Je vous suis à jamais reconnaissant pour votre amour, votre soutien et vos contributions incommensurables à la formation de la personne que je suis devenue. Cette réussite est autant la vôtre que la mienne, et je la dédie à chacun d'entre vous avec une reconnaissance sincère et une profonde admiration.

"Sometimes it's the very people who no one imagines anything of who do the things no one can imagine." - Drake

Liste de figures

Figure I. 1 Carte du pétrole et du gaz de l'Algérie.	3
Figure I. 2 Organigramme de la macrostructure de SONATRACH.	7
Figure I. 3 Localisation des champs du projet ISG.	8
Figure I. 4 Schéma de développement du projet ISG.	13
Figure II. 1 Relation entre P.C.S et P.C.I.	18
Figure II. 2 Les processus du traitement.	23
Figure II. 3 procédé de PRTICHARD.	25
Figure II. 4 Procédé HUDSON.	26
Figure II. 5 Pré-déshydratation.	30
Figure II. 6 Déshydratation par perméation gazeuse (membrane).	32
Figure II. 7 Déshydratation par perméation gazeuse (membrane).	34
Figure III. 1 le réseau routier entre Boston et Los Angeles.	50
Figure III. 2 Carte de France.	51
Figure III. 3 Réseau routier.	53
Figure III. 4 Exemple d'une table d'échecs.	59
Figure IV. 1 Réseau de fabrication d'un produit.	67
Figure IV. 2 Réseau de fabrication d'un produit optimisé.	68
Figure IV. 3 Méthodologie de création de Euler.	69
Figure IV. 4 Les graphes.	70
Figure IV. 5 Les systèmes complexes.	71
Figure IV. 6 Association des neouds.	72
Figure IV. 7 Réseau de transport entre Amsterdam et London.	75
Figure IV. 8 Réseau orienté.	77
Figure V. 1 Réseau quelconque.	82
Figure V. 2 Réseau quelconque optimisé.	83

Figure V. 3	Modèle principale de distances	84
Figure V. 4	Modèle principale de distance optimisé.....	85
Figure V. 5	Graphe de production totale	86
Figure V. 6	Graphe de production par champ.....	88
Figure V. 7	Modèle du Scénario 1	90
Figure V. 8	Graphe de production totale-Scénario 1.....	91
Figure V. 9	Graphe de production par champ-Scénario 1	93
Figure V. 10	Modèle du scénario 2	95
Figure V. 11	Graphe de production totale-scénario 2	96
Figure V. 12	Graphe de production par champ-scénario 2.....	97
Figure V. 13	Modèle du scénario 3	100
Figure V. 14	Graphe de production totale-scénario 3	101
Figure V. 15	Graphe de production par champ-scénario 3.....	103
Figure V. 16	Cellule 1	106
Figure V. 17	Cellule 2	106
Figure V. 18	Cellule 3	107
Figure V. 19	Cellule 4	108
Figure V. 20	Cellule 5	109

Liste des tableaux

Tableau I. 1 Spécifications du gaz	11
Tableau I. 2 Les années de découvertes des champs.....	12
Tableau II. 1 Les processus de traitement	24
Tableau III. 1 Exemple de mariages stables	52
Tableau III. 2 Tâches de construction d'une piscine olympique 1.	54
Tableau III. 3 Tâches de construction d'une piscine olympique 2.	55

Liste d'abréviations

PL	Programmation Linéaire
KB	Krechba
TEG	Teguentour
GBF	Garet El Befinat
HMN	Hassi Moumene
GMD	Gour Mahmoud
IS	In Salah

Table des matières

Liste de figures	I
Liste des tableaux	III
Liste d'abréviations	IV
Table des matières	V
Introduction générale	A
Chapitre I : Présentation de la SONATRACH et le projet ISG	2
Introduction	2
I.1 Présentation de la SONATRACH	2
I.1.1 Historique	3
I.1.2 Missions	4
I.1.3 Activités	4
I.1.4 Divisions	5
I.2 Présentation du Projet In-Salah Gas	7
I.2.1 Missions	8
I.2.2 Description du projet ISG	9
I.2.3 Evolution du projet ISG	12
Conclusion	14
Chapitre II : Généralités sur le gaz	16
Introduction	16
II.1 Historique	16
II.2 L'importance du gaz	16
II.3 Définition du gaz brut	17
II.4 Caractéristiques du gaz brut	17
II.4.1 Le pouvoir calorifique	17

II.4.2 La composition chimique	18
II.4.3 La densité.....	19
II.4.4 La masse molaire moyenne.....	20
II.5 Origine des constituants	20
II.5.1 Le gaz bactérien ou biochimique	20
II.5.2 Le gaz thermique.....	20
II.6 Les différents types de gaz naturel.....	20
II.6.1 Le gaz sec.....	21
II.6.2 Le gaz humide	21
II.6.3 Le gaz à condensats.....	21
II.6.4 Le gaz associé	21
II.7 Procédés du Traitement du gaz brut.....	21
II.7.1 Le procédé PRITCHARD	25
II.7.2 Le procédé HUDSON.....	25
II.7.3 Procédés mixtes.....	26
II.7.4 Décarbonatation	26
II.7.5 Déshydratation	28
II.8 Les hydrates du gaz naturel	28
II.8.1 Nature et structure	28
II.8.2 Prévention des hydrates	29
II.8.3 Les méthodes de déshydrations.....	29
Conclusion	36
Chapitre III : Généralités sur la modélisation.....	38
Introduction.....	38
III.1 La recherche opérationnelle	38
III.1.1 Définition.....	38
III.1.2 L'ancienneté de la recherche opérationnelle	38

III.1.3 Les types de problèmes traités par la recherche opérationnelle	40
III.1.4 Le développement récent de la recherche opérationnelle	41
III.2 La modélisation	43
III.2.1 Définitions	43
III.2.2 L'importance de la modélisation	44
III.2.3 Les étapes de réalisation d'un modèle.....	44
III.2.4 Procédure de création d'un modèle.....	46
III.2.5 Quelques méthodes de modélisation.....	49
III.3 Programmation linéaire.....	55
III.3.1 Définition.....	55
III.3.2 Le problème de programmation linéaire canonique	56
III.4 Les domaines d'application.....	60
Conclusion	63
Chapitre IV : La programmation dynamique.....	65
Introduction.....	65
IV.1 La programmation dynamique	66
IV.1.1 L'algorithme de la programmation dynamique.....	66
IV.2 Un problème d'ordonnancement déterministe.....	66
IV.3 La théorie des graphes	68
IV.3.1 Définition d'un graphe	68
IV.3.2 Analyses et algorithmes graphiques.....	70
IV.3.3 Importance des algorithmes de graphes	72
IV.3.4 Les cas d'application des algorithmes de graphes.....	73
IV.4 Algorithme du chemin le plus court	74
IV.4.1 L'utilisation de l'algorithme du chemin le plus court.....	74
IV.4.2 L'algorithme de Bellman-Ford.....	75
Conclusion	79

Chapitre V : Modélisation, optimisation et interprétation	81
Introduction	81
V.1 Exemple d'application de l'algorithme Bellman-Ford	81
V.2 Modélisation Graphique	84
V.2.1 Modèle principale de distance	84
V.3 Les scénarios de production	85
V.3.1 Scénario 1 (2004-2016)	90
V.3.2 Scénario 2 (2016-2017)	95
V.3.3 Scénario 3 (2017-2027)	100
V.4 Partie code	106
V.4.1 Explication du code	106
V.4.2 Résultat du code	110
Conclusion	110
Conclusion générale	112
Bibliographie	115
Résumé	118
Abstract	119
ملخص	120

Introduction générale

Introduction générale

L'industrie gazière joue un rôle crucial dans la satisfaction de la demande croissante en énergie à travers le monde. La gestion efficace du réseau de production, traitement et transport du gaz revêt une importance capitale pour maximiser la production, assurer une distribution fiable et optimiser les coûts opérationnels. Dans ce contexte, l'utilisation d'algorithmes tels que l'algorithme Bellman-Ford offre des perspectives prometteuses pour l'ordonnancement des opérations gazières.

Les réseaux de production, traitement et transport du gaz sont des systèmes complexes comprenant plusieurs champs gaziers, des installations de traitement, des pipelines et des points de livraison. La gestion de ces réseaux nécessite une planification minutieuse pour optimiser l'acheminement du gaz, minimiser les pertes, prendre en compte les contraintes opérationnelles et s'adapter aux fluctuations de la demande. Cependant, la complexité croissante de ces réseaux nécessite des approches avancées pour garantir une efficacité maximale.

L'algorithme Bellman-Ford est largement utilisé dans le domaine des réseaux pour calculer les plus courts chemins dans un graphe pondéré, permettant ainsi de déterminer le trajet optimal pour le transport du gaz entre les différentes installations du réseau. En utilisant cet algorithme, il est possible de prendre en compte les contraintes techniques, les capacités des pipelines, les délais de livraison et les coûts associés pour optimiser l'ordonnancement des opérations gazières. L'algorithme Bellman-Ford fournit ainsi une base solide pour une gestion efficace du réseau gazier.

L'application de l'algorithme Bellman-Ford et de l'intelligence artificielle à la gestion du réseau de production, traitement et transport du gaz présente des avantages significatifs pour l'industrie gazière. Ces approches peuvent contribuer à une meilleure utilisation des ressources, une réduction des coûts opérationnels, une optimisation des flux de gaz et une amélioration de la fiabilité de la livraison.

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif est d'explorer l'utilisation de l'algorithme Bellman-Ford pour l'ordonnancement des opérations gazières. En analysant les données du réseau de production, traitement et transport du gaz, des recommandations pour une gestion optimisée seront proposées. Les résultats de cette étude pourraient fournir des perspectives précieuses

Introduction générale

pour l'industrie gazière en général, en démontrant comment les techniques d'optimisation peuvent être appliquées avec succès pour améliorer la gestion des réseaux gaziers complexes.

L'optimisation de l'ordonnancement du réseau de production, traitement et transport du gaz revêt une importance capitale pour l'industrie gazière. L'utilisation de l'algorithme Bellman-Ford offre des opportunités prometteuses pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la fiabilité de la livraison du gaz. Cette étude de mémoire vise à explorer ces approches et à fournir des recommandations pour une gestion optimisée du réseau gazier dans un contexte plus large.

Prenons l'exemple d'une société gazière qui gère un réseau de production, traitement et transport du gaz naturel. Le réseau comprend plusieurs champs gaziers, des installations de traitement et des pipelines interconnectés. L'objectif de cette société est d'optimiser l'ordonnancement des opérations pour maximiser la production de gaz, assurer une distribution fiable et réduire les coûts opérationnels.

En utilisant l'algorithme Bellman-Ford, la société peut calculer les trajets optimaux pour le transport du gaz entre les différentes installations du réseau. Par exemple, supposons qu'il existe trois champs gaziers A, B et C, reliés aux installations de traitement T1, T2 et T3 respectivement, qui à leur tour sont connectées aux points de livraison P1 et P2 via des pipelines. L'algorithme Bellman-Ford permettra de déterminer les chemins les plus courts et les plus efficaces pour acheminer le gaz des champs gaziers vers les points de livraison, en prenant en compte les capacités des pipelines, les contraintes de débit et les coûts associés. Pour atteindre l'objectif voulu de ce travail on a posé la problématique en dessous :

Comment optimiser le réseau de production, traitement et transport du gaz en utilisant l'algorithme Bellman-Ford et pour gérer efficacement les fluctuations des volumes de production, garantir une distribution fiable du gaz et minimiser les pertes dans l'industrie gazière ?

D'après notre problématique on pose les hypothèses suivantes :

- L'algorithme Bellman-Ford peut être appliqué avec succès à la gestion du réseau de production, traitement et transport du gaz, en prenant en compte les contraintes techniques, les capacités des pipelines et les coûts associés ;
- L'optimisation basée sur l'algorithme Bellman-Ford peut améliorer l'efficacité opérationnelle du réseau gazier en réduisant les temps d'arrêt, les pertes de gaz et les coûts de transport ;

Introduction générale

- La modélisation précise des différents éléments du réseau gazier, tels que les champs gaziers, les installations de traitement et les pipelines, est essentielle pour obtenir des résultats précis lors de l'application de l'algorithme Bellman-Ford dans le cas réel ;
- L'intégration de données en temps réel sur les volumes de production, les demandes de gaz et les conditions météorologiques peut améliorer la précision des prévisions et permettre une meilleure planification des opérations gazières ;
- La collaboration et la communication efficaces entre les différentes parties prenantes de l'industrie gazière, y compris les producteurs, les transporteurs, les distributeurs et les régulateurs, sont essentielles pour mettre en œuvre avec succès des stratégies d'optimisation basées sur l'algorithme Bellman-Ford.

*Chapitre I : Présentation de la
SONATRACH et le projet ISG*

Chapitre I : Présentation de la SONATRACH et le projet ISG

Introduction

Dans ce chapitre, je me propose de présenter brièvement la SONATRACH et ce en abordant son histoire, ses activités, sa mission, ses divisions. Ensuite, je présenterai le projet gazier IN SALAH, qui est un projet commun entre SONATRACH, BRITISH PETROLEUM et EQUINOR.

I.1 Présentation de la SONATRACH

La société nationale des hydrocarbures d'Algérie s'appelle SONATRACH. Elle a été créée en 1963 et son siège se trouve à Alger. En Algérie, la société est chargée de l'exploration, de la production, du transport, de la transformation et de la commercialisation des hydrocarbures. SONATRACH est l'une des plus grandes entreprises d'Afrique et un acteur important du secteur mondial du pétrole et du gaz. Elle opère dans plus de 25 pays, notamment en Asie, en Afrique, en Amérique du Nord et du Sud et en Europe.

La société exerce une grande variété d'activités, telles que la construction de pipelines, la production de gaz naturel liquéfié (GNL), l'exploration et la production de pétrole et de gaz. Elle s'enorgueillit d'un vaste réseau de pipelines, dont un gazoduc qui passe par le Maroc pour relier l'Algérie à l'Espagne.

Afin de renforcer sa position sur le marché mondial, elle a également conclu un certain nombre d'accords stratégiques avec des sociétés pétrolières et gazières étrangères.

Dans l'ensemble, SONATRACH est un acteur important du secteur mondial du pétrole et du gaz et une force économique significative en Algérie. Sa capacité à s'adapter à l'évolution des conditions du marché, à maintenir des processus de gouvernance et de conformité solides et à gérer avec succès ses partenariats et ses relations avec les parties prenantes sera déterminante pour la poursuite de son succès¹.

¹ www.Sonatrach.dz; site officielle de la Sonatrach ; consulté le 21 Mars 2023 à 19 :00

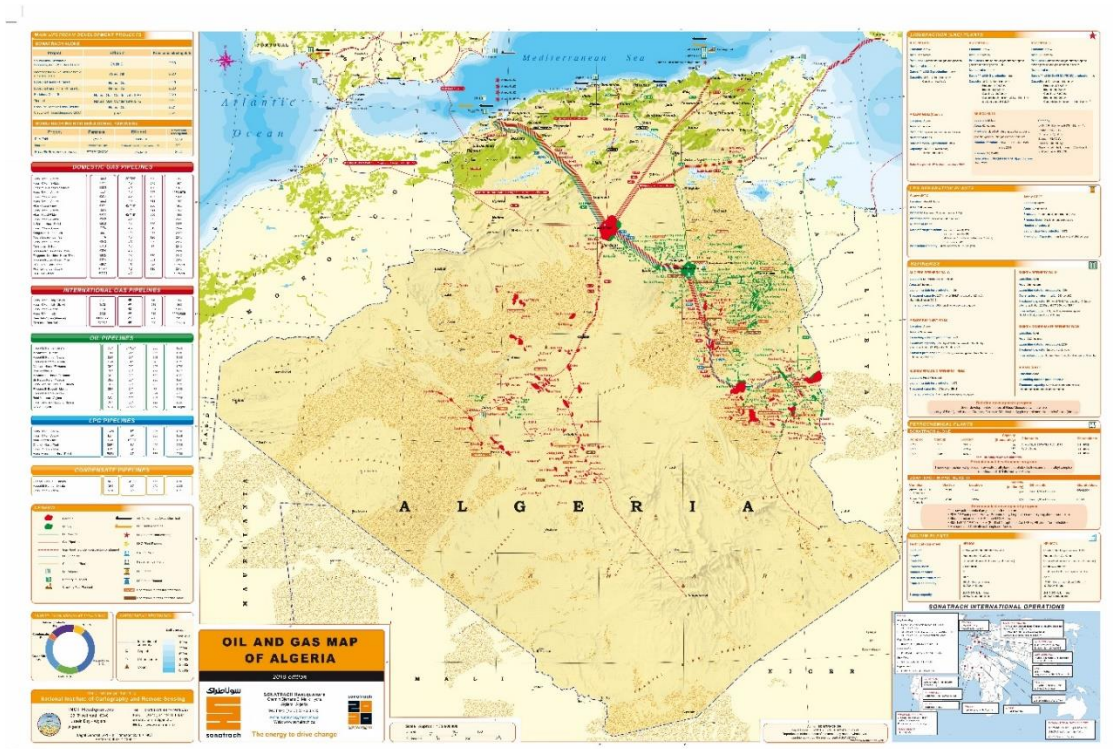


Figure I. 1 Carte du pétrole et du gaz de l'Algérie.

Source : www.Sonatrach.dz; site officielle de la Sonatrach ;

Consulté le 21/03/2023 à 19 :00

I.1.1 Historique

Après l'indépendance de l'Algérie de la France en 1963, l'organisation connue sous le nom de SONATRACH, qui signifie "Société Nationale pour la Recherche, la Production, le Transport, la Transformation, et la Commercialisation des Hydrocarbures", a été créée. À l'époque, la SONATRACH était chargée de superviser les ressources en hydrocarbures du pays, car l'Algérie était un important exportateur de gaz et de pétrole.

Dans les années qui ont suivi, SONATRACH a contribué de manière significative à la croissance de l'économie algérienne et est devenue l'une des plus grandes entreprises d'Afrique. L'entreprise a élargi le champ de ses activités pour englober, entre autres, la production de GNL, de produits pétrochimiques et de produits de raffinage. Pour améliorer sa position sur le marché mondial, elle s'est également associée à des sociétés pétrolières et gazières étrangères².

Malgré son succès, SONATRACH a connu de nombreuses difficultés au fil des ans, notamment des troubles politiques, la chute des prix du pétrole et des accusations de corruption. Ces

² Ibid.

dernières années, l'entreprise a pris des mesures pour résoudre ces problèmes, notamment en améliorant la transparence et la responsabilité et en renforçant ses procédures de gouvernance et de conformité.

I.1.2 Missions

L'objectif de la SONATRACH est de gérer les ressources en hydrocarbures de l'Algérie de manière à ce que la nation et ses citoyens en tirent le meilleur parti. Les principaux objectifs de la société sont les suivants :

- S'assurer que les ressources en hydrocarbures de l'Algérie sont développées de manière durable tout en tenant compte des facteurs sociaux et environnementaux ;
- Maximiser les bénéfices que la population et l'économie algériennes tirent de ses ressources en hydrocarbures ;
- Soutenir l'expansion d'une économie nationale variée contribuera au développement des industries et des entreprises régionales ;
- Pour développer ses opérations et ses compétences, développer et maintenir des collaborations avec des sociétés pétrolières et gazières multinationales ;
- Pour atteindre ces objectifs, SONATRACH a mis en place un certain nombre de projets et de programmes, tels que le "Plan National de Développement des Hydrocarbures" (PNDH), qui vise à créer de nouveaux gisements, à augmenter la production et les réserves, et à faire progresser les techniques d'exploration.³

I.1.3 Activités

Les activités de la SONATRACH couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur du pétrole et du gaz, y compris :

- **L'exploration et la production** : En Algérie, SONATRACH est chargée de l'exploration et de la production d'hydrocarbures. La société gère des actifs onshore et offshore, y compris, entre autres, les champs d'Ourhoud et de Hassi Messaoud. Afin d'explorer de nouvelles zones et d'augmenter la production, elle a également conclu des partenariats avec des sociétés pétrolières et gazières multinationales.
- **Pétrochimie et raffinage** : SONATRACH exploite un certain nombre de raffineries en Algérie, notamment les raffineries de Skikda et d'Arzew, qui ont une capacité quotidienne combinée de 700 000 barils. En outre, elle possède un certain nombre

³ Ibid.

d'installations pétrochimiques qui créent une variété de produits, tels que des plastiques, du méthanol et de l'ammoniac.

- **Commercialisation et transport** : Pour transporter le pétrole et le gaz à l'intérieur de l'Algérie et vers d'autres pays, SONATRACH exploite un vaste réseau de pipelines et d'autres infrastructures. En outre, l'entreprise vend ses produits d'hydrocarbures à des clients en Amérique, en Europe et en Asie.
- **Production de gaz naturel liquéfié (GNL)** : SONATRACH est un important producteur de GNL avec de nombreux projets GNL en Algérie, notamment les usines GNL d'Arzew, de Skikda et de Bethioua. En outre, la société possède des ports d'importation de GNL en Europe, notamment en France et l'Italie⁴.

I.1.4 Divisions

SONATRACH est divisée en plusieurs départements, chacun en charge d'une certaine facette des opérations de l'entreprise. Il s'agit des départements suivants :

- **Division de l'exploration et de la production** : En Algérie, cette division est chargée de l'exploration et de la production de pétrole et de gaz. Elle gère les actifs onshore et offshore, y compris, entre autres, les champs d'Ourhoud et de Hassi Messaoud. En outre, la division supervise les collaborations avec des sociétés pétrolières et gazières étrangères telles que Total, ENI et REPSOL. La division est subdivisée en plusieurs sous-divisions, telles que :
 - Services for Drilling and Wells Division en charge des activités de forage et de maintenance des puits ;
 - La sous-division Ingénierie des réservoirs effectue les études et les analyses des réservoirs afin de maximiser la production ;
 - La division des opérations en surface, chargée de superviser les infrastructures et les installations sur le terrain.
- **Division raffinage et pétrochimie** : Avec une capacité quotidienne totale de 700 000 barils, cette division gère plusieurs raffineries en Algérie, notamment les raffineries de Skikda et d'Arzew. En outre, elle possède un certain nombre d'installations pétrochimiques qui créent une variété de produits, tels que des plastiques, du méthanol et de l'ammoniac. Il existe plusieurs sous-divisions au sein de la division, notamment La division Raffinage, chargée de superviser les opérations de raffinage de l'entreprise

⁴ Ibid.

La sous-division Pétrochimie est chargée de superviser la fabrication de produits pétrochimiques. La gestion des services publics nécessaires aux opérations de raffinage et de pétrochimie relève de cette catégorie.

- **Division des transports :** Cette division est chargée de la gestion du réseau de pipelines et des autres infrastructures de transport de SONATRACH. La division supervise un certain nombre de sous-divisions, telles que :
 - Exploitation des pipelines La gestion du réseau de pipelines et d'autres infrastructures de transport relève de la responsabilité de la division ;
 - Opérationnel Marine La gestion du transport naval du pétrole brut et de la logistique du GNL relève de cette section. La gestion de la logistique des produits hydrocarbures, tant au niveau national qu'international, relève de cette section.
- **Division Marketing :** Ce département est chargé de la promotion des produits hydrocarbures de SONATRACH auprès des clients d'Europe, d'Asie et des Amériques. La division supervise un certain nombre de sous-divisions, telles que :
 - Activités commerciales La gestion des ventes et du marketing des produits d'hydrocarbures relève de cette catégorie ;
 - Commerce et approvisionnement La gestion de l'approvisionnement et du commerce des produits hydrocarbures relève de cette division ;
 - Expédition Chargée de superviser la livraison des produits d'hydrocarbures aux clients.

D'une manière générale, ces divisions coopèrent pour gérer et développer durablement et efficacement les ressources en hydrocarbures de l'Algérie. Grâce à ses activités, SONATRACH est devenue un acteur majeur du marché mondial du pétrole et du gaz et une force vitale de l'économie algérienne⁵.

⁵ Ibid.

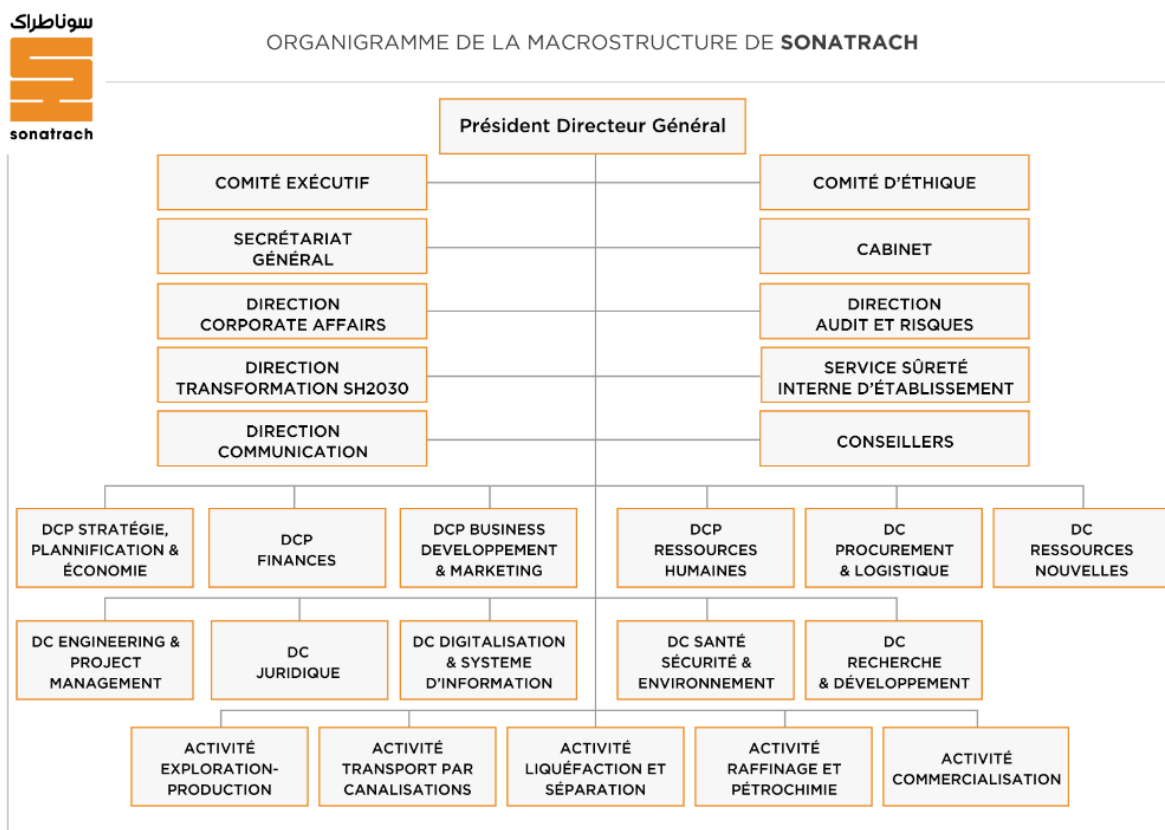


Figure I. 2 Organigramme de la macrostructure de SONATRACH.

Source : Site officiel de la SONATRACH, bilan annuel 2015,

Consulté le 17/03/2023 à 19 :00

I.2 Présentation du Projet In-Salah Gas

Sept (07) gisements de gaz sont en cours de développement dans le cadre du projet gazier d'In Salah, dans le centre de l'Algérie. Le projet est développé par étapes. Le développement des champs nord de Krechba, Teguentour et Reg a constitué la première phase du projet. 22 puits de gaz ont commencé à produire à partir de ces champs en juillet 2004. En 2006, un producteur supplémentaire a été inclus. Un programme de forage à deux engins sur les champs du nord a débuté en 2007. Il s'est achevé en 2012 après le forage de 22 puits supplémentaires produisant du gaz. Fin 2013, la production provenait de 45 puits. Les champs du Nord ne recevront plus de puits. Les trois champs du Nord ont subi une compression au quatrième trimestre 2010. La production brute de gaz s'élevait à 81,7 milliards de mètres cubes standard (Bsm3), soit 2,85 Tcf, au 31 décembre 2013⁶. Le développement des champs sud de Gour

⁶ JV Gas ; Rapport de déplétion 2015 ; consulté le 19/03/2023 à 7 :00 ; p1-p5

Mahmoud, In Salah, Hassi Moumene et Garet el Befinat constitue la deuxième étape du projet, dont l'exécution a commencé en 2016.

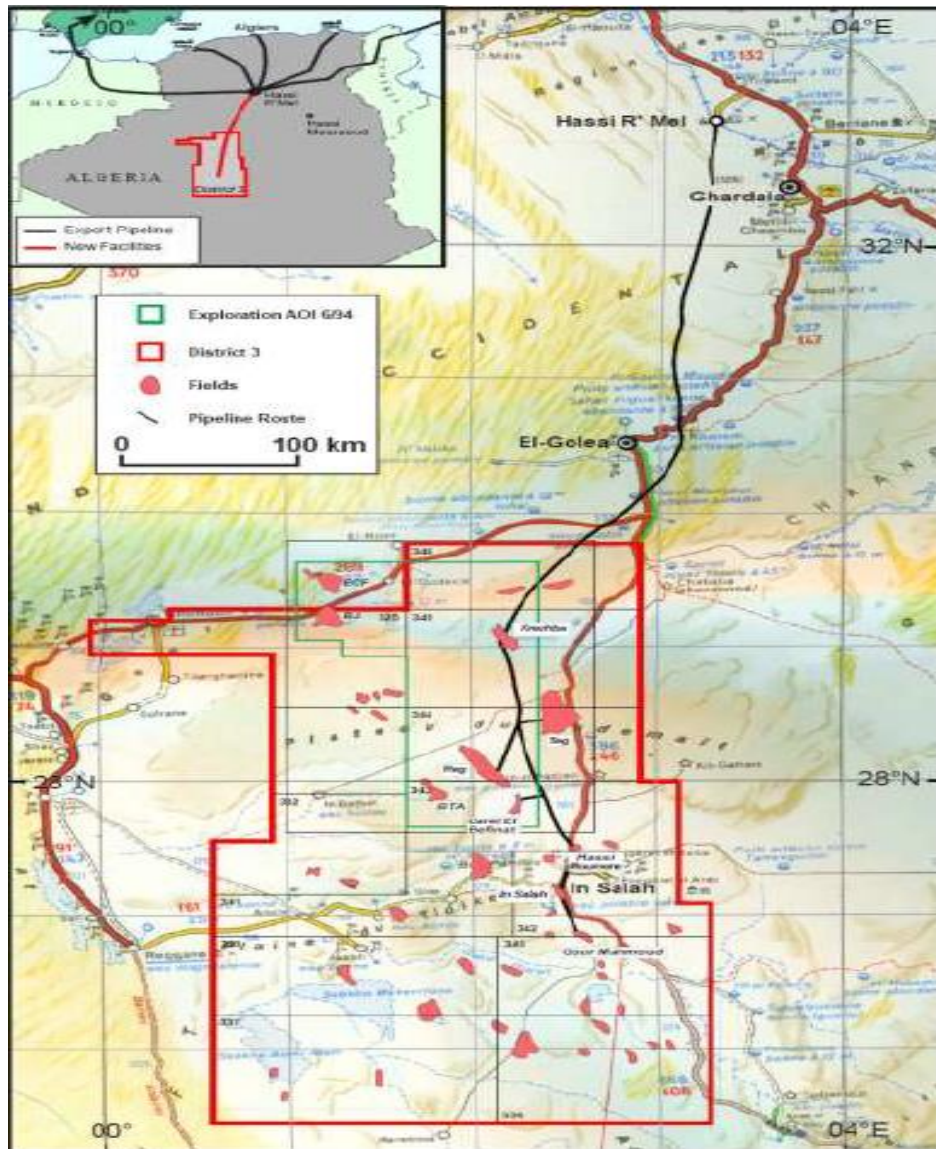


Figure I. 3 Localisation des champs du projet ISG

Source : JV Gas ; Rapport de déplétion 2015 ;
Consulté le 19/03/2023 à 7 :00 ; p6

I.2.1 Missions

Conformément au contrat d'association, un organisme d'exploitation conjoint (JOB) gère le projet. SONATRACH (35 %), BP (33,15 %) et STATOIL (31,85 %) sont les partenaires du projet⁷.

⁷ Ibid.

Les partenaires de l'association commune ont les objectifs suivants :

- Ne pas nuire aux personnes, à l'environnement, ni provoquer d'accidents ou de pertes ;
- Maximiser la valeur pour tous les partenaires pendant la durée de la licence ;
- Augmenter autant que possible la production des champs pendant la durée de la licence.

Sonatrach, BP et STATOIL ont formé une entreprise commune appelée "In Salah Gas Limited" pour vendre le gaz. En Italie, le gaz est vendu à ENEL. Deux contrats sont utilisés pour les ventes de gaz :

- ENEL a initialement conclu un accord pour 4 milliards de mètres cubes contractuels (BCMA) jusqu'en 2017. Les nouveaux montants sont de 3,3 milliards de mètres cubes contractuels pour 2016-17, 2,1 milliards de mètres cubes contractuels pour 2017-18 et 1,6 milliard de mètres cubes contractuels pour 2018-19 ;
- La durée du contrat est en vigueur d'octobre au 2 septembre. Accord de 2019 pour la 5 BCMA (484 mmscf/d). La durée du contrat est de juillet à juin à 15 °C et 1 bara, les conditions volumétriques contractiles, ou Cm³, sont décrites.

La production commerciale de gaz a commencé le 18 juillet 2004 et les ventes de gaz se poursuivront jusqu'au 18 février 2027, date d'expiration de la licence.

I.2.2 Description du projet ISG

a) Première phase

Un développement par étapes était prévu pour le projet Salah Gas. Les champs nord de Krechba, Teguentour et Reg, qui devaient initialement fournir le profil de vente de 9 BCMA, ont été développés dans le cadre de la première phase. Une deuxième phase du projet a été envisagée pour compenser la diminution de la production des champs du nord. Il s'agissait de développer les quatre champs connus collectivement sous le nom de champs du sud - Gour Mahmoud, In Salah, Garet el Befinat et Hassi Moumene - et d'étendre l'oléoduc inter-champs vers le sud.

Bien qu'un certain nombre d'ajustements aient été apportés au nombre et à l'emplacement des puits, aux calendriers de forage, au calendrier du projet, aux hypothèses d'exploitation et aux volumes de vente de gaz nominés, le développement effectif d'In Salah Gas a respecté cette approche de développement par étapes⁸.

⁸ JV Gas ; Rapport de déplétion 2015 ; consulté le 19/03/2023 à 7 :00 ; p6-p30

Pour le gaz initial, vingt-deux (22) puits ont été creusés dans les champs de Krechba, Reg et Teg. Par la suite, ces champs ont fait l'objet d'une compression sur place et de puits supplémentaires pour le développement. À Krechba, un nouveau producteur de gaz a commencé ses activités en 2006. **Rig 19** et **Rig 41** ont été les deux premiers appareils de forage à démarrer un programme en juin 2007.

Avril 2008. Les champs du nord ont vu l'achèvement de 22 puits supplémentaires au cours de ce cycle de forage en 2012. La compression des champs a commencé à Reg et Teg fin 2010 et à Krechba début 2011.

Les installations de la phase 1 sont constituées des éléments suivants : Les installations de traitement de Teg et de Reg, ainsi que les réseaux de collecte de gaz.

Le gaz provenant des champs de Teg et de Reg est séché à l'aide d'un triéthylène dans les installations correspondantes.

Cette procédure est basée sur le glycol. Chaque lieu dispose d'un camp permanent (la base de vie) et les installations sont dotées de personnel.

Reg (24" sur 62 km) et Teg (24" sur 13 km) sont reliés par le système de gazoducs inter champs, qui se poursuit sur une ligne de 38" sur 60 km jusqu'au CPF principal de Krechba.

Les installations de terrain et la collecte de gaz pour le champ de Krechba constituent une partie du CPF de Krechba. Le triéthylène glycol est séché et dépoussiéré dans les installations de traitement du champ à l'aide d'un turbodétendeur.

Les flux de gaz de Krechba, Teg et Reg sont mélangés. Il reste moins de 0,3 % molaire du niveau initial de 1 à 10 % de CO₂. Des installations permettent de réinjecter le CO₂ dans le réservoir carbonifère de Krechba (voir ci-dessous).

Un gazoduc de 48 pouces de diamètre et de 450 km de long est ensuite utilisé pour acheminer le gaz traité vers la MRH. Pour que le gaz puisse entrer dans le système de transport de Sonatrach au CNDG, une station de compression de surpression du gazoduc à la MRH met le gaz sous pression⁹.

⁹ Ibid.

Krechba est l'endroit où le gaz est collecté et traité pour répondre aux spécifications du gaz énumérées dans le tableau suivant :

Tableau I. 1 Spécifications du gaz

Contenu CO2	0.3% mole
Point de rosée de l'eau	Moins de 80 ppm(v)
H2S	Moins de 1.4 ppm(v)
Wobbe	11400 - 12350 Kcal/Cm3
Teneur totale en soufre	Moins de 35 ppm(v)
Valeur calorifique	8700 -9650 Kcal/Cm3
Oxygène	Maximum 0,2% mole

Source : Etablie par nous-même.

La capacité des installations a été calculée sur la base de la quantité contractuelle annuelle (ACQ) de 9 x 10⁹ Cm³ de gaz de vente algérien. Les variables de charge du gaz déterminent le taux horaire maximum (THM). Les contrats de vente sont de 1 184 157 Cm³/h.

La compression des champs est actuellement opérationnelle dans les champs du Nord et a été mise en place en 2010 avec une configuration permettant de prendre en compte les baisses de pression des réservoirs.

b) Deuxième phase

Tous les actionnaires ont approuvé le projet Southern Fields en 2010 et 2011. Le projet est actuellement en phase d'exécution après l'attribution du contrat EPC en 2011. Le plan de développement de Southern Fields présenté dans ce document est le même que celui qui a été affiché à la porte de sanction. La production brute totale de gaz au 31 décembre 2013, soit 2,85 Tcf, était de 81,7 milliards de mètres cubes standard (Bsm³)¹⁰.

Les installations de la phase 2 sont constituées des éléments suivants :

- Le champ de Hassi Moumene sera proche d'un nouveau CPF ;
- Les conduites inter-champs des quatre champs seront des conduites humides de 16 pouces, et du CPF à Reg, il y aura une conduite en acier au carbone de 32 pouces ;
- La capacité de déshydratation à Reg passera à 760 MMscf/d ;
- Une deuxième conduite de 24 pouces sera construite entre Reg et le PIC ;

¹⁰ Ibid.

- La compression n'est pas prévue pour l'instant dans le nouveau CPF, mais elle pourrait être incluse plus tard si nécessaire.

Le projet gazier d'In Salah comprend également un plan de capture et de stockage du carbone (CCS) qui permet de récupérer le CO₂ et de le stocker dans un aquifère d'eau salée. Par conséquent, beaucoup moins de CO₂ est rejeté dans le ciel. Une usine d'amines est utilisée pour éliminer le CO₂ du gaz produit, qui est ensuite pompé dans le réservoir de grès carbonifère de Krechba (la partie aquifère du principal réservoir de production). Trois puits d'injection de gaz sont présents. La figure 2-2 représente schématiquement le plan de CSC de l'EIG. L'injection de CO₂ a été interrompue en mai 2011 pour permettre une période de surveillance¹¹.

Bien que cela puisse être fait plus tard si nécessaire, l'ISG n'a pas l'intention de reprendre l'injection.

I.2.3 Evolution du projet ISG

Les champs on était découvert dans les années suivantes :

Tableau I. 2 Les années de découvertes des champs

Teguentour	1957
In Salah	1957
Krechba	1957
Reg	1962
Garet el Befinat	1983
Gour Mahmoud	1988
Hassi Moumene	1990
Boutraa	1999

Source : Etablie par nous même

Les champs suivants sont utilisés dans la première phase du projet :

- Krechba fournira 25% du gaz. La section la plus cruciale de la stratégie en matière d'installation et de personnel est celle-ci. Chaque responsable travaillera à partir d'un site. Les différentes opérations de production sont : la séparation, la dé-synthèse, la décarbonisation, la compression, la réinjection et l'utilisation. La totalité de la production de gaz de toutes les chambres peut être gérée par la chambre ;

¹¹ Ibid.

- Compte tenu de l'importance du gisement de ce site, Teg produira 50 % de l'ensemble de l'approvisionnement en gaz. Les opérations de séparation et de déshydratation du gaz seront effectuées sur ce site. Le reste des procédures thérapeutiques sera réalisé à Krechba ;
- Reg est comparable à Teg du point d'installation, mais il fournira 25 % de la production totale de gaz ;
- Hassi R'Mel : Tout le gaz produit par les champs précédents y sera transporté par un tuyau de 48 pouces, où il sera comprimé deux fois (à l'aide d'un turbocompresseur) avant d'être libéré. Enfin, ce gaz sera transporté vers le CNDG (centre de dispatching gazier) pour être exporté vers les marchés en expansion du sud de l'Europe.

Après la première phase de production, qui durera cinq ans, la deuxième phase commencera en 2016. Elle sera construite pour maintenir la pression et la production de gaz¹².

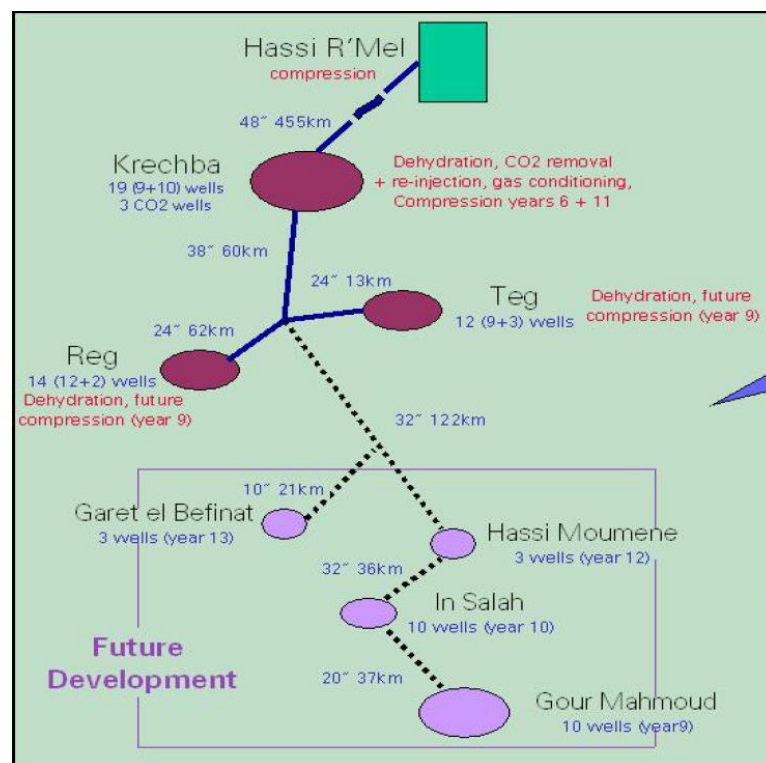


Figure I. 4 Schéma de développement du projet ISG.

Source : JV GAS ; Brochure d'induction 2015 ;

Consulté le 19/03/2023 à 8 :00

¹² Ibid.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de dresser un aperçu clair de la SONATRACH et de sa position en tant que leader national dans le secteur énergétique. Son histoire riche et ses activités diversifiées ont été mises en évidence, révélant une entreprise engagée dans l'exploration, la production et la commercialisation des ressources pétrolières et gazières. De plus, le projet IN SALAH a été présenté comme une collaboration fructueuse entre la SONATRACH et des partenaires internationaux de premier plan, témoignant de la volonté de l'entreprise d'explorer de nouvelles opportunités et de développer des projets d'envergure. La SONATRACH continue ainsi de jouer un rôle crucial dans la dynamique énergétique nationale et internationale, en contribuant au développement économique et en assurant l'approvisionnement en énergie pour le pays.

Chapitre II : Généralités sur le gaz

Chapitre II : Généralités sur le gaz

Introduction

Le gaz naturel est l'une des ressources énergétiques les plus importantes et les plus utilisées dans le monde d'aujourd'hui. Il joue un rôle vital dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et du transport, offrant une source d'énergie polyvalente et relativement propre. Le gaz naturel se forme à partir de matières organiques enfouies dans la terre depuis des millions d'années et est composé principalement de méthane, un hydrocarbure léger. Dans ce chapitre nous allons explorer les généralités du gaz naturel, y compris son origine, ses propriétés, ses utilisations ainsi que ces procédés de traitement.

II.1 Historique

Avec plus de 60 % des réserves récupérables, le gaz naturel est une source d'énergie importante dans le patrimoine énergétique ; c'est pourquoi l'extraction du bassin CHLEF a commencé à la fin des années 1980.

Mais en 1948, un premier puits à GUETERINI (150 km au sud d'Alger) a montré une accumulation de pétrole sur deux couches, à une profondeur comprise entre 100 et 650 mètres. C'est la première découverte commerciale.

En 1950, la région du Sahara méridional du pays a vu l'expansion des activités d'exploitation. Cependant, les réserves pétrolières d'EDJELEH, de Hassi R'mel et d'In Amenas n'ont été découvertes qu'entre 1953 et 1956.

C'est pourquoi l'énergie domestique et commerciale est principalement axée sur le gaz naturel. Environ 95 % des exportations sont absorbées par l'Europe, qui est le marché naturel du gaz algérien. Le gaz joue un rôle crucial dans l'approvisionnement de l'Union européenne, puisqu'il représente environ 30 % des marchandises fournies par des pays tiers¹³.

II.2 L'importance du gaz

Le gaz naturel peut être utilisé de diverses manières dans la vie quotidienne. Il est probable que l'énergie thermique utilisée pour chauffer votre maison, votre bureau ou l'eau de votre bain

¹³ Chikhi Soumia, Mémoire de master de l'université M'hamed Bougara-Boumerdes ; consulté le 20/03/2023 ; p13-p14

soit du gaz naturel. Le gaz peut également avoir été utilisé pour chauffer votre nourriture ou votre café. En outre, il sert de source de carburant pour les automobiles hybrides.

Tout d'abord, le gaz naturel étant un combustible fossile, il est largement utilisé dans le secteur industriel pour la production de vapeur dans de nombreux appareils de chauffage industriels, ce qui rend la distribution publique de gaz très importante dans les secteurs domestiques tels que le chauffage des locaux, la cuisson, etc.¹⁴.

II.3 Définition du gaz brut

Le gaz brut, également appelé gaz naturel, est un mélange d'hydrocarbures à tendance paraffinique (hydrocarbures saturés), principalement composé de méthane (CH₄) et d'éthane (C₂H₆), ce qui lui confère une teneur notable en calories et en combustibilité. Le gaz naturel est utilisé dans l'industrie du verre, de la céramique, du ciment et d'autres industries en plus d'être un combustible. Il est considéré comme une matière première dans l'industrie chimique du pétrole, par exemple le méthane, l'ammoniac, l'engrais, etc.

II.4 Caractéristiques du gaz brut

Les caractéristiques suivantes du gaz brut sont présentes au point de production :

II.4.1 Le pouvoir calorifique

Il s'agit de la quantité totale de chaleur dégagée lors de la combustion d'un mètre cube, d'un kilogramme ou d'une mole de gaz, généralement à une température de 15 degrés Celsius et sous pression atmosphérique. Par conséquent, l'unité de puissance thermique est soit (J/m³), soit (J/kg), soit (J/mol). L'expression "puissance calorifique" fait référence à l'enthalpie de combustion du gaz par unité de volume, de masse ou de mole à 15 degrés Celsius¹⁵.

- **Le pouvoir calorifique supérieur (P.C.S)**

Si l'eau libérée lors de la combustion prend la forme d'un liquide, il s'agit du pouvoir calorifique calculé ou mesuré du gaz.

- **Le pouvoir calorifique inférieur (P.C.I)**

Si l'eau libérée lors de la combustion prend la forme d'une vapeur, il s'agit du pouvoir calorifique calculé ou mesuré du gaz. En analysant le schéma de combustion d'un hydrocarbure

¹⁴ Ibid.

¹⁵ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p1-p2

basé sur les réactions et en supposant que la combustion libère (n) moles d'eau, il est possible de déterminer la relation entre le (P.C.S) et le (P.C.I) :

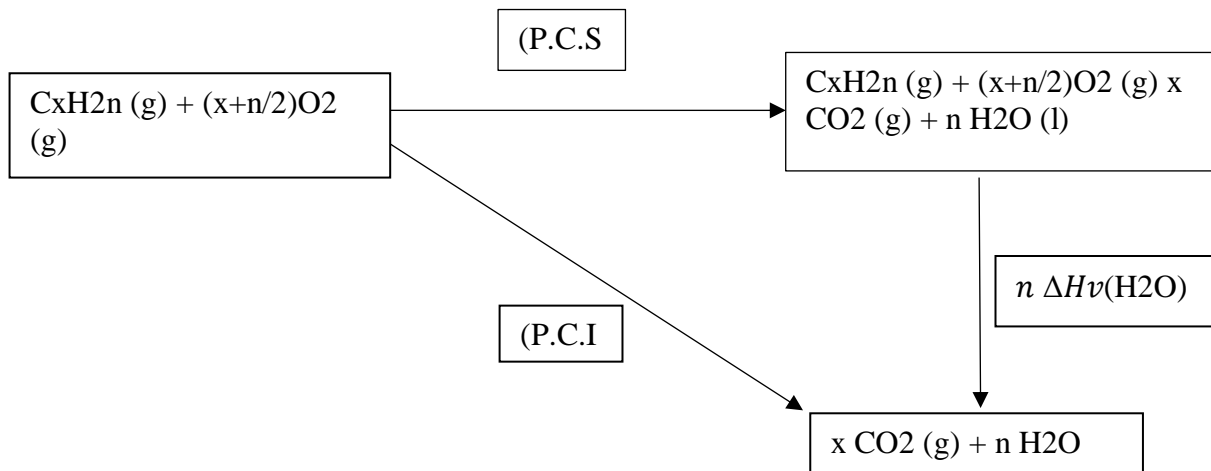


Figure II. 1 Relation entre P.C.S et P.C.I

Source : Etablie par nous-même.

Puisque le (P.C.S) et le (P.C.I) sont des chaleurs dégagées, alors il est évident que :

(P.C.S) < 0 et (P.C.I) < 0. D'un autre coté on a : (ΔHv) > 0, alors d'après le schéma réactionnel ci-dessus il vient :

$$(P.C.I) = (P.C.S) + n(\Delta H_v)(H_2O) \quad \text{II.1}$$

On peut écrire l'équation précédente d'une autre façon en utilisant l'enthalpie de condensation de l'eau au lieu de son enthalpie de vaporisation, or : (ΔHvap) = (-ΔHcond), alors il vient ¹⁶:

$$(P.C.S) = (P.C.I) + n(\Delta H_{cond})(H_2O) \quad \text{II.2}$$

II.4.2 La composition chimique

Elle représente le pourcentage d'éléments et de composés dans le gaz et est utilisée pour étudier la vaporisation, calculer le poids moléculaire et déterminer diverses autres propriétés

¹⁶ Ibid.

qui dépendent de la pression et/ou de la température, telles que la compressibilité, la densité, etc...

La composition du gaz peut aussi être donnée en fractions massiques des constituants¹⁷.

II.4.3 La densité

La relation entre la masse d'un volume de gaz et la masse d'un volume d'air mesurée sous la même pression et à la même température est connue sous le nom de densité d'un gaz. Le rapport entre la masse volumétrique du gaz et celle de l'air à la même pression et à la même température peut également être utilisé pour décrire la densité du gaz.

La densité du gaz est donc :

$$D(\text{gaz}) = \frac{\rho(\text{gaz})}{\rho(\text{air})} \quad \text{II.3}$$

Dans les conditions normales (0°C et 1 atm), on a : $\rho(\text{air}) = 1,29 \text{ g/L}$. La masse volumique du gaz peut aussi être exprimée par la relation suivante, en introduisant le facteur de compressibilité (Z) dans l'équation d'état des gaz parfaits :

$$\rho(\text{gaz}) = \frac{P.M(\text{gaz})}{Z.R.T} \quad \text{II.4}$$

Pour 1mole d'un gaz quelconque y compris l'air prise aux conditions normales, le volume molaire est de 22,4 L ; alors le rapport des masses volumiques se réduit à un rapport de masses molaires puisque les volumes sont égaux, alors la densité devient :

$$D(\text{gaz}) = \frac{M(\text{gaz})}{M(\text{air})} = \frac{M(\text{gaz})}{29} \quad \text{II.5}$$

¹⁷ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p2-p3

II.4.4 La masse molaire moyenne

Soit (n) le nombre total de constituants du gaz, (M_i) et (x_i) sont respectivement la masse molaire et la fraction molaire de chaque constituant, la masse molaire moyenne du gaz est calculée par la relation suivante¹⁸ :

$$M(\text{gaz}) = \sum_{i=1}^n x_i M_i \quad \text{II.6}$$

II.5 Origine des constituants

La variété des origines du gaz, ou autrement dit son gisement, est à l'origine de ses différentes compositions, comme suit :

II.5.1 Le gaz bactérien ou biochimique

C'est l'action des bactéries sur les débris organiques (animaux et végétaux) qui s'accumulent dans les sédiments qui est à l'origine du mode ou du mode de développement du gaz bactérien, également appelé gaz biochimique. La plupart du temps, ces bactéries provoquent la création de sulfure d'hydrogène (H_2S), qui est un composant du gaz brut. Ce type de gaz est appelé "gaz impropre" ou "gaz sale" car il contient du soufre.

II.5.2 Le gaz thermique

À mesure que les bassins sédimentaires évoluent dans le temps, les animaux et les plantes exposés à des températures et à des pressions élevées subissent une dégradation thermique qui produit une petite gamme de composés non hydrocarbonés tels que N_2 , CO_2 , H_2O et d'autres substances. Le sulfure d'hydrogène (H_2S) est rarement ou pas du tout perceptible dans ce gaz¹⁹.

II.6 Les différents types de gaz naturel

On peut différencier les types de gaz suivants car l'émergence d'une phase liquide associée au gaz dépend des conditions de pression et de température dans le réservoir et à la surface.

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p4

II.6.1 Le gaz sec

Ce type de gaz ne forme pas de phase liquide lors de la production car il comprend une forte proportion de méthane (CH₄) et très peu d'autres hydrocarbures plus lourds que l'éthane (C₂H₆).

II.6.2 Le gaz humide

Ce type de gaz est moins concentré en hydrocarbures légers et développe une phase liquide (eau et/ou condensat) lors de la production dans des conditions de surface où il y aura des réductions de pression et/ou de température.

II.6.3 Le gaz à condensats

Dans le réservoir, ce type de gaz se condense en une phase liquide (eau et/ou condensat) et, au fur et à mesure de la production, la phase condensée devient plus riche en éléments lourds.

II.6.4 Le gaz associé

Ce dernier type de gaz est généralement présent dans les gisements de pétrole et coexiste avec la phase pétrolière dans le réservoir, soit sous forme libre (gaz de couverture), soit sous forme dissoute dans la phase pétrolière. Une fois que le pétrole brut a subi une distillation atmosphérique, le gaz dissous est récupéré²⁰.

II.7 Procédés du Traitement du gaz brut

Le traitement du gaz naturel consiste à séparer au moins partiellement certains des composants libérés par les puits, tels que l'eau, le gaz acide et les hydrocarbures lourds, afin d'amener le gaz à des spécifications transportables ou commerciales²¹.

La répartition de ces traitements entre les points de production et de livraison est basée sur des considérations économiques. Les spécifications auxquelles le gaz traité est soumis dépendent de la manière dont le gaz sera utilisé (gaz commercial). À moins que des conditions de production extrêmement difficiles ne nécessitent peu de traitement sur le site de production, le gaz est souvent traité dès le point de production afin de répondre immédiatement aux spécifications commerciales.

²⁰ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p4-p5

²¹ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p6

La chaîne de traitement du gaz naturel comprend un certain nombre d'étapes depuis la tête de puits jusqu'à l'exploitation commerciale, en fonction de la nature du gaz (composition H₂S, CO₂, COS, mercaptans, hydrocarbures lourds, aromatiques, etc.), des conditions de disponibilité (température, pression, débit), de l'objectif d'application (GNL ou non) et des spécifications imposées par l'objectif d'application, mais aussi spécifiques à chaque pays. Par conséquent, les critères techniques et économiques doivent être pris en compte lors du choix d'une technologie.

Les principaux processus mis en œuvre sont représentés schématiquement dans la figure :

Dans un premier temps, les fractions liquides d'hydrocarbures (associées au gaz ou condensées) et l'eau libre peuvent être séparées des autres liquides pouvant être présents dans l'effluent des pompes.

L'étape de traitement suivante dépend du mode de transport choisi.

Le gaz naturel et ses nombreuses fractions peuvent être transportés de différentes manières.

- Gaz naturel comprimé (transporté par les gazoducs) ;
- GNL, ou Gaz Naturel Liquéfié ;
- GPL, ou Gaz de Pétrole Liquéfié ;
- Sous-produits chimiques (tels que l'urée, l'ammoniac et l'alcool méthylique).

Ces différentes formes de transport impliquent, comme le montre la figure, une série d'étapes et forment une chaîne gazière²².

²² Rojey Alexandre, Le gaz naturel de la production aux marchés ; 2013 ; Edition Technip Paris ; consulté le 25/03/2023 à 9 :00 ; p10-p13

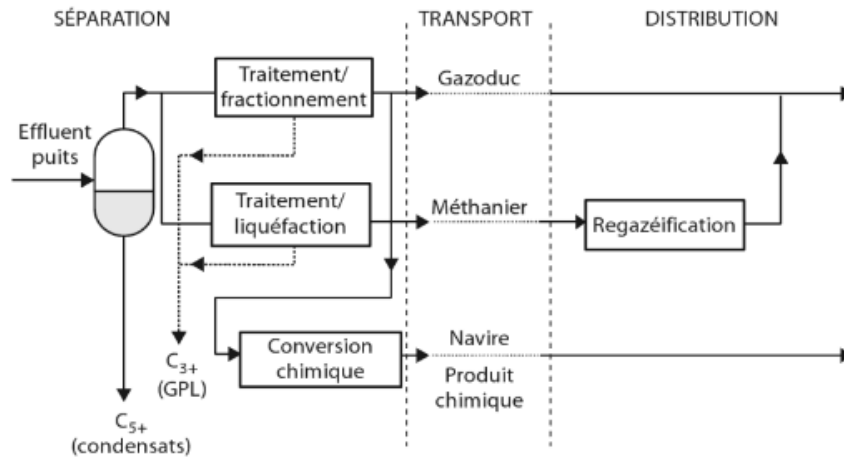


Figure II. 2 Les processus du traitement

Source : Rojey Alexandre, Le gaz naturel de la production aux marchés ; 2013 ; Edition Technip Paris ; consulté le 25/03/2023 à 9 :00 ; p10

Les différents composants que contient le gaz naturel doivent être pris en compte lors de l'examen de ce dernier. En fait, certains de ces composants doivent être éliminés afin de répondre aux exigences en matière de manutention et de transport du gaz, ainsi qu'aux spécifications commerciales et réglementaires.

Si l'on utilise un gazoduc, il est important de respecter les spécifications de transit qui empêchent l'accumulation de liquides tels que les hydrocarbures ou l'eau, ainsi que les blocages d'hydrates dans le gazoduc et la corrosion excessive. Pour ce faire, des valeurs maximales sont fixées pour les points d'eau rosée et d'hydrocarbures. Selon les conditions de transport, il est possible de fixer le point d'ébullition des hydrocarbures à 0 °C afin d'éviter la formation d'une phase liquide par condensation rétrograde.

Avant de transporter du gaz sur de longues distances, quelle que soit la situation, il faut l'adapter aux spécifications commerciales. C'est pourquoi le traitement approprié est généralement mis en œuvre dès que possible²³.

Les exigences de qualité dans le secteur commercial sont strictes et rigoureuses. La plage de tolérance calorique est l'une des normes imposées. Si nous prenons l'exemple du gaz commercial, les spécifications actuelles sont indiquées dans le tableau 1 ci-dessous. Pour offrir le plus haut niveau de performance et de sécurité aux utilisateurs financiers, il est essentiel de

²³ Ibid.

respecter ces spécifications. Par conséquent, les entreprises sont tenues de vérifier que leurs produits, avant d'être mis sur le marché, répondent à ces exigences.

Tableau II. 1 Les processus de traitement

Pouvoir calorifique supérieur PCS (kJ/m³(n))	39100 a 39500
Point de rosée HC	Inf. a -6⁰c
Teneur en eau	Inf. a 150-ppm vol.
Teneur en C₅₊	Inf. a 0.5% mol.

Source : Rojey Alexandre, Le gaz naturel de la production aux marchés ; 2013 ; Edition Technip Paris ; consulté le 25/03/2023 à 9 :00 ; p13

En termes de traitement des gaz, la concentration en H₂S doit être maintenue à un niveau extrêmement bas, souvent entre 2 et 20 mg/m³ (st). Une spécification typique en unités métriques anglaises est de 0,25 grains par 100 Scft, soit environ 6 mg/m³ (st) ou 4 ppm. Lorsque cela se justifie d'un point de vue économique, le traitement peut être couplé à un fractionnement destiné à séparer le GPL (propane, butane), et éventuellement l'éthane.

La production de GPL et de condensat dans le cas d'un gaz associé ou d'un gaz à condensation est souvent plus rentable que la production du gaz associé seul. Cette stratégie de fractionnement permet une meilleure évaluation des ressources²⁴.

La liquéfaction du gaz naturel nécessite un traitement préalable afin d'éliminer tout risque de cristallisation dans les échangeurs de l'unité de liquéfaction. Dans le cadre du processus de liquéfaction, il est également courant de séparer les hydrocarbures les plus lourds du méthane. Cette étape permet de récupérer les fractions GPL et condensat, qui peuvent être expédiées séparément. Le gaz obtenu après gazéification du GNL à l'arrivée au terminal de réception peut, en théorie, être directement injecté dans le réseau de distribution. Cependant, si le gaz subit une conversion chimique, le prétraitement doit être adapté au type de conversion effectué. En particulier lors de l'utilisation de catalyseurs, des spécifications très rigoureuses sont souvent exigées. Pour garantir la qualité du produit gazeux et la sécurité des utilisateurs finaux, il est crucial de mettre en place un traitement approprié²⁵.

²⁴ Ibid.

²⁵ Ibid.

II.7.1 Le procédé PRITCHARD

Avec l'utilisation d'une boucle de propane (C_3H_8) comme fluide frigorigène, il est basé sur le refroidissement du gaz par échange de chaleur et détente directe pour atteindre des températures d'environ $-23^{\circ}C$ en fin de cycle.

Les quatre étapes présentées dans le diagramme ci-joint constituent la base du principe de fonctionnement du processus :

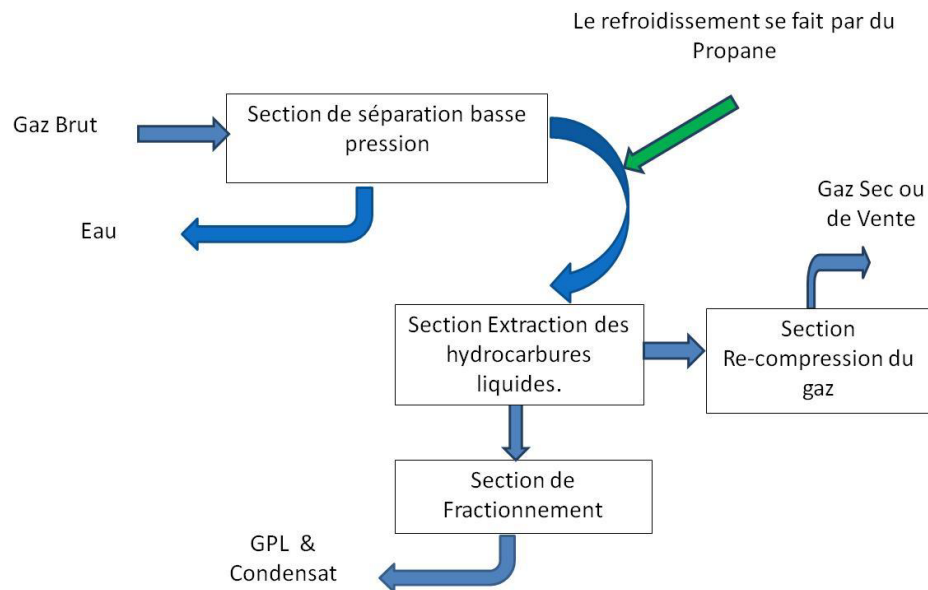


Figure II. 3 procédé de PRITCHARD

Source : Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ;

Consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p6

II.7.2 Le procédé HUDSON

Il est basé sur le refroidissement du gaz par échange de chaleur et se termine par une expansion à travers un dispositif dynamique appelé TURBO-EXPANDER, qui lui permet d'atteindre un niveau de température proche de $-50^{\circ}C$ ²⁶.

Le schéma suivant montre les quatre étapes qui constituent le principe de fonctionnement du processus :

²⁶ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p6-p7

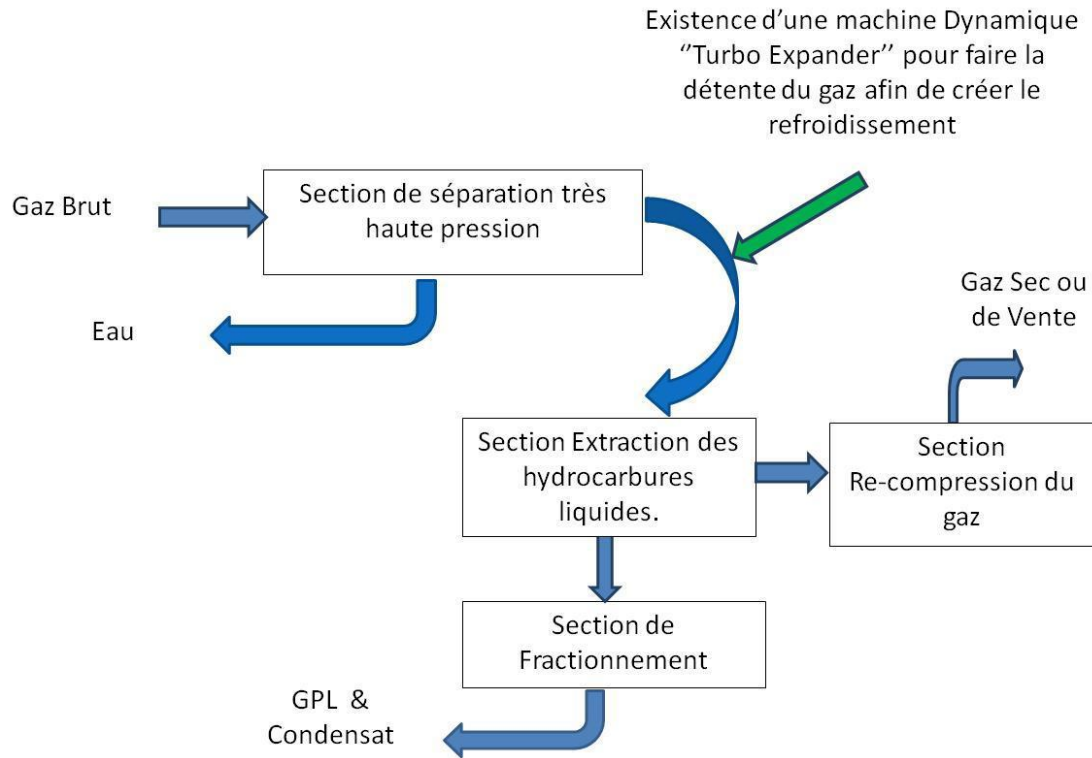


Figure II. 4 Procédé HUDSON

Source : Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p7

II.7.3 Procédés mixtes

Ces procédures sont les plus populaires car elles combinent les procédures PRITCHARD et HUDSON. En plus d'une boucle de propane pour le refroidissement, elles utilisent un détendeur Joule-Thomson et une machine dynamique (TURBO-EXPANDER) pour atteindre des températures plus basses de -66°C . Ces procédures permettent de séparer plus efficacement le gaz de ses contaminants²⁷.

II.7.4 Décarbonatation

Le gaz naturel est généralement accompagné de gaz acides qui sont nocifs. Le sulfure d'hydrogène (H_2S) est particulièrement corrosif et constitue l'un des poisons les plus dangereux pour les catalyseurs, notamment les adsorbants. Le dioxyde de carbone (CO_2) est également corrosif et peut former des hydrates carboniques au contact de l'eau ($\text{CO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ce qui peut

²⁷ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p7

obstruer les canalisations et/ou les équipements. La décarbonatation est le terme utilisé pour décrire l'élimination du dioxyde de carbone²⁸.

En lavant le gaz naturel avec une solution d'amine dans un absorbeur à contre-courant, les gaz acides sont éliminés. Il existe deux types de solutions :

- **La mono-éthanol-amine (M.E.A)** : (OH-C₂H₄-NH₂) est utilisée sous forme d'une solution diluée de 15 {20% massique par l'eau distillée}.
- **La di-éthanol-amine (D.E.A)** : (OH-C₂H₄)₂-NH est utilisée sous forme d'une solution diluée de 20 {30% massique par l'eau distillée}.

L'utilisation de l'M.E.A n'est pas conseillée lorsque le gaz à traiter n'est pas approprié (contient des composés soufrés) car cette technologie est sensible aux produits soufrés, en particulier le COS et le CS₂, qui, avec l'M.E.A., sont des produits chimiques non renouvelables.

Étant donné que la (D.E.A.) n'est pas utilisée correctement dans cette situation et que la (M.E.A.) est de mauvaise qualité, il faut utiliser des produits chimiques non renouvelables formés avec la (M.E.A.).

- **Comparaison de la quantité de (M.E.A.) à celle de (D.E.A.) :**

La mousse associée à l'M.E.A. diminue les phénomènes d'absorption, ce qui est un autre problème. D'une manière générale, la solution d'amine est corrosive ; la corrosion est fréquemment observée près du sommet de la colonne d'absorption, dans l'échangeur de chauffage ou de refroidissement de la solution d'amine.

Pour éviter ou résoudre les problèmes cités auparavant on doit :

- La concentration en (M.E.A) ne doit pas dépasser 20 % en masse ;
- Utiliser de l'eau purifiée pour diluer la solution d'amine forte afin d'éviter les problèmes de sel ;
- Pour éviter que l'amine ne se dégrade pendant la désorption (régénération), maintenez la température basse ou travaillez sous faible pression ;
- Pour éviter la formation de mousse, il faut surveiller la quantité de solution d'amine utilisée et l'efficacité du régénérateur ;
- Pour éviter la condensation des hydrocarbures lourds, augmenter la température de l'absorbeur ;

²⁸ Rojey Alexandre, Le gaz naturel de la production aux marchés ; 2013 ; Edition Technip Paris ; consulté le 25/03/2023 à 9 :00 ; p24-p26

- Dans le circuit de la solution d'amine, utiliser des filtres ;
- Injecter occasionnellement du silicone comme agent anti-mousse.

II.7.5 Déshydratation

La déshydratation est un processus qui consiste à éliminer les molécules d'eau liquide ou de vapeur du gaz par des procédés physiques ou chimiques. Pour éviter les problèmes suivants²⁹ :

- Le risque de corrosion des conduites, en particulier en présence de gaz acides comme le CO₂ et le H₂S ;
- La possibilité de formation d'hydrates, qui peuvent obstruer les conduites et les installations industrielles et de transport ;
- L'augmentation de la chute de pression et de l'écoulement diphasique ;
- Risque de solidification par procédé cryogénique ;
- Une diminution du pouvoir calorifique du gaz.

II.8 Les hydrates du gaz naturel

II.8.1 Nature et structure

Les hydrates sont des substances solides dans lesquelles l'eau et les hydrocarbures sont liés chimiquement et physiquement. Les hydrates sont des cristaux semblables à de la neige qui flottent sur l'eau et ont une densité de 800 à 900 kg/m³. Les hydrates peuvent être considérés comme des solutions de gaz dans des solides cristallins en raison de leur structure unique.

En fonction de la taille des molécules d'hydrocarbures, les hydrates attachent un nombre spécifique de molécules d'eau à un hydrocarbure donné. Lorsque des conditions thermodynamiques spécifiques de pression et de température sont remplies, les hydrates peuvent se développer³⁰.

Ceci explique leur formation lorsque le gaz subit une expansion isenthalique (expansion de Joule-Thomson). La présence de petites particules agissant comme germes de cristallisation, comme les microcristaux d'hydrates, ainsi que de particules solides (poussières, oxydes de corrosion). En général, il est favorisé par des éléments qui rendent l'écoulement plus turbulent, tels qu'une vitesse d'écoulement élevée, des pulsations de pression et tout type de perturbation.

²⁹ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p13

³⁰ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p14

Les principales formules chimiques des hydrates de gaz naturel sont :

- $\text{CH}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$;
- $\text{C}_2\text{H}_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$;
- $\text{C}_3\text{H}_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$;
- $\text{CO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Le méthane, l'éthane, le propane et l'isobutane sont quelques-uns des principaux hydrocarbures qui composent le gaz naturel et qui, en présence d'eau, créent des hydrates. Le butane ordinaire ne s'hydrate qu'à des températures inférieures à 1°C. L'hexane et le pentane ne sont pas des hydrates prouvés. L'existence d'hydrates d'hexane et de pentane n'a pas été prouvée.

II.8.2 Prévention des hydrates

Comme les hydrates ne peuvent se développer que lorsque de l'eau liquide entre en contact avec du gaz, toute action visant à stopper la formation de ces hydrates implique³¹ :

- Des procédés technologiques pour augmenter la température des gaz résiduels ou des procédés mécaniques pour éliminer l'eau ;
- L'utilisation de composés solubles dans l'eau ;
- Les alcools et autres composés qui abaissent le point de congélation de l'eau peuvent être ajoutés à un gaz sous une certaine pression pour abaisser la température à laquelle se produit la formation d'hydrates ;
- Les composants qui affectent la structure du système, comme l'ammoniac ;
- Les sels qui, lorsqu'ils sont dissous, réduisent son activité.

II.8.3 Les méthodes de déshydrations

La présence d'eau est à l'origine de nombreux problèmes de fonctionnement : La vapeur d'eau peut se condenser, geler ou accélérer la corrosion en fonction des conditions de température et de pression présentes dans une installation. Cela est particulièrement vrai si le gaz contient des composants acides. En utilisant les méthodes de traitement appropriées, la teneur en eau du gaz doit être réduite afin d'éviter ce phénomène. Différentes méthodes sont utilisées pour déshydrater le gaz naturel³².

- L'absorption ;
- L'adsorption ;

³¹ Ibid.

³² Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p7

- La perméation gazeuse.

a) Pré-déshydratation par refroidissement du gaz

Lorsque la pression ou la température augmente, la teneur en eau du gaz naturel au point de saturation diminue. Par conséquent, avant une procédure d'adsorption ou d'absorption, la compression et/ou la réfrigération sont généralement utilisées comme étape de déshydratation préalable³³.

- Méthode utilisée pour contrôler simultanément les points de rosée (eau-hydrocarbures) du gaz naturel.
- Méthode également préconisée en amont d'un autre procédé de déshydratation.

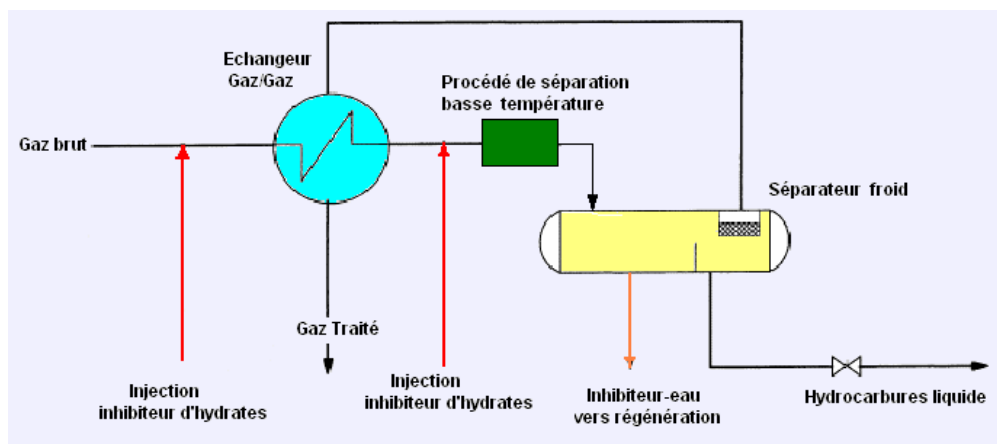


Figure II. 5 Pré-déshydratation

Source : Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ;

Consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p15

b) Déshydratation par absorption

La récupération des fractions lourdes présentes dans le gaz se fait par le processus d'absorption, qui entraîne un transfert partiel ou complet des fractions lourdes de la phase gazeuse à la phase liquide. Le gaz inférieur et le glycol supérieur d'une colonne d'absorption sont ensuite mis en circulation à contre-courant dans le cadre de la procédure d'absorption. L'eau est absorbée par le glycol lorsqu'elle passe à travers les plaques de la colonne.

Les propriétés recherchées pour le solvant sont les suivantes :

- Grande affinité pour l'eau ;
- Coût réduit ;
- Caractère non corrosif ;

³³ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p15-17

- Stabilité {l'égard des hydrocarbures} ;
- Stabilité thermique ;
- Régénération facile ;
- Viscosité réduite ;
- Faible tension de vapeur à la température de contact ;
- Une solubilité réduite dans les hydrocarbures ;
- Faible tendance au moussage et {la formation d'émulsion} ;
- Cinétique d'adsorption rapide ;
- Faible perte de charge ;
- Résistance à l'attrition ;
- Inertie chimique ;
- Pas d'effets de dilatation de volume avec la température et la saturation.

c) Déshydratation par perméation gazeuse (membrane)

La récupération des fractions lourdes présentes dans le gaz se fait par le processus d'absorption, qui entraîne un transfert partiel ou complet des fractions lourdes de la phase gazeuse à la phase liquide. Le gaz inférieur et le glycol supérieur d'une colonne d'absorption sont ensuite mis en circulation à contre-courant dans le cadre de la procédure d'absorption. L'eau est absorbée par le glycol lorsqu'elle passe à travers les plaques de la colonne.

Ce type d'opération est représenté sur la figure. En réalité, un module est créé en intégrant les membranes à un support. Dans ce diagramme, le flux qui traverse la membrane est appelé perméat et le flux que la membrane retient est appelé rétentat. Le pourcentage du flux entrant qui traverse la membrane est appelé taux de conversion, et la différence de pression entre le flux entrant et le flux de perméat génère la force motrice de la séparation³⁴.

³⁴ Ibid.

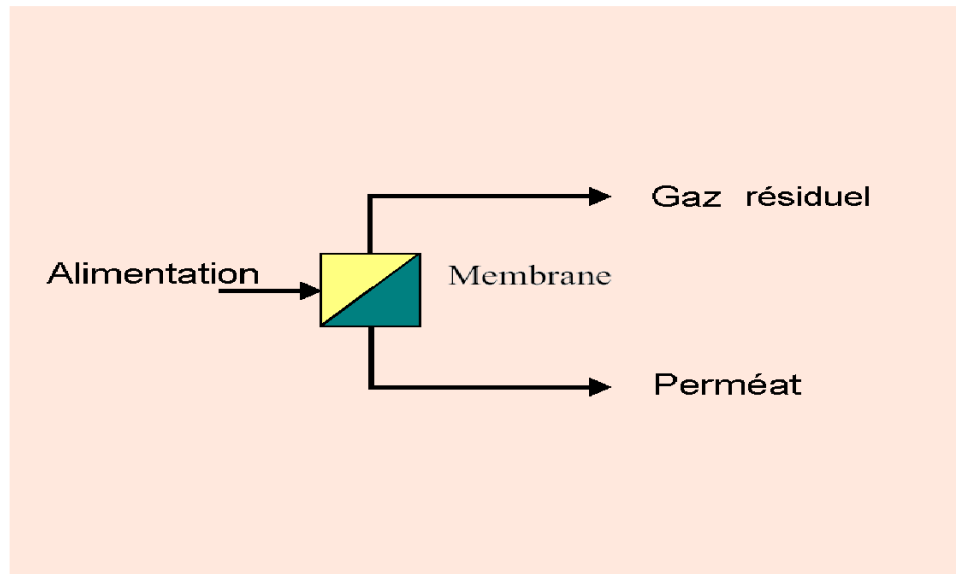


Figure II. 6 Déshydratation par perméation gazeuse (membrane)

Source : Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ;

Consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p17

d) Déshydratation par adsorption

Lorsque les molécules d'un courant de fluidisation entrent en contact avec une surface solide, des forces qui dépendent des propriétés chimiques et physiques des molécules solides et gazeuses retiennent les molécules à la surface. La principale cause de cette connexion, une adsorption, est la force de Van der Waal. Cette adsorption peut avoir une épaisseur de plusieurs molécules³⁵.

L'eau est adsorbée sur un adsorbant commercial à une épaisseur maximale de deux à trois molécules. Par conséquent, une grande surface est nécessaire pour obtenir une capacité d'adsorption élevée. La composante essentielle de tout adsorbant commercial efficace est la surface. Certains adsorbants commerciaux peuvent contenir jusqu'à 318 litres d'eau par m³ et ont une surface de 800 m²/g.

La condensation capillaire, qui est la propension des forces d'adsorption à se concentrer au niveau des pores, est un autre phénomène associé à l'adsorption. Plus le diamètre du pore se rapproche du diamètre de la molécule à adsorber, plus ces forces se renforcent. La taille des molécules à adsorber, à partir de l'idée du diamètre critique, qui constitue un critère important pour savoir si une molécule peut ou non passer à travers l'ouverture des pores et pénétrer dans la structure cristalline, est un mécanisme supplémentaire que les tamis moléculaires ajoutent.

³⁵ Ibid.

Seules les molécules dont le diamètre critique est inférieur ou égal au diamètre des pores peuvent traverser les pores des différents types de tamis moléculaires.

Plus la molécule est polaire et insaturée, plus elle sera présente dans le cristal. Il en va de même pour son degré d'insaturation.

- **Les types d'adsorption**

Il existe deux types d'adsorption, l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

- **L'adsorption physique**

Les forces de Van Der Waal, dont l'impact ne s'étend que sur de très faibles distances de la surface, sont à la base de l'adsorption physique. Selon le principe de LE CHATELIER, la réaction étant ici toujours exothermique, le volume du gaz adsorbé diminue au fur et à mesure que la température augmente et devient pratiquement nul dès qu'il atteint 100 °C³⁶.

- **L'adsorption chimique**

Elle est équivalente aux liaisons chimiques réelles qui se forment lorsque des électrons sont transférés entre les molécules à l'interface de deux phases. Ces liaisons sont covalentes, mais elles ont un faible potentiel de polarisation.

Une élévation de la température combinée à un pompage permet de récupérer ces gaz. Le phénomène ne se manifeste souvent qu'à haute température (200°C), et ils ne deviennent réversibles qu'à des températures encore plus élevées, ce qui s'explique par la production de ces liaisons chimiques.

Les isothermes de chimie-sorption ressemblent à l'isotherme d'adsorption physique. L'hypothèse de la couche mono-moléculaire de LANGMUIR a été la première à expliquer la sorption chimique. Il serait plus juste de parler de couche monoatomique, de liaisons formées entre atomes et ions, ou de radicaux car elle ne rend pas compte des fortes interactions chimiques entre molécules. En revanche, LANGMUIR reconnaît que chaque atome d'une surface solide est un emplacement capable d'ancrer une molécule ou un atome.

³⁶ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p18-20

- **Les procédés d'adsorption**

La figure illustre le schéma d'un procédé de déshydratation par adsorption en lit fixe. Chaque lit passe par une série d'étapes d'adsorption et de désorption, le processus fonctionnant de manière alternée et périodique. Le gaz à traiter est placé sur le lit d'adsorbant pendant l'étape d'adsorption, qui fixe l'eau. Le gaz chaud est délivré pour reconstituer l'adsorbant une fois que le lit est saturé.

Le lit doit être refroidi après la régénération et avant la deuxième étape d'adsorption. Pour ce faire, il faut fournir du gaz froid. Le même gaz peut être utilisé pour la régénération après le réchauffement. Dans ces conditions, quatre lits sont en fait nécessaires, avec deux lits travaillant en adsorption, un lit en refroidissement et un lit en régénération en même temps. Dans certains cas, il est crucial d'utiliser la plus grande partie possible du lit afin d'éviter l'utilisation d'adsorbants coûteux ou de réduire la taille de l'adsorbeur.

Un système à trois lits basés sur un fonctionnement alterné (chargement, régénération et compensation) peut être utilisé pour atteindre cet objectif avec seulement une légère augmentation de la complexité du processus. Figure représente L'ensemble du lit en charge est traversé par la zone de transfert des matériaux, ce qui garantit que le lit est entièrement chargé, avant d'arriver au lit en compensation. À ce moment, le lit de compensation devient le lit chargé, le lit régénéré devient le lit de compensation et le lit chargé entre dans la phase de régénération³⁷.

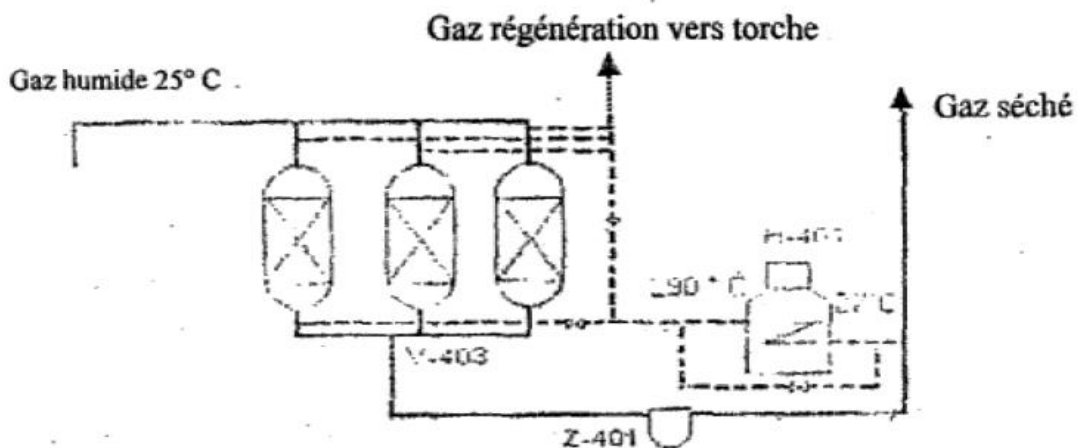


Figure II. 7 Déshydratation par perméation gazeuse (membrane)

Source : Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ;
Consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p23

³⁷ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p20-p23

- **Les adsorbants utilisés (structures et caractéristiques)**

La structure des matériaux adsorbants est incroyablement poreuse. Ils peuvent retenir l'eau et l'humidité dans leurs ouvertures microscopiques, qui sont organisées en couches, pores et canaux en fonction de leurs caractéristiques physiques. L'eau ne dissout pas les adsorbants. Ils libèrent l'humidité retenue lorsqu'ils sont chauffés. Il existe une grande variété d'adsorbants :

- **L'alumine activée**

L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) sous forme d'alumine activée est poreux, amorphe et partiellement hydraté. Il contient également d'autres substances à l'état de traces. Il peut sécher le gaz jusqu'à un point de rosée de $-75^{\circ}C$ (environ 1 ppmv H_2O), mais sa capacité est inférieure à celle du gel de silice. Il a une surface spécifique de (250-350) m^2/g et un volume de pore de (20-30) $cm^3/100g$. Les charges d'eau réelles dans des conditions de fonctionnement dynamiques varient de 50 à 70 % des valeurs indiquées.

Les particules d'alumine activée ont une densité apparente d'environ $833 kg/m^3$ dans les tailles généralement utilisées pour le séchage. Étant donné que le matériau emballé comprend environ 50 % de vide, cela suggère que chaque particule a une densité d'environ 1,6 en fonction du volume total, y compris les pores. Étant donné que les particules d'alumine activée ont une densité de contenu solide d'environ 3,3, les pores devraient occuper environ 50 % du volume de chaque particule.

La teneur en eau résiduelle dans le gaz traité peut être de l'ordre du ppm grâce à l'alumine activée, qui permet d'obtenir des puretés élevées. Bien qu'ils soient adsorbés pendant la régénération, les hydrocarbures lourds ne peuvent pas être désorbés. Par conséquent, le gaz traité doit être dégazé ou séché³⁸.

- **Le Gel de silice (silica-gel)**

Le gel de silice, l'un des adsorbants les plus importants, a un large éventail d'utilisations. Il s'agit d'un type d'acide silicique composé de granules erratiques et poreux. Le volume de ses pores est de (40-50) $cm^3/100g$ et sa surface spécifique varie de (700-850) m^2/g . Le silicate de sodium et l'acide sulfurique constituent la majorité des produits de base. Lorsque ces substances sont exposées à une réaction chimique dans des circonstances spécifiques, un gel de silice à forte teneur en SiO_2 est créé. Tous les composés, à l'exception de l'acide fluorhydrique et des produits chimiques très alcalins, sont compatibles avec le gel de silice. Il n'attaque pas les métaux, n'a pas d'odeur et ne génère pas de fumées. Avec un nombre infini de petits pores

³⁸ Sellami Mohamed Hassen ; Procédés de traitement de gaz ; consulté le 23/03/2023 à 10 :00 ; p23-25

divisant sa très grande surface intérieure, le gel de silice peut adsorber jusqu'à 36% de son propre poids sans subir de changement structurel. Entre 120 et 200°C, le gel de silice se régénère. L'efficacité du gel peut être continuellement rafraîchie sans qu'elle soit diminuée. Environ 10 ppm d'eau sont présentes dans le gaz après l'adsorption sur le gel de silice. En prenant des précautions de sécurité spécifiques lors de son utilisation, il peut être utilisé pour extraire simultanément l'eau et la portion de condensat du gaz traité. Il adsorbe les hydrocarbures, qui sont ensuite désorbés lors de la régénération. L'eau libre dégrade le gel de silice en provoquant la rupture des granules et, en raison de sa nature acide, en réagissant avec les bases³⁹.

Conclusion

L'utilisation du gaz naturel dans le secteur de l'énergie se développe. L'importance de ses réserves et ses avantages environnementaux encouragent son utilisation, en particulier dans des secteurs en pleine expansion comme la fabrication de précision et la production d'électricité.

Le gaz naturel est toujours produit, traité et surtout transporté à des coûts techniques élevés, ce qui constitue un inconvénient. Ce défi est exacerbé par le pourcentage croissant de réserves de gaz naturel qui se trouvent dans des environnements difficiles.

Les nombreuses étapes de la production, du traitement et du transport du gaz naturel sont interconnectées.

Dans ce cas, les développements technologiques qui font baisser ces prix devraient avoir un impact significatif sur l'expansion du commerce mondial du gaz à l'avenir.

³⁹ Ibid.

*Chapitre III : Généralités sur la
modélisation*

Chapitre III : Généralités sur la modélisation

Introduction

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie de la RO et de la modélisation en tant que disciplines clés de la prise de décision. En explorant les concepts, les méthodes et les applications, il contribuera à l'élargissement des connaissances et à l'acquisition des compétences nécessaires pour aborder avec succès les problèmes opérationnels complexes et réaliser des prises de décision éclairées.

III.1 La recherche opérationnelle

III.1.1 Définition

La recherche opérationnelle, souvent connue sous le nom de science de la gestion, est essentiellement une méthode de prise de décision qui vise à optimiser la conception et le fonctionnement d'un système, souvent dans des situations où il est nécessaire d'allouer des ressources limitées⁴⁰.

III.1.2 L'ancienneté de la recherche opérationnelle

Bien que les censeurs aient critiqué l'expression au fur et à mesure qu'elle prenait de l'ampleur, et ce à juste titre, elle est aujourd'hui largement reconnue et le citoyen moyen n'est plus étonné d'apprendre ce qu'est la recherche opérationnelle.

L'approche est dépassée si l'application est nouvelle. L'homme a toujours cherché à maximiser les résultats qu'il peut obtenir sous des contraintes spécifiques, et s'il fait appel à l'esprit scientifique pour l'aider, il peut faire de la recherche opérationnelle sans s'en rendre compte⁴¹.

Virgile décrit l'installation de Didon sur le rivage africain dans le livre de l'Énéide. Les habitants lui ont donné autant de terres qu'elle pouvait en entourer avec une lanière tissée à partir d'une seule peau de taureau. Le fait que Carthage ait été construite en arc de cercle autour de sa citadelle suggère que la reine connaissait la figure plane qui, pour un périmètre donné, a

⁴⁰ Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du Littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 27/03/2023 à 9 :00 ; p1

⁴¹ Robert Faure, La recherche opérationnelle ; Presses universitaires de France ; 1980 ; consulté le 27/03/2023 ; p3

la plus grande surface vers 814 ap. Au troisième siècle avant J.-C., lors du siège de Syracuse par le Romain Claudius Marcellus, le tyran de Syracuse confie à son concitoyen Archimède la défense de la ville. Plus près de nous, saviez-vous que Jacques Bernoulli, qui a publié son *Ars coniectandi* en 1713, huit ans après sa mort, et Pascal et Fermat, qui ont créé le concept d'anticipation mathématique en 1654, étaient tous deux intrigués par l'art de prendre des décisions dans des circonstances floues ? Afin de réduire les frais de charroi, Gaspard Monge, professeur à l'Ecole Royale du Génie de Mézières, qui est avec l'Ecole des Ponts et Chaussées la plus ancienne école d'ingénieurs de France, a posé le problème de la coupe et du remplissage à la fin de l'Ancien Régime. Dans un mémoire présenté à l'Académie royale des sciences en 1776, il l'a rattaché à l'étude des congruences de normales. Dans la terminologie utilisée aujourd'hui pour le mouvement des marchandises, telle qu'envisagée par A. Tolstoi en 1939, L. V. Kantorovitch et F. L. Hitchcock en 1941, il avait ainsi résolu le premier problème de transport⁴².

Dans le même ordre d'idées, Fourier a fourni une approche directe pour traiter les systèmes d'inégalités linéaires dès 1824, tandis que Kantorovitch a fourni une méthode pour résoudre les programmes linéaires en 1939. Une autre façon de voir les choses est que les recherches d'Augustin Cournot sur les fondements mathématiques de la théorie de la richesse, publiées pour la première fois en 1838 (la deuxième édition intégrale date de 1938), ont servi de prélude à la fondation de l'école de Walras et du Parisien Vilfredo Pareto, et plus tard, après leur traduction en Amérique en 1897, à l'influente école d'économétrie du Nouveau Monde. Emile Borel a présenté quatre notes sur le sujet à l'Académie des Sciences entre 1921 et 1927, adoptant le nom de Théorie mathématique des jeux, qui avait déjà été utilisé par Ampère en 1802 et Louis Bachelier en 1901. Le théorème fondamental de la théorie des jeux a été énoncé par Jans (et plus tard John) von Neumann en 1928. René de Possel l'a rendu accessible au public français en 1936, et Jean Ville l'a prouvé à nouveau en 1938. On sait que J. von Neumann et O. Morgenstern, immigrés aux Etats-Unis, travaillaient déjà sur leur célèbre Théorie des jeux et du comportement économique dès le début de la guerre 1939-1945, même si la publication n'était pas prévue avant la fin de 1944. La combinatoire avait donné lieu à des publications étranges qui ont contribué à la naissance de la théorie des graphes, comme *Les réseaux* (ou graphes) de Sainte-Lagu (1926) et *Théorie der endlichen und unendlichen Graphen* de Dènes König (1936). En conclusion, au moment de la Seconde Guerre mondiale, une quantité respectable d'informations avait été recueillie, offrant une base solide pour le développement

⁴² Ibid.

de la recherche opérationnelle. Pourtant, elles n'ont jamais fait l'objet d'une pratique, à quelques rares exceptions près (les calculs d'inventaires déterministes de Wilson (1929), les applications hésitantes de l'idée d'espérance mathématique d'Erlang et Engset (1918), et les travaux de Léontieff, immigré aux États-Unis, enfin). La faiblesse des moyens de calcul - l'ordinateur n'avait pas encore été inventé - et la conception relativement simple des systèmes d'information des entreprises, beaucoup plus basiques que ceux auxquels nous sommes habitués aujourd'hui, sont les principales causes de ce dilemme.

III.1.3 Les types de problèmes traités par la recherche opérationnelle

La recherche opérationnelle, dont nos ancêtres se seraient bien passés, ne s'intéresse qu'aux problèmes qui défient la logique. Les trois principales catégories de problèmes sont les problèmes combinatoires, aléatoires ou concurrentiels⁴³.

- **Combinatoire** : Il est de notoriété publique que nous avons du mal à visualiser les scénarios combinatoires. Il semble qu'un chef d'équipe comparerait les $4! = 24$ solutions potentielles au problème, ce qui pourrait lui prendre cinq minutes, en supposant qu'il ait quatre missions à distribuer et qu'il veuille le faire pour le plus grand plaisir de ses quatre travailleurs, dont il connaît les goûts. Mais il est difficile de comprendre que si ce chef d'équipe devait confier 20 missions à 20 personnes, au même rythme de calcul, il lui faudrait près de 10 milliards de millénaires pour répertorier les solutions (avec une machine, cela ne prendrait que 8000 ans). Il faudrait encore quatre-vingt mille ans pour chaque microseconde ! quatre-vingt mille !)

Cela signifie qu'il est strictement interdit d'énumérer dans les scénarios combinatoires dès que le nombre de solutions dépasse quelques milliers. Cependant, il existe plusieurs méthodologies en recherche opérationnelle qui conduisent à des algorithmes rapides pouvant être utilisés pour trouver une solution à un problème sans procéder à une énumération approfondie. Il s'agit notamment de la programmation dynamique, de la théorie des graphes, de l'algèbre booléenne, des treillis et, enfin, de la programmation mathématique.

⁴³ Robert Faure, La recherche opérationnelle ; Presses universitaires de France ; 1980 ; consulté le 27/03/2023 ; p8-p10

- **Aléatoire :** Porter un jugement dans l'incertitude est un défi qui défie le sens commun. Bien que simple à expliquer à des adolescents, le concept d'espérance mathématique n'est pas enseigné dans les cours du premier cycle du secondaire. De plus, il bénéficie rarement de la richesse d'exposition que des exemples concrets pourraient offrir lorsqu'il est énoncé à la fin de l'école secondaire, devant un auditoire déjà restreint. D'excellents cerveaux s'accordent à dire qu'il est difficile d'apprendre l'avantage du banquier uniquement par l'expérience. Grâce à la théorie des processus stochastiques et au concept d'espérance mathématique, il est possible de porter un jugement correct sur des situations dont l'évolution ne peut être prédite qu'avec un haut degré de probabilité. Ces situations comprennent le remplacement d'équipements, la maintenance préventive, la gestion scientifique des stocks, la réduction ou l'élimination de files d'attente, l'ajout de files d'attente et, plus généralement, la recherche de solutions à des problèmes qui dépendent de variables aléatoires et impliquent des goulots d'étranglement⁴⁴.
- **Concurrentiel :** Prendre des décisions dans un duel, ou dans un autre contexte de compétition, est encore plus difficile. Puisqu'il s'agit de sélectionner une stratégie (parmi de nombreuses alternatives), face aux différentes tactiques de l'adversaire et, bien sûr, dans l'incertitude du choix qu'il fera, n'est-ce pas à la fois combinatoire et aléatoire ? Ce type de question peut être résolu par l'utilisation de la théorie mathématique des jeux. Nous arrivons à la conclusion que l'utilisation de la recherche opérationnelle n'est pas une technique qui remplace le bon sens, mais plutôt un moyen de prendre des décisions de bon sens en éliminant les défis posés par la structure combinatoire, aléatoire ou compétitive des questions réelles. Selon l'écriture de Pierre Massé, c'est la science de la décision.

III.1.4 Le développement récent de la recherche opérationnelle

La théorie des graphes et la programmation mathématique sont les deux grandes réalisations récentes de la recherche opérationnelle. "En fait, une théorie unifiée et abstraite des graphes n'a pu prendre forme que grâce aux efforts de quelques spécialistes de la recherche opérationnelle et sous l'impulsion de préoccupations pratiques", écrit Claude Berge dans le prologue de son remarquable ouvrage *Graphes et hypergraphes* (1971). H. W. Kuhn a créé la technique hongroise en 1955 pour résoudre les problèmes d'affectation. Le théorème

⁴⁴ Ibid.

fondamental de la théorie des flux est dû à L. R. Ford et D. R. Fulkerson, qui ont également développé un algorithme cette année-là donnant le flot maximal d'un réseau de transport⁴⁵.

En 1957, Claude Berge a publié un livre qui organisait les nombreuses conclusions de la théorie des graphes qui avaient déjà été établies. Il y présente également la théorie des graphes et les nouveaux théorèmes qu'il a développés dans la théorie des chaînes alternées, si utile pour le couplage et le chevauchement. La publication de ce livre, qui a été traduit en anglais et en russe, a entraîné un essor de la recherche sur les graphes aux États-Unis, en URSS et même en France, où l'on notera en particulier les travaux de Ghouila-Houri, de P. Rosenstiehl et de B. Roy. En outre, la théorie des systèmes bloqués de Fulkerson (1968) et la notion de matroïde, due à H. Whitney (1935), affinée par W. T. Tutte (1965) et qui n'est pas sans lien avec la programmation mathématique.

Les rapports de la Commission Cowles et la publication en 1951 par J. Wiley de l'ouvrage de Tjalling C. Koopmans, *Activity analysis of production and allocation*, ont marqué le début des développements importants dans le domaine de la programmation mathématique. La méthode du simplexe a été proposée en 1949 par G. B. Dantzig, qui travaillait sur le projet Scoop (*Scientific Computation of Optimum Programs*) depuis 1948, et les conditions d'optimalité ont été énoncées en 1950 par Kühn et Tucker. Avec le développement des ordinateurs grand public, la recherche s'est orientée vers l'utilisation de la programmation linéaire. C. L. Lemke a présenté l'approche du double simplexe en 1954, et P. Wolfe a promu la décomposition des matrices en 1958 pour surmonter les limitations de mémoire des ordinateurs. Ralph Gomory a publié sa première approche de troncature pour la résolution de programmes linéaires en nombres entiers en 1958 et a poursuivi ses études algébriques par la suite. La réduction d'un programme à n variables, dont k sont des entiers, à une séquence ordonnée et finie de programmes ne contenant que $k - 1$ variables entières a été proposée par A. H. Land et A. G. Doig en 1960. Ils ont également suggéré qu'un programme sans variables entières soit réduit à un programme linéaire. R. Faure et feu Y. Malgrange ont utilisé l'algèbre de Boole binaire pour des programmes avec des variables bivalentes en 1961 suite à une suggestion faite par R. Fortet, et A. Le Garff étend la technique aux programmes avec des variables entières⁴⁶.

⁴⁵ Robert Faure, *La recherche opérationnelle* ; Presses universitaires de France ; 1980 ; consulté le 27/03/2023 ; p10-12

⁴⁶ Ibid

III.2 La modélisation

III.2.1 Définitions

- **Systeme**

Un système est un arrangement de parties interdépendantes qui coopèrent pour atteindre l'objectif du système. Par exemple, Ford Motor Company est un système dont l'objectif est d'augmenter les profits en créant des voitures de haute qualité. Lorsque les responsables militaires britanniques ont encouragé les scientifiques et les ingénieurs à étudier un certain nombre de questions militaires pendant la Seconde Guerre mondiale, notamment l'utilisation du radar et le contrôle des convois, des bombardements, des opérations anti-sous-marines et des opérations minières, ils ont créé le terme de recherche opérationnelle.

Un ou plusieurs modèles mathématiques sont généralement utilisés dans l'approche scientifique de la prise de décision. Un modèle mathématique est une représentation mathématique d'un scénario réel qui peut être utilisée pour faciliter la prise de décision ou simplement pour mieux comprendre la situation en question. La plupart des termes clés utilisés pour définir les modèles mathématiques seront plus clairs dans l'exemple qui suit.

- **Un modèle**

Les modèles sont utilisés dans de nombreuses applications scientifiques. Le terme "modèle" fait généralement référence à un dispositif construit pour démontrer les caractéristiques spécifiques d'autres objets. En général, selon l'utilisation qui sera faite du modèle, seul un sous-ensemble de ces caractéristiques sera conservé. Parfois, ces modèles sont des objets réels, comme dans le cas d'un modèle d'avion utilisé dans des expériences de soufflerie. Dans le contexte de la recherche opérationnelle, les modèles abstraits sont le plus souvent utilisés. Ces modèles sont typiquement mathématiques dans le sens où le symbolisme algébrique est utilisé pour refléter les relations internes de l'objet modélisé, qui est souvent une organisation. Nous nous concentrerons principalement sur ces modèles mathématiques, bien que le terme "modèle" soit parfois plus général et englobe des modèles purement descriptifs⁴⁷.

⁴⁷ Wayne L; Operations research applications and algorithms; Duxbury press; 2003; consulté le 29/03/2023 à 14:00; p1

III.2.2 L'importance de la modélisation

La caractéristique essentielle d'un modèle mathématique en recherche opérationnelle est qu'il implique un ensemble de relations mathématiques (telles que des équations, des inégalités et des dépendances logiques) qui correspondent à des relations plus concrètes dans le monde réel (telles que des relations technologiques, des lois physiques et des contraintes de marketing). Il existe un certain nombre de raisons de construire de tels modèles ⁴⁸:

- Le processus de construction d'un modèle révèle souvent des relations qui n'étaient pas immédiatement apparentes pour de nombreuses personnes. Il en résulte une meilleure compréhension de l'objet modélisé ;
- Après avoir créé un modèle, il est généralement en mesure de l'analyser quantitativement afin de recommander des actions qui ne seraient pas évidentes autrement ;
- S'il n'est souvent pas pratique ou souhaitable d'expérimenter avec l'objet modélisé, il est possible de le faire avec un modèle. Dans un pays où la probabilité d'un échec calamiteux est élevée, il serait évidemment politiquement difficile et peu souhaitable d'essayer des solutions économiques non conventionnelles. Dans un paradigme mathématique, la poursuite d'expériences aussi audacieuses pourrait être plus acceptable (mais peut-être pas entièrement).

III.2.3 Les étapes de réalisation d'un modèle

Lorsque la recherche opérationnelle est utilisée pour résoudre un problème au sein d'une organisation, il convient de suivre le processus de construction de modèle en sept étapes⁴⁹ :

- **Etape 01**

Formuler le problème commencer par identifier le problème auquel l'organisation est confrontée. Les objectifs de l'organisation et les domaines de l'organisation qui doivent être étudiés avant que le problème puisse être résolu sont tous deux spécifiés dans le cadre de la

- **Etape 02**

Ensuite, il faut rassembler des informations pour déterminer les valeurs des paramètres qui ont un impact sur le problème de l'organisation. Ces estimations sont utilisées pour créer (dans

⁴⁸ H. Paul Williams; Model building in mathematical programming; 2013; consulté le 01/04/2023 à 1:00; p3

⁴⁹ Wayne L; Operations research applications and algorithms; Duxbury press; 2003; consulté le 29/03/2023 à 14:00; p4-p6

la troisième étape) et évaluer (dans la quatrième étape) un modèle mathématique du problème auquel l'entreprise est confrontée.

- **Etape 03**

À ce stade, il convient de créer un modèle mathématique de la question. Les modèles de système peuvent être créés à l'aide de diverses méthodes mathématiques. Le résultat de l'étape 3 serait notre modèle d'optimisation.

- **Etape 04**

Vérifier si l'image mathématique de la réalité créée à l'étape 3 est maintenant exacte. Par exemple, nous pouvons examiner la précision du modèle en simulant le problème pour des valeurs des variables de choix qui n'ont pas été utilisées dans le processus d'estimation. Même si un modèle est précis pour les circonstances données, nous devons être prudents et ne pas l'utiliser sans réfléchir. Il peut y avoir de nouvelles restrictions qui nous obligent à modifier le modèle afin d'obtenir une réponse exacte.

- **Etape 05**

Nous sélectionnons maintenant l'option qui répond le mieux aux objectifs de l'organisation à partir d'un modèle et d'un ensemble d'alternatives (il peut y en avoir plusieurs !). Par exemple, à l'aide de notre modèle, nous avons pu identifier le meilleur plan d'action.

- **Etape 06**

Nous donnons maintenant à la personne ou au groupe qui prend la décision le modèle et les conseils de l'étape 5. Dans certaines circonstances, on peut proposer un certain nombre d'options et laisser l'organisation choisir celle qui répond le mieux à ses besoins. L'analyste peut découvrir que l'organisation rejette la recommandation après avoir présenté les résultats de l'étude de recherche opérationnelle. Cela peut être dû à une caractérisation erronée des défis de l'organisation ou au fait que l'on a lancé le projet sans impliquer le décideur.

Dans ce cas, il convient de revenir à l'étape 1, à l'étape 2 ou à l'étape 3⁵⁰.

- **Etape 07**

Si l'organisation accepte l'étude, l'analyste l'aide à mettre les suggestions en pratique. Pour s'assurer que les recommandations aident l'organisation à atteindre ses objectifs, le système doit

⁵⁰ Ibid

être revu en permanence (et mis à jour de manière dynamique en fonction de l'évolution de l'environnement).

III.2.4 Procédure de création d'un modèle

Un ou plusieurs modèles mathématiques sont généralement utilisés dans l'approche scientifique de la prise de décision. Un modèle mathématique est une représentation mathématique d'un scénario réel qui peut être utilisée pour faciliter la prise de décision ou simplement pour mieux comprendre la situation en question. La plupart des termes clés utilisés pour définir les modèles mathématiques seront plus clairs dans l'exemple qui suit⁵¹.

Exemple : Maximisation du rendement de Wozac.

- **Problème**

Eli Daisy chauffe un mélange chimique dans un conteneur sous pression pour créer du Wozac en grandes quantités. Une quantité distincte de Wozac est créée chaque fois qu'un lot est traité.

Le rendement du processus (en livres) est la quantité totale produite. Comprendre les éléments qui affectent le rendement du processus de production de Wozac est un sujet sur lequel Daisy souhaite s'informer. Décrivez la procédure de création d'un modèle pour cette circonstance.

- **Solution**

Daisy s'attache d'abord à déterminer les variables qui affectent le rendement du processus. Parce qu'il montre comment le rendement réel se comporte en fonction de plusieurs facteurs, ce modèle est connu sous le nom de modèle descriptif. Daisy pourrait découvrir que les facteurs énumérés ci-dessous affectent le rendement en utilisant les techniques de régression :

- Le volume du récipient en litres (V) ;
- La pression du récipient en millilitres (P) ;
- La température du récipient en degrés Celsius (T) ;
- Composition chimique du mélange traité.

Si l'on considère que A, B et C sont les pourcentages du mélange composé des produits chimiques A, B et C, alors Daisy pourrait trouver, par exemple, que :

⁵¹ Wayne L; Operations research applications and algorithms; Duxbury press; 2003; consulté le 29/03/2023 à 14:00; p7-p12

$$\text{Rendement} = 300 + 0.8V + 0.01P + 0.06T + 0.01T*P - 0.01T^2 - 0.01P^2 + 11.7A + 9.4B + 16.4C + 19A*B + 11.4A*C - 9.6B*C \quad \text{III.1}$$

Pour établir cette relation, il faudrait mesurer le rendement du processus pour de nombreuses combinaisons des éléments susmentionnés. Une fois que Daisy connaît le volume, la pression, la température et la composition chimique du processus de fabrication, elle peut décrire le rendement du processus de production à l'aide de cette équation.

Modèles prescriptifs ou d'optimisation

Modèle prescriptif : Un modèle prescriptif "prescrit" à une organisation des actions qui l'aideront à atteindre ses objectifs de la manière la plus efficace possible. Les éléments d'un modèle prescriptif sont les suivants :

- Fonction(s) objective(s) ;
- Variables de décision ;
- Contraintes.

Modèle d'optimisation

Parmi l'ensemble des valeurs possibles pour les variables de décision qui satisfont aux contraintes données, un modèle d'optimisation recherche les valeurs des variables de décision qui maximisent ou minimisent une fonction objective⁵².

La fonction objective

Naturellement, Daisy souhaite que le rendement du processus soit le plus élevé possible. La plupart des modèles ont une fonction que nous voulons maximiser ou diminuer. La fonction objective du modèle est le nom donné à cette fonction. Bien entendu, pour maximiser le rendement du processus, nous devons identifier les valeurs V, P, T, A, B et C qui font que (1) est aussi grand que possible.

Une organisation peut avoir plus d'un objectif dans de nombreuses circonstances. Par exemple, le conseil scolaire du comté de Monroe a déclaré que les objectifs suivants étaient impliqués dans la répartition des élèves entre les deux écoles secondaires de Bloomington, dans l'Indiana :

- Égaliser le nombre d'élèves dans les deux écoles secondaires ;
- Réduire la distance moyenne parcourue par les élèves pour se rendre à l'école ;

⁵² Ibid.

- Avoir un corps étudiant diversifié dans les deux écoles secondaires.

Les variables de décision

Les variables de décision sont des variables dont nous pouvons modifier les valeurs et qui affectent les performances du système. V, P, T, A, B et C sont des variables de choix dans notre exemple⁵³.

Contraintes

Seules certaines valeurs de variables de choix sont généralement possibles dans les scénarios. Par exemple, certaines combinaisons de volume, de pression et de température peuvent être dangereuses. En outre, A, B et C doivent tous être des nombres entiers positifs dont la somme est égale à 1. Les contraintes sont des limites imposées aux valeurs des variables de décision. Supposons ce qui suit :

- Le volume doit être compris entre 1 et 5 litres ;
- La pression doit être comprise entre 200 et 400 millilitres ;
- La température doit être comprise entre 100 et 200 degrés Celsius ;
- Le mélange doit être composé entièrement de A, B et C ;
- Pour que le médicament fonctionne correctement, seule la moitié du mélange au maximum peut être constituée du produit A.

Ces contraintes peuvent être exprimées mathématiquement par les contraintes suivantes :

- $V \leq 5$;
- $V \geq 1$;
- $P \leq 400$;
- $P \geq 200$;
- $T \leq 200$;
- $T \geq 100$;
- $A \geq 0$;
- $B \geq 0$;
- $A + B + C = 1$;
- $A \leq 5$.

⁵³ Ibid.

Le modèle d'optimisation complet

Après avoir laissé z représenter la valeur de la fonction objective, l'ensemble de notre modèle d'optimisation peut s'écrire comme suit :

$$\text{Max } z = 300 + 0.8V + 0.01P + 0.06T + 0.01T*P - 0.1T^2 - 0.01P^2 + 11.7A + 9.4B + 16.4C + 19A*B + 11.4A*C - 9.6B*C \quad \text{III.2}$$

Sous les contraintes suivantes :

- $V \leq 5$;
- $V \geq 1$;
- $P \leq 400$;
- $P \geq 200$;
- $T \leq 200$;
- $T \geq 100$;
- $A \geq 0$;
- $B \geq 0$;
- $A + B + C = 1$;
- $A \leq 5$.

Toute spécification des variables de décision qui satisfait toutes les contraintes du modèle se trouve dans la région réalisable. Par exemple, $V = 2$, $P = 300$, $T = 150$, $A = .4$, $B = .3$, et $C = .1$ est dans la région réalisable. Une solution optimale à un modèle d'optimisation est tout point de la région réalisable qui optimise (dans ce cas, maximise) la fonction objective. Il est possible de déterminer que la solution optimale de ce modèle est $V = 5$, $P = 200$, $T = 100$, $A = 0.294$, $B = 0$, $C = 0.706$, et $z = 183,38$. Ainsi, un rendement maximal de 183,38 peut être obtenu avec de 5 litres⁵⁴.

III.2.5 Quelques méthodes de modélisation

Citons quelques méthodes⁵⁵ :

Plus court chemin (Shortest path)

L'approche de Dijkstra est utilisée dans la théorie des graphes pour résoudre le problème du chemin le plus court. Étant donné le réseau routier d'une certaine région, elle peut être utilisée,

⁵⁴ Ibid.

⁵⁵ Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p1-p5

par exemple, pour trouver le chemin le plus rapide entre deux villes. Elle s'applique aux graphes connectés avec des poids réels positifs sur les arêtes. La méthode a été publiée pour la première fois en 1959 et porte le nom de son créateur, l'informaticien néerlandais Edsger Dijkstra.

Exemple

Un "serial traveller" américain recherche le plus court chemin entre Boston et Los Angeles. On donne dans la carte ci-dessous les différents axes qu'il souhaite emprunter.

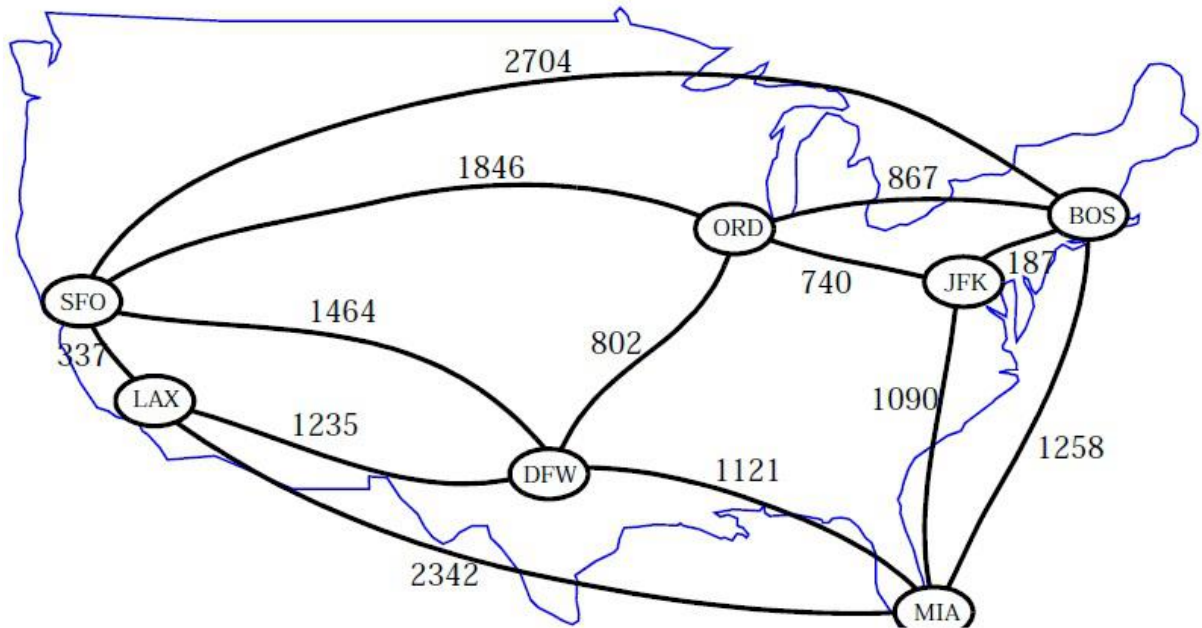


Figure III. 1 le réseau routier entre Boston et Los Angeles.

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p1

Quel est le trajet optimal ?

Voyageur de commerce (TSP - Traveling-Sales man Problem) ⁵⁶

Consiste à partir d'un ensemble de villes et à voyager le moins possible entre chacune d'elles, en ne les visitant qu'une fois (et une seule). Pour un nombre limité de villes, ce problème apparemment "basique" est en fait simple, mais au fur et à mesure que l'on ajoute des villes, le nombre de chemins potentiels monte en flèche. Le fait que le problème du voyageur de commerce soit considéré comme un problème NP-complet ne devrait pas être une surprise. Le nombre de chemins hamiltoniens dans ce numéro est égal à $n! / 2$, où n représente le nombre de

⁵⁶ Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p1-p5

villes du numéro. Aucun remède global et efficace n'a encore été découvert. L'approche idéale, selon les mathématiciens, consiste à utiliser un algorithme dont les polynômes changent proportionnellement au nombre de villes. La meilleure solution varie de façon exponentielle en fonction du nombre de villes.

Exemple

Un voyageur de commerce, basé à Toulon, doit visiter ses clients à travers la France :



Figure III. 2 Carte de France.

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p2

Quelle tournée le voyageur de commerce doit-il effectuer afin qu'elle soit la plus courte possible ?

Mariages stables (Stable Marriage problem)

On se donne deux ensembles A et B ayant chacun n éléments. On se donne aussi, pour chaque élément de A et B, une fonction de préférence, qui classe les éléments de l'autre ensemble. On cherche alors à associer de façon bijective les éléments de A avec ceux de B, pour qu'il n'existe pas $a \in A$ et $b \in B$ tels qu' a préfère b à l'élément qui lui est associé, et b préfère a à l'élément qui lui est associé⁵⁷.

Exemple

On considère 3 femmes (Alice, Bénédicte et Camille) et 3 hommes (Dominique, Elie et François) dont voici les préférences respectives :

⁵⁷ Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p1-p5

Tableau III. 1 Exemple de mariages stables

Préférences des femmes	Préférences des hommes
A : F D E	D : A B C
B : E D F	E : B C A
C : F D E	F : A C B

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p2

Comment doit-on organiser les couples ?

L'optimisation des flux et l'algorithme de Ford-Fulkerson

La méthode Ford-Fulkerson, du nom de ses créateurs L.R. Ford et D.R. Fulkerson, utilise un processus itératif pour extraire le flux de valeur maximale (ou minimale) à partir d'un flux observé. Un flux qui tire sa valeur maximale (ou minimale) d'un flux observé. Le graphique de gauche montre les données d'entrée, tandis que le graphique de droite montre les données de sortie pour ce problème d'optimisation. L'utilisation de cette approche dans les problèmes de réseaux provient du fait que le flux représente la circulation de l'entrée à la sortie. Les utilisations sont nombreuses et comprennent des problèmes informatiques, routiers, ferroviaires, etc. Elle peut également être utilisée pour résoudre tous les autres problèmes de transfert, y compris ceux impliquant des importations et des exportations, des migrations, des changements démographiques et des flux plus éthers tels que les transferts financiers⁵⁸.

Exemple

Nous devons étudier la capacité du réseau routier avant de planifier un projet de construction d'autoroute, comme le montre le graphique ci-joint. Nous avons calculé le nombre maximum de véhicules par heure que chaque route peut supporter, en tenant compte des feux de signalisation, des traversées de villes et de villages et d'autres retards. Sur les arcs du graphique, ces estimations sont indiquées en centaines de véhicules par heure (chiffres entre crochets). En raison des longues distances entre les villes, seuls les itinéraires indiqués sur le graphique seront choisis par les conducteurs.

⁵⁸ Ibid

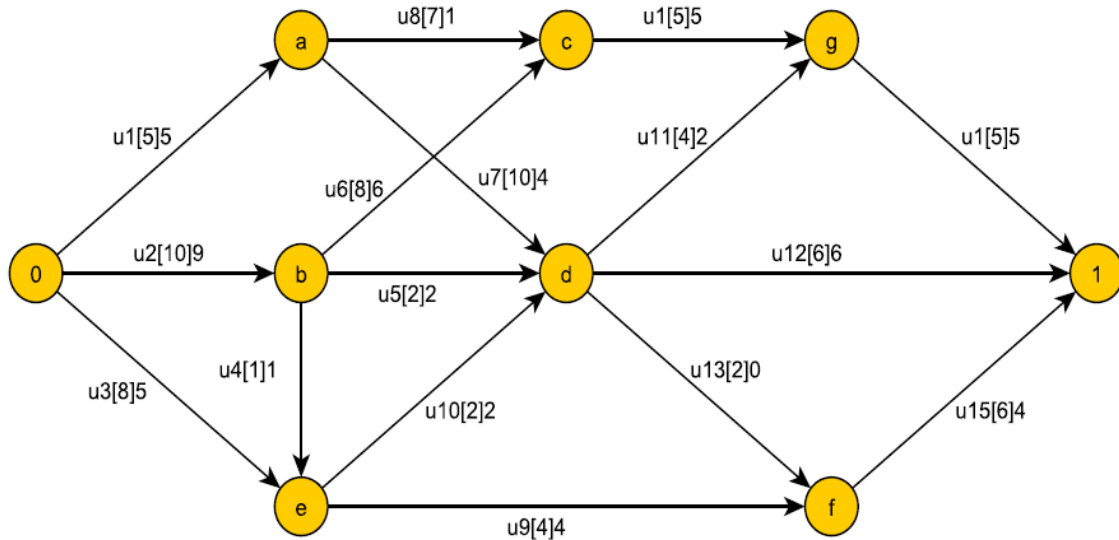


Figure III. 3 Réseau routier.

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ;
 Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p3

Quel est le débit horaire total maximum des véhicules susceptibles de s'écouler entre les villes E et S ?

L'ordonnancement et la gestion des projets

De nombreuses publications traitent des questions de gestion de projet et de calendrier, ainsi que des questions de planification logistique (tournées de véhicules, emballage, etc.).

L'objectif de la gestion de projet est de planifier l'exécution efficace d'un projet du début à la fin. La gestion de programme consiste à appliquer la gestion de projet à un groupe de projets qui partagent un objectif commun.

Un sous-domaine de la recherche opérationnelle appelé théorie de l'ordonnancement calcule les meilleurs moments pour accomplir les tâches. Pour ce faire, il est souvent important d'allouer les ressources nécessaires à l'exécution simultanée de plusieurs tâches. Un problème d'ordonnancement peut être considéré comme un sous-problème de planification lorsqu'il est nécessaire de choisir la manière dont les tâches planifiées seront exécutées sur le plan opérationnel. MPM et PERT sont deux techniques de planification de projet fréquemment utilisées⁵⁹.

⁵⁹ Ibid

Exemple

La construction d'une piscine olympique sur un campus universitaire a été confiée à la SGTB (Société des Grands Travaux de la Bièvre). Le tableau des tâches préalables est le suivant :

Tableau III. 2 Tâches de construction d'une piscine olympique 1.

Codes	Tâches	Antériorités	Durée (en jours)	Suivants
A	Excavation	-	5	B, F
B	Fondation	A	2	C
C	Pose de canalisation	B	4	D
D	Essais en pression	C, G	8	E
E	Étanchéité	D	9	J

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ; Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p3

Tableau III. 3 Tâches de construction d'une piscine olympique 2.

Codes	Tâches	Antériorités	Durée (en jours)	Suivants
F	Mise en place de la station d'évacuation	A	6	G
G	Mise en page de chauffage	F	5	D, H
H	Raccordement électrique	G	4	I
I	Sonorisation sous-marine	H	5	J
J	Dallage	E, I	6	K, L
K	Construction des vestiaires	J	8	M
L	Construction de solarium	J	2	M
M	Mise en eau	K, L	3	-

Source : Laurent Smoch ; Recherche opérationnelle ;

Université du littoral-Côte d'opale ; 2013 ; consulté le 02/04/2023 ; p4

Les travaux débutent le 1er avril. Chaque mois comporte 20 jours ouvrables. L'inauguration peut-elle avoir lieu comme prévu le 15 juin⁶⁰ ?

III.3 Programmation linéaire

III.3.1 Définition

La programmation linéaire est une généralisation de l'algèbre linéaire. Elle permet de résoudre un large éventail de problèmes, depuis la localisation des horaires des compagnies aériennes ou des cinémas jusqu'au transport du pétrole des raffineries vers les marchés. La

⁶⁰ Ibid

simplicité avec laquelle les contraintes peuvent être incluses dans le modèle est à l'origine de cette polyvalence considérable⁶¹.

III.3.2 Le problème de programmation linéaire canonique

Énoncé du problème alimentaire

Avant de parler de généralité, examinons d'abord un exemple simple du problème du régime alimentaire. Supposons qu'il n'y ait que deux aliments, que nous supposons être les céréales et le steak par souci de certitude. En outre, nous supposons que les individus n'ont besoin que de fer et de protéines pour survivre, ce qui signifie qu'ils doivent ingérer au moins 60 unités de fer et 70 unités de protéines par jour. Disons qu'une portion de steak coûte 2 dollars et contient 15 unités de fer et 10 unités de protéines, tandis qu'une portion de céréales coûte 20 dollars et contient 30 unités de fer et 5 unités de protéines. Trouver le régime le moins cher qui répondra à l'objectif minimal. Pour illustrer un point ultérieur, nous avons volontairement choisi des coûts et des teneurs en protéines et en fer ridicules pour les céréales et le steak⁶².

Soit x_1 la quantité de céréales que la personne consomme chaque jour et x_2 la quantité de fer. Pour que le régime alimentaire soit conforme aux exigences minimales, nous devons disposer de :

- $30x_1 + 5x_2 \geq 60$;
- $15x_1 + 10x_2 \geq 70$;
- $x_1 \geq 0$;
- $x_2 \geq 0$.

La quantité de fer consommée en mangeant x_1 unités de céréales et x_2 unités de steak est indiquée dans le côté gauche de la première inégalité ; elle doit être au moins égale à 60, sinon la quantité de fer consommée est insuffisante. Le côté gauche de la deuxième inégalité, qui doit être au moins égal à 70, indique également la quantité de protéines consommée. Les deux dernières inégalités illustrent l'impossibilité pour l'homme de consommer un aliment de manière insuffisante. Le prix du régime est de :

$$\text{Cost}(x_1, x_2) = 20x_1 + 2x_2$$

III.3

⁶¹ Steven J. Miller ; An introduction to linear programming; 2007; consulté le 04/04/2023 à 9:00; p2

⁶² Steven J. Miller ; An introduction to linear programming; 2007; consulté le 04/04/2023 à 9:00; p2-10

Minimiser Cost $(x_1 ; x_2)$, sous réserve de x_1 ; réaliser (1) est la solution au problème de l'alimentation. Il est essentiel que la fonction que nous cherchons à maximiser soit linéaire et que les restrictions soient linéaires dans les variables. Nous pouvons réécrire (1) sous forme de matrice, soit :

$$A = \begin{pmatrix} 30 & 5 \\ 15 & 10 \end{pmatrix}, x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} 60 \\ 70 \end{pmatrix} \quad \text{III.4}$$

Le problème de l'alimentation est alors équivalent à :

$$\text{Min } 20x_1 + 2x_2, \text{ sous } Ax \geq b \text{ et } x \geq 0. \quad \text{III.5}$$

L'exemple ci-dessus illustre un problème de programmation linéaire :

- 1- On a les variables $x_j \geq 0$ pour $j \in \{1, \dots, N\}$.
- 2- Les variables satisfont des contraintes linéaires, on écrit $Ax \geq b$.
- 3- Le but est de minimiser une fonction linéaire sous les variables : $C^T x = c_1 x_1 + \dots + c_N x_N$

Notez la similitude entre (4) et un problème d'algèbre linéaire standard. Les différences sont que, au lieu de $Ax = b$, nous avons $Ax \geq b$, et qu'au lieu de résoudre x avec $Ax = b$, nous résolvons x satisfaisant $Ax \geq b$, ce qui minimise une fonction linéaire. Nous cherchons x satisfaisant $Ax \geq b$ qui minimise une fonction linéaire. Ainsi, l'algèbre linéaire devient donc un sous-ensemble de la programmation linéaire. En fait, dans la section suivante, nous montrons comment, en introduisant des variables supplémentaires, nous pouvons remplacer les contraintes $Ax \geq b$ par de nouvelles contraintes et de nouvelles variables, $A' x' = b'$.

Définition

Nous remarquons tout d'abord qu'il suffit de prendre en compte les situations où les contraintes sont supérieures ou égales à avant de construire le problème de programmation linéaire classique. En effet, une restriction telle que :

$$a_{i1} x_1 + \dots + a_{iN} x_N \leq b_i \quad \text{III.6}$$

Peut-être reformuler ainsi :

$$-a_{i1} x_1 - \dots - a_{iN} x_N \geq -b_i \quad \text{III.7}$$

Tout nombre réel peut être saisi dans les entrées de la matrice A . Par conséquent, le fait de supposer que toutes les contraintes sont supérieures ou égales à ne réduit pas l'applicabilité de

l'hypothèse. En outre, nous pouvons supposer que toutes les restrictions sont de véritables égalités, sous peine d'ajouter d'autres variables⁶³.

Considérons quelques contraintes :

$$A_{i1} x_1 + a_{iN} x_N \geq b_i \quad \text{III.8}$$

Nous introduisons une nouvelle variable $z_i \geq 0$, et on change l'équation :

$$-a_{i1} x_1 - \dots - a_{iN} x_N + z_i = b_i \quad \text{III.9}$$

Par conséquent, nous pouvons substituer une égalité à toute contrainte dans $A_x \geq b$ qui a un signe plus grand que en introduisant une nouvelle variable $z_i \geq 0$. z_i n'est ajouté qu'à une contrainte et non à la fonction linéaire que nous essayons d'optimiser.

Nous observons que chaque variable x_j peut être supposée nulle. Il peut être nécessaire d'inclure davantage de restrictions et de variables pour y parvenir (et ces variables supplémentaires seront également non négatives). Supposons que nous souhaitons $x_j \geq m_j$ (en autorisant m_j à être égal à $-\infty$). La restriction $x_j \geq m_j$ est simplement ajoutée si $m_j \geq 0$ et est finie. Nous remplaçons la variable x_j par z_j si $m_j \leq 0$ et est fini en mettant

$z_j = x_j - m_j$ avec $z_j \geq 0$. Notez que nous avons toujours une fonction linéaire à minimiser. Enfin, si $m_j = 1$, nous ajoutons deux nouvelles variables - u_j et v_j - et nous remplaçons x_j par u_j et v_j .

Imaginons que nous voulions maximiser la fonction linéaire $c^T x$ plutôt que de la minimiser. Le fait de supposer que nous voulons minimiser une fonction linéaire ne réduit pas sa généralité car minimiser la fonction linéaire $c^T x$ est équivalent à maximiser la fonction $c^T x$ ⁶⁴.

Dualité

Rappelons que le problème canonique de programmation linéaire peut être supposé sous la forme suivante :

- Variables $x = (x_1, \dots, x_M) \geq 0$;
- Contraintes linéaires $A x = b$, avec $b = (b_1, \dots, b_M)$;
- Minimiser la fonction linéaire $C^T x$.

⁶³ Ibid

⁶⁴ Ibid

Étant donné un problème canonique de programmation linéaire, le problème dual est défini comme suit est défini par :

- Variables $y = (y_1, \dots, y_M) \in \mathbb{R}^M$;
- Contraintes linéaires $y^T A \leq c^T$;
- Maximiser la fonction linéaire $y^T b$.

Nous verrons plus loin qu'il est souvent utile de passer du problème original au problème dual ; nous donnons ici un exemple pour montrer qu'un problème dual est souvent plus facile à étudier. Considérons le problème d'échecs suivant : placer 5 reines sur un échiquier de 5 x 5 de façon à ce qu'il y ait trois cases où l'on peut placer des pions de façon à ce qu'il n'y ait pas de problème. Cases où l'on peut placer des pions de façon à ce qu'aucune reine n'attaque aucun pion (rappelez-vous qu'une reine attaque horizontalement, verticalement et diagonalement). Nous illustrons une configuration de cinq reines qui permet de placer trois pions en toute sécurité sur un plateau de 5 x 5 :

P			P	
P				
				Q
	Q			Q
	Q	Q		

Figure III. 4 Exemple d'une table d'échecs

Source : Etablie par nous-même.

Une façon de traiter le problème consiste à examiner toutes les manières dont 5 reines peuvent être placées sur l'échiquier de 5 x 5, malheureusement il existe $\binom{25}{5} = 53, 130$ possibilités à vérifier. On peut en exploitant la symétrie (il n'y a que 6 places inégales pour placer la première reine, et non 25), mais même en procédant ainsi, le nombre de possibilités est suffisamment grand pour que l'on puisse vérifier par main⁶⁵.

Le principe de dualité s'applique ici - nous remplaçons le problème que nous étudions par un problème équivalent plus facile. Au lieu d'essayer de poser 5 dames pour que 3 pions puissent être placés. En toute sécurité sur l'échiquier de 5 x 5, considérons le problème double,

⁶⁵ Ibid

dans lequel nous essayons de placer 3 reines sur le plateau afin que 5 pions puissent être placés en toute sécurité. Pourquoi cette équivalence ? Si nous sommes en mesure de le faire, disons que les 3 reines sont à (x_i, y_i) (pour $i \in \{1, 2, 3\}$) et les 5 pions sont à $(u_i; v_i)$ (pour $i \in \{1, \dots, 5\}$). Il suffit alors de remplacer chaque pion en $(x_i; y_i)$ par une dame, et chaque dame en $(u_i; v_i)$ par un pion.

L'avantage est évident, au lieu de devoir enquêter sur les $\binom{25}{5}$ possibilités, maintenant on doit juste étudier $\binom{25}{5} = 2,300$ (et nous pouvons encore réduire le nombre de possibilités par des arguments de symétrie)⁶⁶.

III.4 Les domaines d'application

Il serait impossible d'établir une classification complète des questions et des secteurs d'activité dans lesquels la LP peut ou ne peut pas être utilisée. Il est évident que certaines questions se prêtent mieux à une approche LP. Bien que l'utilisation d'un modèle LP puisse ne pas offrir une réponse entièrement satisfaisante pour d'autres questions, elle peut être acceptable en l'absence d'autres stratégies. En fonction de l'expérience de chacun, le choix du moment où l'on peut utiliser ou non la LP est souvent personnel.

- **L'industrie pétrolière**

De loin le plus grand utilisateur de LP. De grands modèles comportant des dizaines de milliers de restrictions ont parfois été construits. Ces modèles sont utilisés pour éclairer toute une série de choix, notamment où et comment acheter du pétrole brut, comment le transporter et quels produits fabriquer avec ce pétrole. Ces "modèles d'entreprise" comprennent des éléments de distribution, d'affectation des ressources, de mélange et, éventuellement, de commercialisation. Manne (1956), Catchpole (1962) et McColl (1969) décrivent l'utilisation de la PL par l'industrie pétrolière.

- **L'industrie chimique**

Bien que les modèles soient rarement aussi grands, les applications sont quelque peu similaires à celles du secteur pétrolier. Les applications comprennent généralement l'allocation des ressources ou les mélanges. Royce (1970) décrit une application.

⁶⁶ H. Paul Williams; Model building in mathematical programming; Wiley; 2013; p67-p71

- **L'industrie manufacturière**

Dans ce cas, l'allocation des ressources implique généralement l'utilisation de la PL. En règle générale, la capacité de traitement, les matières premières et la main-d'œuvre doivent être allouées en tant que ressources. Le problème de la PLANIFICATION D'USINE est une question multi périodique de ce type qui concerne le secteur de l'ingénierie. L'alourdissement des hauts fourneaux (pour le secteur de l'acier) et le mélange sont deux utilisations plus fréquentes de la PL dans l'industrie manufacturière. Fabian (1967), Sutton et Coates (1981) et Lawrence et Flowerdew (1963) sont trois sources qui traitent de l'utilisation de la planification linéaire dans ce contexte.

- **Transport et distribution**

Les modèles LP sont fréquemment utilisés pour formuler des problèmes de distribution. Les problèmes de transport et de transbordement. L'extension de ce problème, qui intègre également la localisation des dépôts, fait appel à la programmation en nombres entiers. La programmation en nombres entiers est fréquemment utilisée pour résoudre les problèmes d'ordonnement des camions, des avions, des camions-citernes, des trains et des bus. La programmation mathématique a également été utilisée pour résoudre des problèmes d'affectation dans l'industrie du transport (trains vers les mines et les centrales électriques, par exemple). Christiansen et al. (2007) fournit une explication détaillée de l'application de la programmation mathématique au transport maritime. Eilon et al. (1971) et Markland (1975) décrivent tous deux les applications de la programmation mathématique dans la distribution en général.

- **Finance**

La sélection de portefeuilles d'investissement a été l'une des premières applications de la programmation mathématique. C'est Markowitz (1959) qui en est à l'origine. Le défi consistait à décider comment investir une somme d'argent donnée dans un portefeuille d'actions et de titres de participation. L'objectif était de minimiser la variance du rendement tout en maintenant un taux de rendement attendu spécifique sur l'investissement. Au final, un modèle de programmation quadratique a été produit. Selon Agarwala et Goodson (1970), un gouvernement peut utiliser la programmation quadratique pour élaborer la meilleure politique fiscale possible afin d'atteindre un objectif spécifique (dans ce cas, une amélioration de la balance des paiements).

Dans le domaine de la comptabilité, les LP sont de plus en plus utilisés. Les professionnels de la comptabilité peuvent tirer un grand profit des informations sur les coûts qui peuvent être extraites des données économiques résultant de la solution d'un modèle LP⁶⁷.

Selon Spath et al. (1975), une entreprise de vente par correspondance utilise un modèle LP pour réduire la charge d'intérêt globale sur l'ensemble de ses crédits.

Jack (1985) décrit une extension intéressante d'un modèle financier qui permet à l'utilisateur de spécifier des buts de manière interactive (par opposition aux objectifs) et d'opérer dans le cadre des degrés de liberté autorisés par les contraintes.

La gestion des recettes, qui consiste à déterminer les prix des articles à différentes périodes afin de maximiser les revenus, est un domaine d'application potentiel très important. Elle est particulièrement pertinente pour les secteurs de l'hôtellerie, de la restauration, de l'aviation et des chemins de fer.

- **L'énergie**

La programmation des générateurs électriques pour répondre aux fluctuations des charges à différents moments de la journée est un problème d'allocation des ressources qui est traité par programmation mathématique dans les industries de fourniture de gaz et d'électricité. Ce problème est comparable à celui mentionné par Garver en 1963. Le modèle HYDRO POWER est utilisé pour étendre ce problème, mettant en lumière une autre application cruciale. Selon Archibald et al. (1999), la programmation dynamique stochastique peut être utilisée pour résoudre un problème similaire. Les questions de distribution concernant la création et l'utilisation de réseaux d'approvisionnement peuvent également être traitées par la programmation dynamique. Babayer (1975), Fanshel et Lynes (1964), Muckstadt et Koenig (1977) et Khodaverdian et al. (1986) ont également examiné les applications de la programmation mathématique dans ces domaines⁶⁸.

⁶⁷ Ibid

⁶⁸ Ibid

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré la recherche opérationnelle (RO) et la modélisation en tant que disciplines essentielles pour résoudre les problèmes complexes de prise de décision. Nous avons constaté que la RO fournit des outils puissants pour analyser et optimiser les processus et les systèmes dans divers domaines, tandis que la modélisation offre un moyen abstrait de représenter ces systèmes réels.

***CHAPITRE IV : La
programmation dynamique***

Chapitre IV : La programmation dynamique

Introduction

Même si les résultats de chaque décision ne sont pas toujours prévisibles, ils peuvent être prédits dans une certaine mesure avant le choix suivant. L'objectif est de réduire un certain coût, qui est une description quantitative de ce que l'on considère comme un résultat indésirable.

Dans de telles circonstances, les décisions ne peuvent être considérées isolément, car il est nécessaire de trouver un équilibre entre le désir d'avoir des coûts actuels faibles et l'inconvénient d'avoir des coûts futurs élevés. La technique de programmation dynamique permet de saisir ce compromis. Elle suppose que les jugements seront faits de manière optimale pour les étapes suivantes et classe les choix à chaque étape sur la base du total du coût actuel et du coût futur anticipé.

La programmation dynamique peut être utilisée pour résoudre un large éventail de problèmes pratiques, c'est pourquoi nous évitons d'obscurcir les idées clés avec des hypothèses sans rapport avec la nature des problèmes. À cette fin, nous incluons un modèle largement applicable de contrôle optimal d'un système dynamique sur un nombre fini d'étapes (un horizon fini).

De nombreux domaines, notamment les mathématiques, les sciences, l'ingénierie, les affaires, la médecine, les systèmes d'information, les biomathématiques et l'intelligence artificielle, entre autres, utilisent depuis longtemps la programmation dynamique. Les développements récents dans les domaines de l'intelligence informatique tels que les réseaux neuronaux, l'exploration de données, l'informatique douce et autres ont augmenté le nombre d'applications de la programmation dynamique. La valeur des formulations de programmation dynamique et des moyens d'obtenir leurs solutions informatiques n'a jamais été aussi grande.

IV.1 La programmation dynamique

La programmation dynamique est une méthode qui permet en général de résoudre des problèmes d'optimisation impliquant une séquence de décisions en déterminant, pour chaque décision, des sous-problèmes qui peuvent être résolus de la même manière, de sorte qu'une solution optimale du problème original peut être trouvée à partir des solutions optimales des sous-problèmes. Le principe d'optimalité de Bellman, qu'il a énoncé comme suit, constitue le fondement de cette approche⁶⁹.

IV.1.1 L'algorithme de la programmation dynamique

Le principe d'optimalité est le principe fondamental sur lequel repose la méthodologie de la programmation dynamique. Bellman, qui a contribué de manière significative à la popularisation de la programmation dynamique et à son développement en tant que méthodologie systématique, est à l'origine de ce terme. D'une manière générale, le principe d'optimalité affirme le fait relativement évident suivant :

Soit $\pi^* = \{u_0^*, u_1^*, u_{N-1}^*\}$ soit une politique optimale pour le problème de base, et nous supposons que lorsque l'on utilise π^* un état donné x_i se produit à un moment donné i avec une probabilité positive. Considérons le sous-problème dans lequel nous nous trouvons à x_i au moment i et souhaitons minimiser le "coût du trajet" entre le moment i et le moment N .

$$E \left\{ \sum_{k=i}^{N-1} (g_N(x_N) + g_k(x_k, u_k(x_k), w_k)) \right\} \quad \text{IV.1}$$

Si la politique tronquée $\{u_0^*, u_1^*, u_{N-1}^*\}$ n'était pas optimale comme décrit, nous pourrions minimiser davantage le coût en passant à une politique optimale pour le sous-problème une fois que nous avons atteint x_i , ce qui est une explication assez simple du principe d'optimalité. À titre d'illustration, disons que le moyen le plus rapide d'aller de Los Angeles à Boston est d'emprunter la section Chicago-Boston de l'itinéraire, qui est également le moyen le plus rapide d'aller de Chicago à Boston⁷⁰.

IV.2 Un problème d'ordonnement déterministe

Supposons que pour fabriquer un certain produit, quatre opérations doivent être effectuées sur une certaine machine. Les opérations sont notées A, B, C, D. Nous supposons que

⁶⁹ Art Lew; Dynamic programming a computational tool; Springer; 2006; consulté le 20/04/2023; p

⁷⁰ Dimtri P. Bertsekas; Dynamic programming and optimal control Vol-1; Athena scientific; 2005; consulté le 22/04/2023 à 10:00; p5-p21

l'opération B ne peut être effectuée qu'après que l'opération A a été réalisée. La séquence CDAB est donc admissible, mais la séquence CDBA ne l'est pas. Le coût de préparation C_{mn} pour passer d'une opération m à une autre opération n est donné. Il existe également un coût de démarrage initial S_A et S_C pour commencer par l'opération A et C, respectivement. Le coût⁷¹.

$$S_A + C_{AC} + C_{CD} + C_{DB}$$

IV.2

Nous pouvons considérer le problème comme une séquence de trois décisions, à savoir le choix des trois premières opérations à effectuer (la dernière opération est déterminée à partir des trois précédentes). Il convient de considérer comme état l'ensemble des opérations déjà effectuées, l'état initial étant l'état artificiel correspondant au début du processus de décision. Les transitions d'état possibles correspondant aux états et décisions possibles pour ce problème sont illustrées dans la figure. Ici, le problème est déterministe, ce qui signifie qu'à un état donné, chaque choix de contrôle conduit à un état déterminé de manière unique. Par exemple, à l'état AC, la décision d'effectuer l'opération D conduit avec certitude à l'état ACD et a un coût CCD. Les problèmes déterministes avec un nombre fini d'états peuvent être représentés de manière pratique en termes de graphes de transition tels que celui de la figure. La solution optimale correspond au chemin qui commence à l'état initial et se termine à un certain état à l'instant temporel et dont la somme du coût des arcs et du coût terminal est minimale.

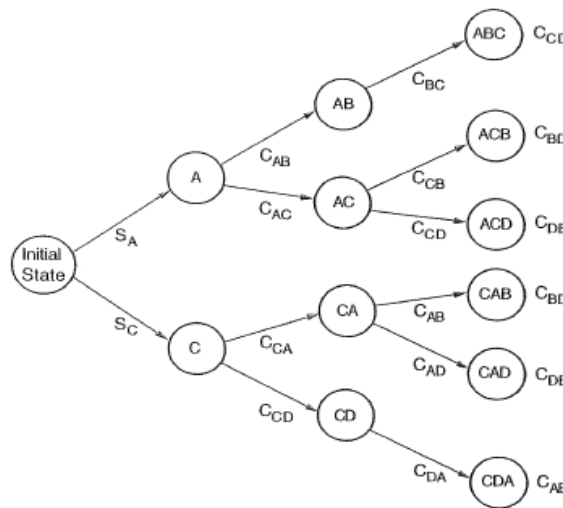


Figure IV. 1 Réseau de fabrication d'un produit

Source : Dimtri P.Bertsekas ; Dynamic programming and optimal control Vol-1 ; Athena scientific ; 2005 ; consulté le 22/04/2023 à 10 :00 ; p16

⁷¹ Ibid

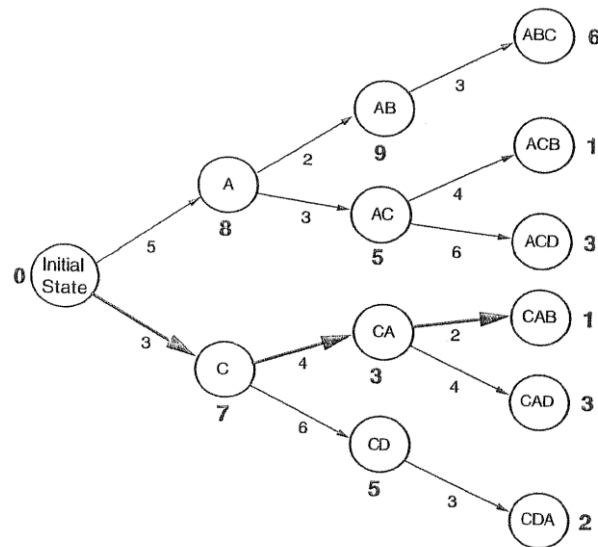


Figure IV. 2 Réseau de fabrication d'un produit optimisé

Source: Dimtri P. Bertsekas; Dynamic programming and optimal control Vol-1;
Athena scientific ; 2005 ; consulté le 22/04/2023 à 10 :00 ; p20

IV.3 La théorie des graphes

IV.3.1 Définition d'un graphe

Depuis que Leonhard Euler a résolu l'énigme des "sept ponts de Königsberg" en 1736, les graphes existent. Il s'agissait de déterminer s'il était possible de traverser une seule fois chacun des sept ponts reliant les quatre villes concernées⁷².

Euler a créé les fondements mathématiques de la théorie des graphes lorsqu'il s'est rendu compte que seuls les liens eux-mêmes importaient. La figure tirée de l'article "Solutio problematis ad geometriam situs pertinentis", illustre le développement d'Euler à partir de l'un de ses modèles originaux.

⁷² Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j; O'reilly; 2019; consulté le 27/04/2023 à 12 :00; p2-9

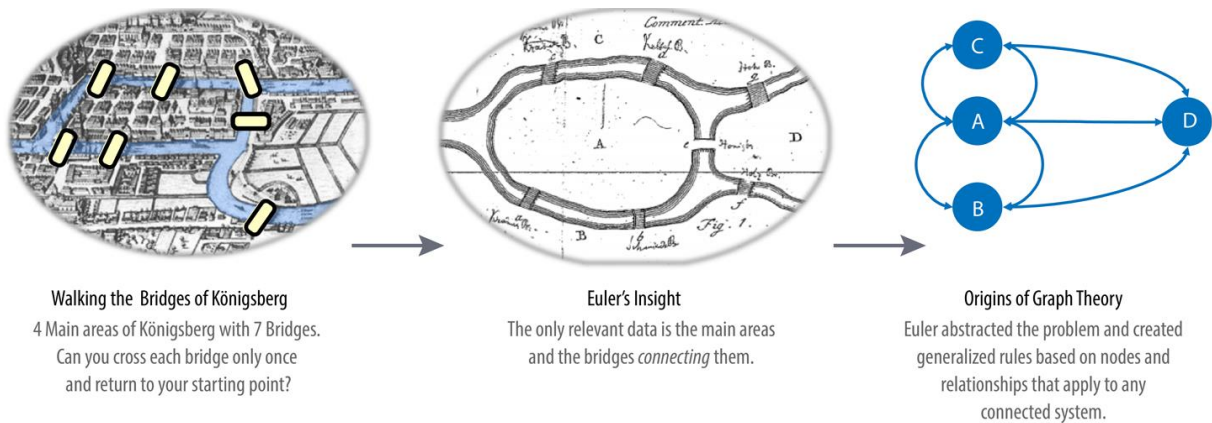


Figure IV. 3 Méthodologie de création de Euler

Source : Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j ; O'reilly ; 2019 ; consulté le 27/04/2023 à 12 :00 ; p2

Bien qu'ils trouvent leur origine dans les mathématiques, les graphiques constituent également une méthode pratique et très précise de description et d'analyse des données. Les nœuds ou sommets sont les composants d'un graphique, et les relations, liens ou arêtes sont les connexions qui les séparent.

En jetant un coup d'œil au graphique des personnes de la figure en dessous, nous pouvons rapidement créer un certain nombre d'énoncés descriptifs. Par exemple, si la personne A vit avec la personne B, qui possède une voiture, la personne A utilise cette voiture. Cette stratégie de modélisation est attrayante parce qu'elle est rapidement transposable dans le monde réel et qu'elle est très "conviviale". Cela rend l'analyse des données et la modélisation plus compatibles. Mais la modélisation graphique ne nous apprend que la moitié de l'histoire. En outre, nous pouvons vouloir les analyser pour en tirer des informations qui ne sont pas immédiatement claires. C'est là que les algorithmes de graphes sont utilisés⁷³.

⁷³ Ibid

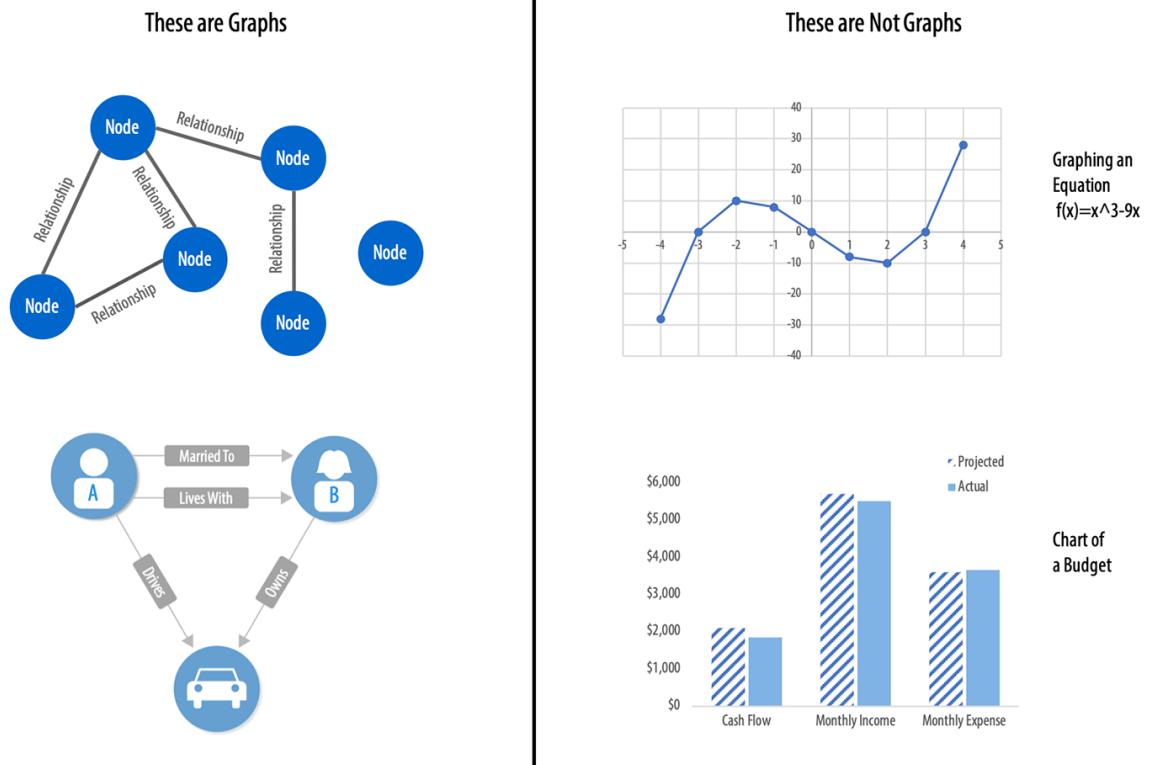


Figure IV. 4 Les graphes.

Source : Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j ; O’reilly ; 2019 ; consulté le 27/04/2023 à 12 :00 ; p3

IV.3.2 Analyses et algorithmes graphiques

Un sous-ensemble d'outils pour l'analyse des graphes est appelé algorithmes de graphes. Nous réalisons des analyses de graphes, c'est-à-dire l'analyse de données connexes à l'aide d'une méthodologie basée sur les graphes. Nous pouvons utiliser une variété de techniques, y compris les requêtes de graphes, les statistiques de base, l'exploration visuelle des graphes et l'intégration des graphes dans les tâches d'apprentissage automatique. Alors que les techniques de calcul des graphes font souvent référence à des recherches plus approfondies et itératives, l'interrogation basée sur des modèles de graphes est fréquemment utilisée pour l'analyse de données locales. Bien que les différents types d'analyse puissent être utilisés de manière convergente, nous nous référons à cette dernière utilisation, plus computationnelle, de l'analyse et de la science des données, en tant qu'algorithmes de graphes.

Parce que leurs calculs mathématiques sont spécifiquement conçus pour agir sur les relations, les algorithmes graphiques offrent l'une des méthodes les plus efficaces pour analyser des données connexes. Ils décrivent les procédures à suivre pour analyser un graphique et

déterminer ses caractéristiques fondamentales ou ses paramètres précis. Les algorithmes de graphes, qui sont basés sur les mathématiques de la théorie des graphes, utilisent les connexions entre les nœuds pour déduire la structure et le comportement de systèmes complexes. Ces méthodes sont utilisées par les spécialistes des réseaux pour trouver des données cachées, tester des théories et prévoir des comportements.

Les algorithmes graphiques ont un large éventail d'applications, de la détection des fraudes à l'optimisation du routage des appels, en passant par la prévision des épidémies de grippe. À titre d'illustration, nous voudrions attribuer des points à des nœuds spécifiques qui pourraient être associés à des circonstances de surcharge dans un système électrique. Par ailleurs, nous pouvons être intéressés par la recherche de groupes dans le graphe qui représentent la congestion d'un système de transport⁷⁴.

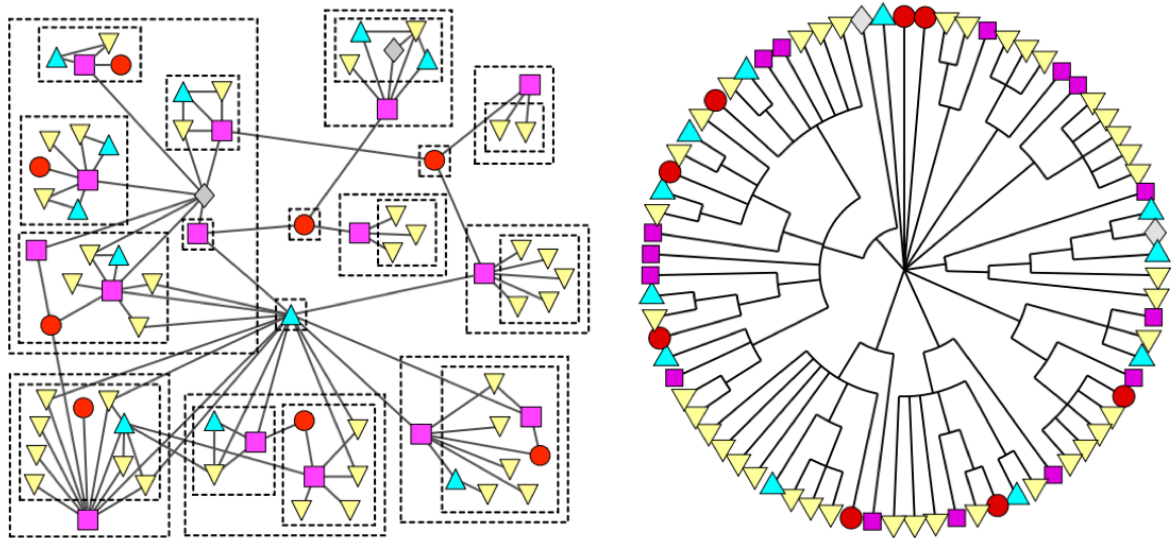


Figure IV. 5 Les systèmes complexes

Source : Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j ; O'reilly ; 2019 ; consulté le 27/04/2023 à 12 :00 ; p6

⁷⁴ Ibid

IV.3.3 Importance des algorithmes de graphes

Pour donner un sens aux données connexes, des algorithmes de graphes sont utilisés. Les algorithmes de graphes sont utiles dans cette situation car ils permettent des analyses plus avancées qui utilisent les relations et améliorent les données contextuelles pour l'intelligence artificielle⁷⁵.

Il est essentiel de comprendre les connexions et les interdépendances entre nos données, car celles-ci sont de plus en plus interconnectées. Les chercheurs qui étudient la façon dont les réseaux se développent ont montré que la connectivité n'augmente pas de façon constante au fil du temps. L'attachement préférentiel est une explication de la manière dont la dynamique de croissance affecte la structure. Ce concept, illustré dans la figure en dessous, montre la propension d'un nœud à s'associer à d'autres nœuds déjà fortement connectés.

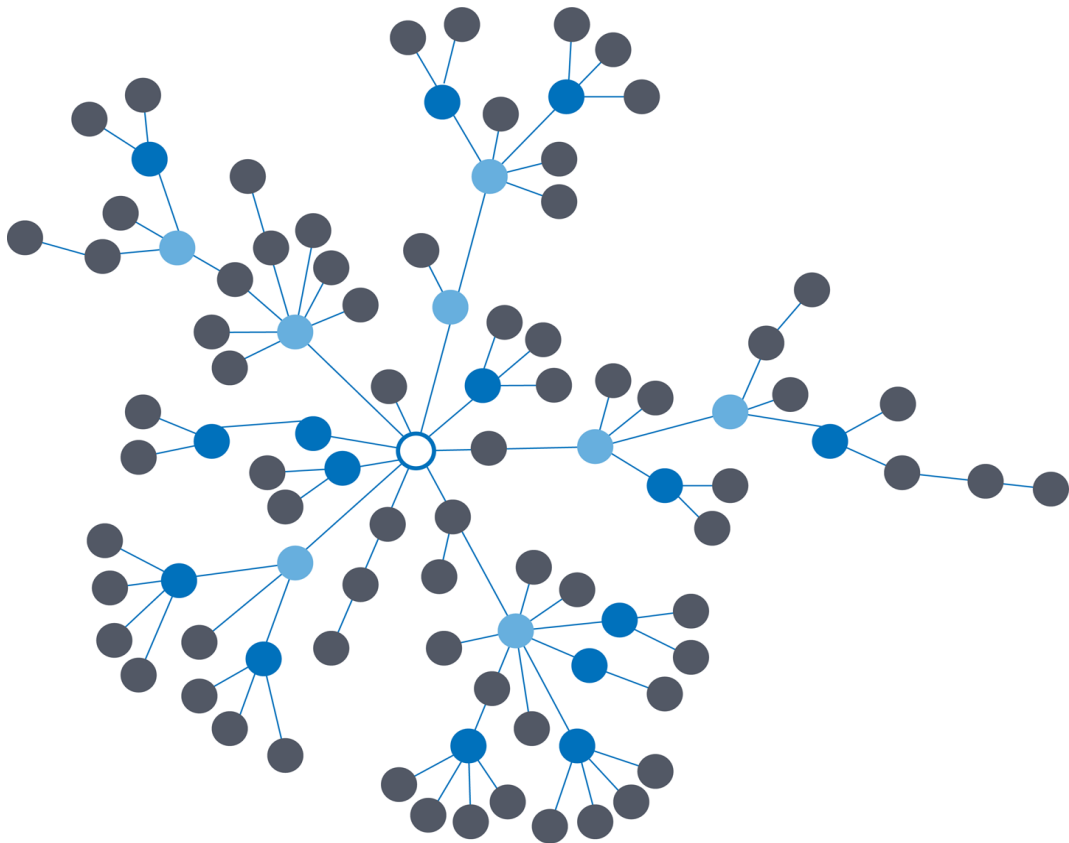


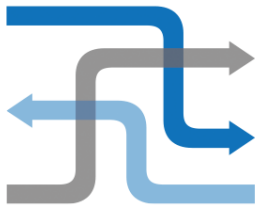
Figure IV. 6 Association des nœuds

Source : Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j ; O'reilly ; 2019 ; consulté le 27/04/2023 à 12 :00 ; p9

⁷⁵ Ibid

IV.3.4 Les cas d'application des algorithmes de graphes

L'analyse graphique est utilisée pour prévoir le comportement et recommander des actions pour des groupes dynamiques au niveau le plus abstrait. Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre les relations et la structure organisationnelle au sein du groupe. Pour ce faire, les algorithmes de graphes analysent les connexions entre les réseaux afin de déterminer leur structure générale. Cette méthode permet de modéliser les processus des systèmes connectés et de comprendre leur topologie⁷⁶.



Chemins de propagation.

Comment les choses se propagent-elles ?



Flux et influence.

Quels sont les capacités, les coûts et les points de



Interactions et résilience.

Comment les choses interagissent-elles et cela va-t-il changer ?

Voici quelques types de défis pour lesquels des algorithmes de graphes sont utilisés :

- Étudier le cheminement d'une maladie ou d'une défaillance de transport en cascade ;
- Découvrir les éléments les plus vulnérables ou les plus dommageables d'une attaque de réseau ;
- Identifier le moyen le moins coûteux ou le plus rapide d'acheminer des informations ou des ressources ;
- Prévoir les liens manquants dans vos données ;
- Localiser les influences directes et indirectes dans un système complexe ;
- Découvrir des hiérarchies et des dépendances invisibles ;
- Prévoir si des groupes vont fusionner ou se séparer ;

⁷⁶ Ibid

- Trouvez les goulets d'étranglement ou les personnes qui ont le pouvoir de refuser ou de fournir davantage de ressources ;
- Révéler les communautés en fonction du comportement pour des recommandations personnalisées ;
- Réduire les faux positifs dans la détection des fraudes et des anomalies ;
- Extraire des caractéristiques plus prédictives pour l'apprentissage automatique.

IV.4 Algorithme du chemin le plus court

L'algorithme du plus court chemin calcule le chemin le plus court (pondéré) entre deux nœuds. Il est utile pour les interactions avec les utilisateurs et les flux de travail dynamiques car il fonctionne en temps réel⁷⁷.

L'histoire du pathfinding remonte au 19e siècle et il est considéré comme un problème graphique classique. Il a pris de l'importance au début des années 1950 dans le contexte de l'acheminement alternatif, c'est-à-dire la recherche du deuxième itinéraire le plus court si l'itinéraire le plus court est bloqué. En 1956, Edsger Dijkstra a créé le plus connu de ces algorithmes.

L'algorithme du chemin le plus court de Dijkstra recherche d'abord la relation de poids le plus faible entre le nœud de départ et les nœuds directement connectés. Entre le nœud de départ et les nœuds directement connectés. Il garde la trace de ces poids et se déplace vers le nœud le plus proche. Il effectue ensuite le même calcul, mais sous la forme d'un total cumulatif à partir du nœud de départ. L'algorithme continue ainsi, en évaluant une "vague" de poids cumulés. En choisissant toujours le chemin cumulatif le moins pondéré pour avancer, jusqu'à ce qu'il atteigne le nœud de destination.

IV.4.1 L'utilisation de l'algorithme du chemin le plus court

Exemples

- Trouver des itinéraires pour se rendre d'un lieu à l'autre. Les outils de cartographie Web tels que Google Maps utilisent l'algorithme du chemin le plus court, ou une variante proche, pour fournir des itinéraires ;
- Trouver les degrés de séparation entre les personnes dans les réseaux sociaux. Par exemple, lorsque vous consultez le profil d'une personne sur LinkedIn, il indique le nombre de personnes qui vous séparent dans le graphe, comme le montre le tableau ci-

⁷⁷ Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j; O'reilly; 2019; consulté le 27/04/2023 à 12 :00; p49-58

dessous. Personnes vous séparent dans le graphique, ainsi que la liste de vos connexions mutuelles⁷⁸.

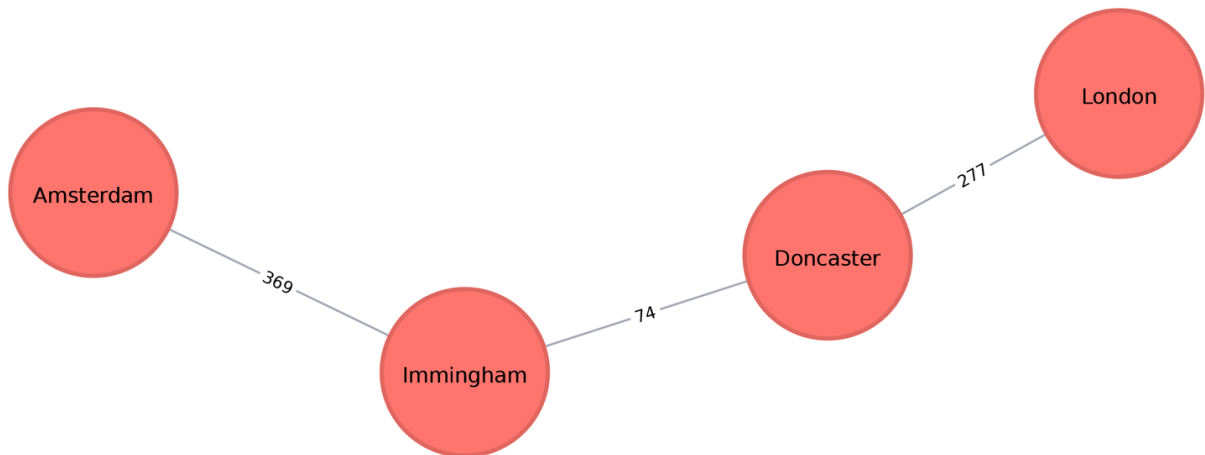


Figure IV. 7 Réseau de transport entre Amsterdam et London

Source : Mark Needham et Amy E.Hodler ; Graph algorithms practical examples in apache Spark and Neo4j ; O'reilly ; 2019 ; consulté le 27/04/2023 à 12 :00 ; p54

IV.4.2 L'algorithme de Bellman-Ford

- **Entrée**

Graphe orienté $G = (V, E)$ avec les sommets V et les arêtes E , et un sommet sources.

- **Initialisation**

- Initialiser le tableau des distances $dist[v]$ à l'infini pour tous les sommets v dans V ;
- Définir $dist[s]$ à 0, où s est le sommet source.

- **Étape de relaxation**

- Répéter le processus suivant $|V| - 1$ fois ;
- Pour chaque arête (u, v) dans E ;
- Si $dist[u] + poids(u, v) < dist[v]$, mettre à jour ;
- Définir $dist[v]$ à $dist[u] + poids(u, v)$.

- **Détection des cycles négatifs**

- Pour chaque arête (u, v) dans E ;
- Si $dist[u] + poids(u, v) < dist[v]$, un cycle négatif existe dans le graphe.

⁷⁸ Ibid.

- **Sortie**

Le tableau des distances $dist[]$ représente les distances les plus courtes.

- **Explication**

L'algorithme de Bellman-Ford est utilisé pour trouver les chemins les plus courts d'un sommet source donné à tous les autres sommets dans un graphe orienté pondéré. Il utilise une approche de programmation dynamique, mettant à jour progressivement les estimations de distance jusqu'à ce que les distances les plus courtes optimales soient déterminées.

- **Initialisation**

Le tableau des distances $dist[]$ est initialisé, avec $dist[s]$ défini à 0 et toutes les autres distances initialement définies à l'infini. Cela prépare l'algorithme à commencer à trouver les chemins les plus courts à partir du sommet source s .

- **Étape de relaxation**

À chaque itération, l'algorithme relaxe les arêtes, mettant à jour les estimations de distance pour trouver des chemins plus courts. Pour chaque arête (u, v) dans le graphe :

- $dist[u]$ représente la distance la plus courte actuelle du sommet source s au sommet u ;
- $poids(u, v)$ représente le poids ou le coût de l'arête (u, v) ;
- Si $dist[u] + poids(u, v)$ est plus petit que la $dist[v]$ actuelle, cela signifie qu'un chemin plus court a été trouvé de s à v via u . Dans ce cas, $dist[v]$ est mis à jour à $dist[u] + poids(u, v)$;
- L'algorithme répète ce processus $|V| - 1$ fois, où $|V|$ est le nombre de sommets dans le graphe. Cela garantit que l'algorithme effectue suffisamment d'itérations pour potentiellement trouver les chemins les plus courts dans les graphes contenant des cycles de poids négatifs.

- **Détection des cycles négatifs**

Après l'étape de relaxation, l'algorithme vérifie l'existence de cycles négatifs. Si, après $|V| - 1$ itérations, $dist[u] + poids(u, v)$ est plus petit que la $dist[v]$ actuelle pour n'importe quelle arête (u, v) , cela signifie qu'un cycle négatif est présent dans le graphe. Cela est dû au fait qu'un cycle

négatif peut continuellement diminuer la distance le long de son chemin, conduisant à une descente infinie⁷⁹.

- **Sortie**

Le tableau des distances $dist[]$ contient les distances les plus courtes du sommet source s à tous les autres sommets. Chaque élément $dist[v]$ représente la distance minimale de s à v . Ces distances peuvent être utilisées pour déterminer les chemins les plus courts eux-mêmes.

- **Exemple d'application**

Considérons le graphe orienté suivant avec ses poids d'arêtes correspondants :

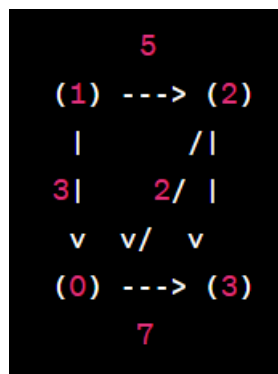


Figure IV. 8 Réseau orienté

Source : Etablie par nous même

Supposons que le sommet 0 soit le sommet source.

- **Initialisation**

- Définir $dist[] = [\infty, \infty, \infty, \infty]$;
- Définir $dist[0] = 0$.

- **Étape de relaxation**

Pour chaque arête $(u, v) \in E$:

- **Relaxer l'arête (0, 1) :**

- Si $dist[0] + poids(0, 1) = 0 + 5 < \infty$, mettre à jour $dist[1] = 5$;
- Relaxer l'arête (0, 3) ;

⁷⁹ Ibid.

- Si $\text{dist}[0] + \text{poids}(0, 3) = 0 + 7 < \infty$, mettre à jour $\text{dist}[3] = 7$;
- Relaxer l'arête (1, 2) :
- Si $\text{dist}[1] + \text{poids}(1, 2) = 5 + 2 < \infty$, mettre à jour $\text{dist}[2] = 7$;
- Relaxer l'arête (0, 3) :
- Si $\text{dist}[0] + \text{poids}(0, 3) = 0 + 7 < 7$, mettre à jour $\text{dist}[3] = 7$;
- **Détection des cycles négatifs**
- Aucun cycle négatif n'est détecté dans cet exemple.

- **Sortie**

Le tableau des distances : $\text{dist}[] = [0, 5, 7, 7]$

Dans cet exemple, l'algorithme a trouvé les distances les plus courtes du sommet source 0 à tous les autres sommets. La distance la plus courte du sommet 0 au sommet 2 est de 7, et le chemin le plus court est $0 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ ⁸⁰.

⁸⁰ Ibid.

Conclusion

En conclusion, la programmation dynamique est une approche puissante et polyvalente pour résoudre une variété de problèmes pratiques dans différents domaines. En considérant les choix et décisions de manière séquentielle, la programmation dynamique permet de trouver un équilibre entre les coûts actuels et les coûts futurs anticipés. Elle suppose une optimisation des décisions à chaque étape, en prenant en compte à la fois le coût actuel et le coût futur.

La programmation dynamique trouve son application dans de nombreux domaines tels que les mathématiques, les sciences, l'ingénierie, les affaires, la médecine, les systèmes d'information, les biomathématiques et l'intelligence artificielle. Les avancées récentes dans les technologies de l'information ont élargi les possibilités d'utilisation de la programmation dynamique, notamment avec l'introduction de techniques telles que les réseaux neuronaux, l'exploration de données et l'informatique douce.

La valeur des formulations de programmation dynamique et des méthodes pour obtenir des solutions informatiques n'a jamais été aussi grande. Cette approche offre une meilleure compréhension des problèmes complexes et permet de prendre des décisions éclairées pour minimiser les coûts indésirables. En combinant la rigueur mathématique avec les avancées technologiques, la programmation dynamique continue d'être un outil essentiel pour l'optimisation et la résolution de problèmes dans divers domaines.

***CHAPITRE V : Modélisation,
optimisation et interprétation***

Chapitre V : Modélisation, optimisation et interprétation

Introduction

Pour le besoin de ce travail nous avons utilisés les données de production proposées par La JV gas du projet In-salah gaz. Le dépôt d'archives des données est composées de 7 champs principales en fichier excel contenant les débits de production de gaz en années ainsi que des estimations des débits. Ainsi qu'une fiche technique qui contient les détails techniques de notre réseau (Diamètres des pipelines, distances entre les sommets). On applique l'algorithme de Bellman Ford sur notre réseau pour faire trouver le chemin optimal qui nous permet d'effectuer les procédés dans les meilleurs délais. Et puis pour renforcer notre optimisation on ajoute une étude répartie sur des scénarios basé sur l'analyse des fluctuation des débits de productions.

V.1 Exemple d'application de l'algorithme Bellman-Ford

Cette figure exprime un graphe non-circulaire dirigé vers la fin, il représente aucun cycle négative. Ce qui nous permet d'appliquer l'algorithme de Bellman-Ford. Il comporte 4 sommets (1,2,3,4) avec des arêtes qui les lies.

- **Les arêtes**
 - 1 → 2 : 5.
 - 1 → 3 : 7.
 - 2 → 4 : 6.
 - 3 → 2 : 2.
 - 3 → 4 : 2.

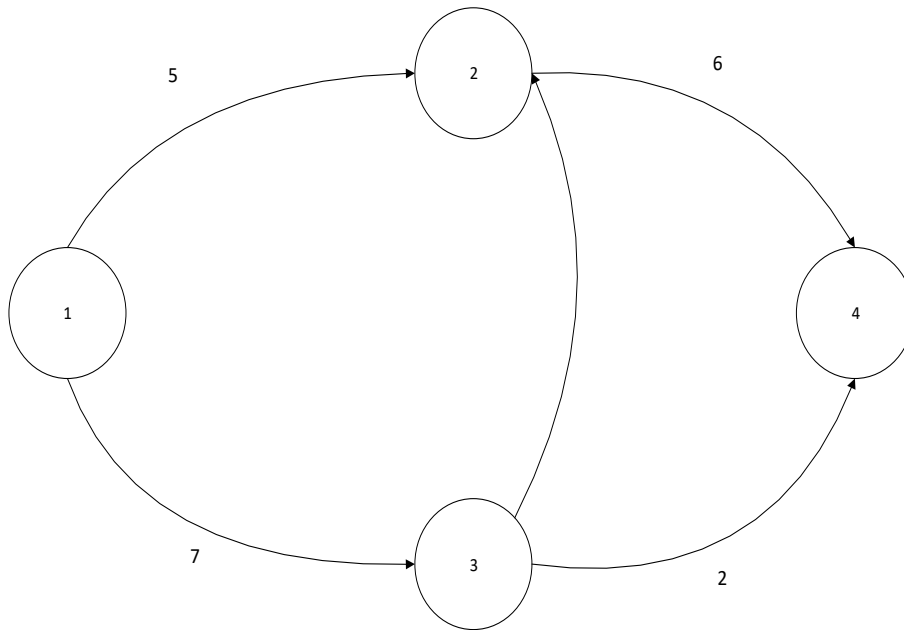


Figure V. 1 Réseau quelconque

Source : Etablie par nous même

L'arborescence est une structure en forme d'arbre utilisée pour représenter et organiser des éléments de manière hiérarchique. Elle est composée de sommets reliés entre eux par des arêtes. Elle permet de visualiser les relations et les dépendances entre les éléments de manière claire et structurée. Elle est utilisée dans de nombreux domaines tels que l'informatique, la biologie et les mathématiques pour organiser des données, représenter des classifications ou modéliser des processus décisionnels.

On applique l'algorithme de Bellman-Ford pour calculer l'arborescence, d'où on aura :

Formule de Bellman-Ford :

$$\Pi(x) = \text{Max}_{y \in v^-(x)} \{ \pi(y) + d(x, y) \} \quad \text{V.1}$$

On applique cette formule sur tous les sommets des graphes, donc on aura :

- $\Pi(1) = 0$.
- $\Pi(2) = \text{Max}_{y \in v^-(2)} \{ \pi(y) + d(2, y) \}$.

$$y \in v^-(2)$$

$$v^-(2) = \{1, 3\}$$

$$\Pi(2) = \text{Max}_{y \in \{1, 3\}} \begin{cases} \pi(1) + d(2, 1) = 0 + 5 = 5 \\ \pi(3) + d(2, 3) = 7 + 2 = 9 \end{cases}$$

$$y \in \{1, 3\}$$

On prend le max ce qui signifie $\pi(2)=9$.

- $\Pi(3) = \text{Max} \{ \pi(y) + d(3,y) \}$.

$$y \in v^-(3)$$

$$v^-(3) = \{1\}$$

$$\Pi(3) = \text{Max} \{ \pi(1) + d(3,1) = 0 + 7 = 7 \}$$

$$y \in \{1\}$$

On prend le max ce qui signifie $\pi(3)=7$.

- $\Pi(4) = \text{Max} \{ \pi(y) + d(4,y) \}$.

$$y \in v^-(4)$$

$$v^-(4) = \{2,3\}$$

$$\Pi(4) = \text{Max} \begin{cases} \pi(2) + d(4,2) = 9 + 6 = 15 \\ \pi(3) + d(4,3) = 7 + 2 = 9 \end{cases}$$

$$y \in \{2,3\}$$

On prend le max ce qui signifie $\pi(4)=15$.

Depuis ces calculs on détermine l'arborescence sur le graphe, comme suit :

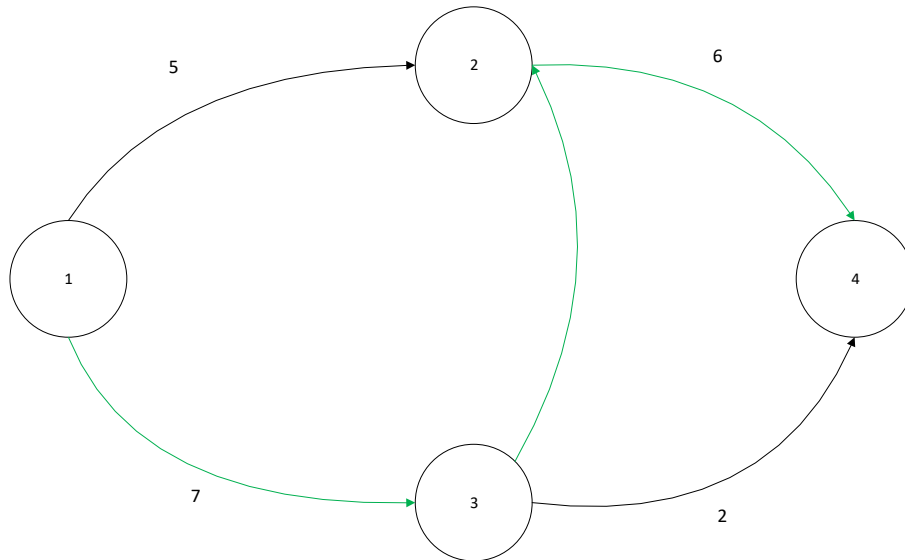


Figure V. 2 Réseau quelconque optimisé

Source : Etablie par nous même

V.2 Modélisation Graphique

Notre modèle représente le réseau de production, traitement et transport de gaz pour le Projet In-Salah gaz, ce dernier est composé de 7 champs ainsi que 4 CPF, reliés entre eux par des pipelines de divers diamètres. Les champs regroupent plusieurs puits producteurs.

V.2.1 Modèle principale de distance

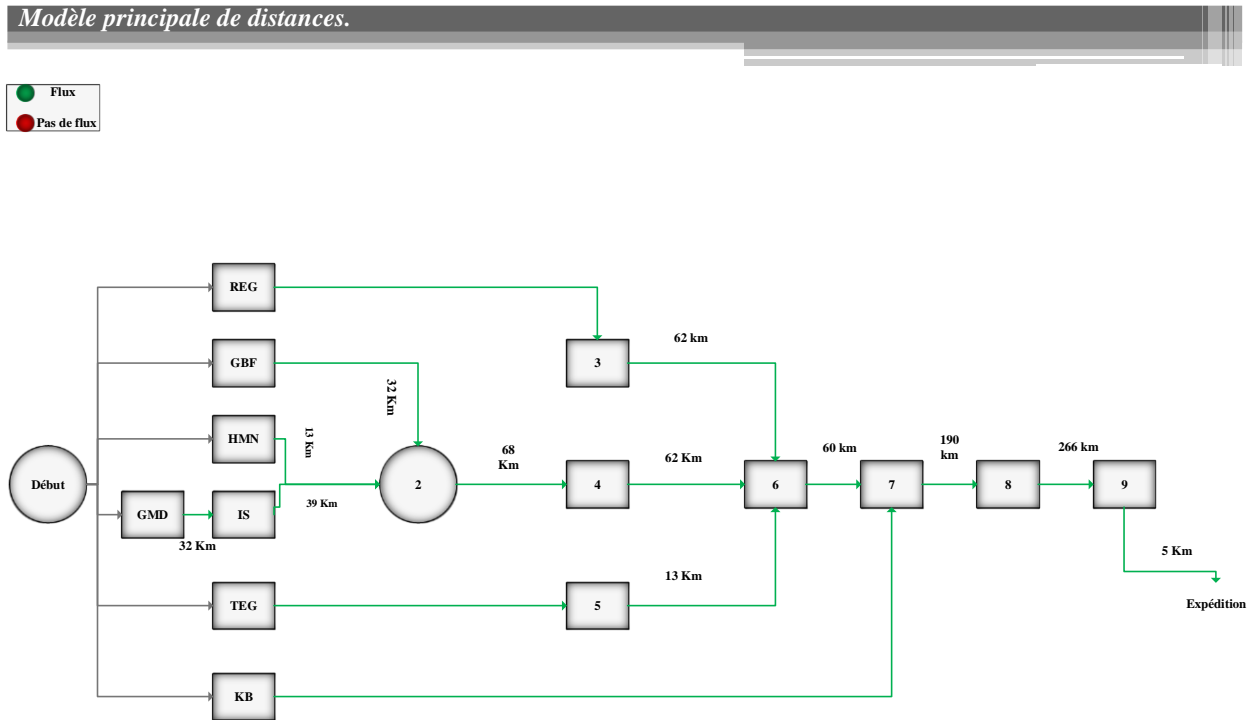


Figure V. 3 Modèle principale de distances

Source : Etablie par nous même

En appliquant l’algorithme de Bellman-Ford sur ce modèle on obtient une arborescence de 722 Km.

Du coup Notre graphe devient ainsi :

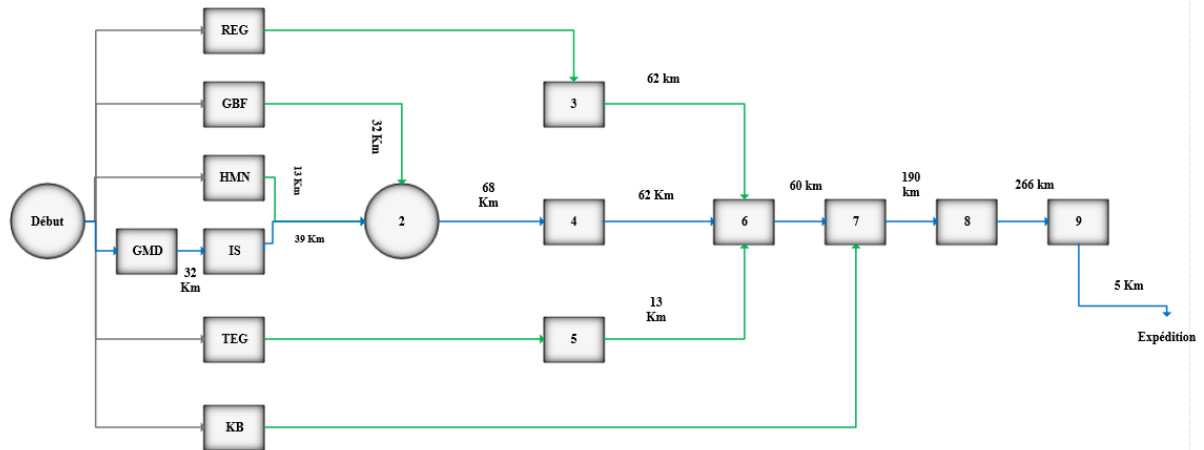


Figure V. 4 Modèle principale de distance optimisé

Source : Etablie par nous-même.

V.3 Les scénarios de production

Suivant notre analyse de distance en utilisant l’algorithme de Bellman-Ford, ça s’est avéré que pour en optimiser étroitement notre réseau, fallait faire une modélisation graphique et une analyse par scénarios de production. D’après notre examination sur les données de production fournies on a pu conclure 3 scénarios qui vont être présenté en ce qui suivre :

Avant de bien entamer la dissection de nos scénarios, on présente en dessous les graphes du modèle graphique principale ainsi que nos observations :

a) Graphe de production totale

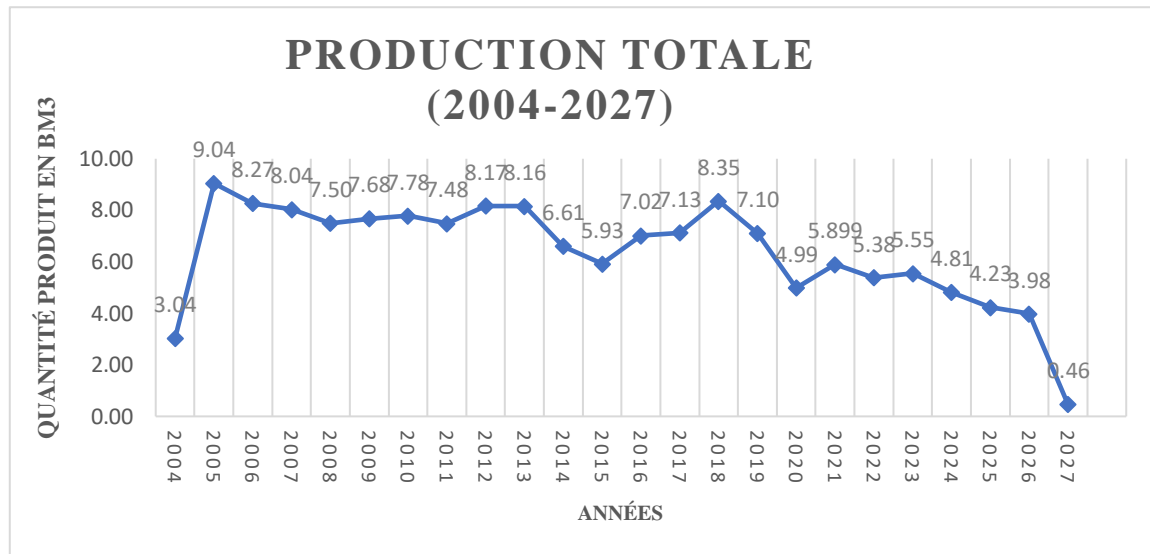


Figure V. 5 Graphe de production totale

Source : Etablie par nous même

a.1 Interprétation

Le graphique représente la production de gaz pour le projet In Salah Gaz de 2004 à 2027. Les années sont indiquées sur l'axe horizontal, tandis que les valeurs de production de gaz sont indiquées sur l'axe vertical.

En observant les données, on peut noter quelques tendances et points saillants :

- **Variabilité de la production :** La production de gaz connaît des fluctuations d'une année à l'autre. Il y a des années où la production augmente, suivies par des années où elle diminue.
- **Stabilité de la production (2006-2010) :** La production de gaz était relativement stable et constante pendant les années 2006 à 2010, avec des valeurs oscillant autour de 7,5 Bm³ à 8,0 Bm³.
- **Baisse significative de la production (2014-2016) :** À partir de l'année 2014, on observe une chute notable de la production de gaz, avec une valeur minimale atteinte en 2015 (5,93 Bm³). Cela pourrait être dû à divers facteurs, tels que des problèmes techniques, des ajustements de l'exploitation ou des fluctuations du marché.
- **Reprise de la production (2016-2018) :** Après la baisse de production en 2014-2015, il y a une légère reprise à partir de 2016, avec une augmentation progressive jusqu'en 2018, atteignant un pic à 8,35 Bm³. Cette reprise peut être attribuée à des facteurs tels que l'optimisation des processus, l'augmentation de la demande ou des investissements supplémentaires.

- **Nouvelle baisse de la production (2020-2023) :** À partir de 2020, la production de gaz diminue à nouveau, avec une valeur minimale en 2020 (4,99 Bm³) et une légère augmentation en 2021 (5,899 Bm³) et en 2022 (5,38 Bm³). Les raisons de cette baisse pourraient être multiples, comme l'épuisement des réserves de gaz disponibles, des problèmes opérationnels ou des facteurs externes affectant l'industrie du gaz.
- **Prévision de la production future (2023-2027) :** Les données disponibles pour les années 2023 à 2027 indiquent une légère augmentation de la production de gaz, avec des valeurs se situant entre 4,81 Bm³ et 5,55 Bm³. Cependant, il est important de noter que ces chiffres ne représentent qu'une projection et peuvent être soumis à des variations en fonction de divers facteurs économiques, environnementaux et politiques.

En résumé, le graphique illustre les fluctuations de la production de gaz pour le projet In Salah Gaz de 2004 à 2027, avec des périodes de stabilité, de baisse et de légère reprise. Ces variations peuvent être dues à des facteurs internes et externes qui influencent l'industrie du gaz et la production d'une année à l'autre.

a.2 Conclusion partielle :

La production de gaz pour le projet In Salah Gaz de 2004 à 2027 présente plusieurs tendances et fluctuations significatives. Voici une synthèse de ces interprétations :

- **Tendance globale :** La production de gaz connaît des fluctuations d'une année à l'autre, avec des périodes de stabilité, de baisse et de légère reprise.
- **Stabilité et baisse de production :** Entre 2006 et 2010, la production de gaz était relativement stable, puis a connu une baisse notable à partir de 2014, atteignant un creux en 2015. Ces variations peuvent être attribuées à des facteurs techniques, opérationnels ou économiques.
- **Reprise de production :** Après la baisse de 2014-2015, il y a eu une légère reprise de la production de gaz à partir de 2016, avec une augmentation progressive jusqu'en 2018. Cela peut être le résultat d'optimisations opérationnelles ou d'une demande accrue.
- **Nouvelle baisse de production :** À partir de 2020, la production de gaz a diminué à nouveau, atteignant un creux en 2020. Les raisons de cette baisse pourraient être liées à des problèmes opérationnels ou à des facteurs externes.
- **Prévision de production future :** Les projections pour les années 2023 à 2027 indiquent une légère augmentation de la production de gaz. Cependant, ces chiffres sont sujets à des variations en fonction de facteurs économiques, environnementaux et politiques.

b) Graphe de production par champ

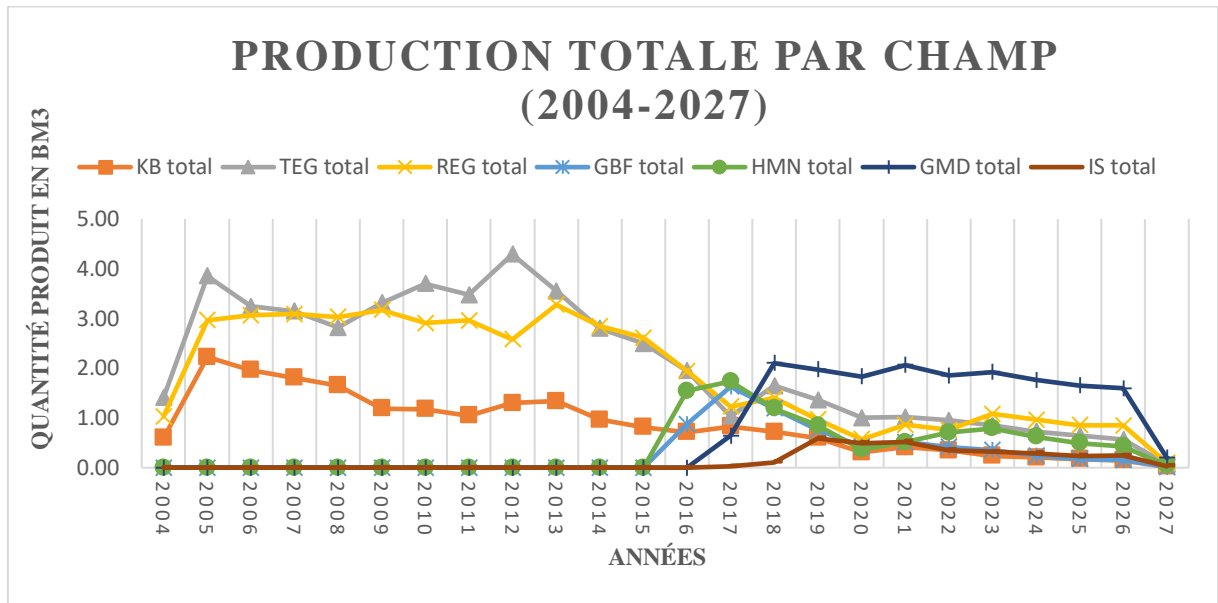


Figure V. 6 Graphe de production par champ

Source : Etablie par nous même

b.1 Interprétation

Le graphe représente la variation de production de gaz au fil des années pour différents champs de gaz. Voici une interprétation des valeurs données :

- KB :** Le champ KB a connu une diminution constante de sa production de gaz, passant de 0,60 Bm³ en 2004 à 0,24 Bm³ en 2023. La production de gaz dans le champ KB est estimée à diminuer continuellement au cours des prochaines années, passant de 0,24 Bm³ en 2023 à une estimation de 0,21 Bm³ en 2024 et 0,17 Bm³ en 2025 jusqu'à 0,02 Bm³ en 2027. Cette tendance à la baisse peut indiquer l'épuisement des réserves de gaz dans ce champ ou à une réduction de l'activité de production.
- TEG :** La production de gaz dans le champ TEG a augmenté de manière significative au cours des premières années, passant de 1,41 Bm³ en 2004 à un pic de 4,29 Bm³ en 2012. Cependant, par la suite, la production a commencé à diminuer progressivement pour atteindre 0,85 Bm³ en 2023. Les estimations suggèrent que la production de gaz dans le champ TEG continuera de diminuer, passant de 0,85 Bm³ en 2023 à une estimation de 0,72 Bm³ en 2024 et 0,64 Bm³ en 2025 jusqu'à une valeur de 0,07 Bm³ en 2027. L'augmentation peut être expliquée par des facteurs tels que l'exploitation des réserves, les investissements dans de nouveaux puits ou des changements dans les

conditions géologiques du champ. La diminution peut être attribuée à l'épuisement des réserves de gaz ou à d'autres facteurs géologiques ou économiques.

- **REG** : La production de gaz dans le champ REG a montré une tendance générale à la baisse au cours des années, passant de 1,03 Bm³ en 2004 à 1,08 Bm³ en 2023. Cette variation relativement faible peut indiquer une stabilité de la production de gaz dans ce champ. Les estimations indiquent une légère augmentation de la production de gaz, passant de 1,08 Bm³ en 2023 à une estimation de 0,97 Bm³ en 2024 et 0,85 Bm³ en 2025 ainsi une diminution jusqu'à 0,10 Bm³ en 2027. Cette augmentation peut être le résultat d'investissements dans de nouveaux puits ou de nouvelles découvertes de réserves de gaz.
- **GBF** : Le champ GBF a montré une production de gaz nul au cours de la période 2004-2015, avec des valeurs constantes autour de 0,00 Bm³. Cela indique une absence de production de gaz dans ce champ. Le champ GBF fait partie des parties des champs de la deuxième phase d'exploitation qui a commencé en 2016. Au cours des années suivantes, la production de GBF est restée relativement faible, atteignant un maximum de 0,97 Bm³ en 2018. Cependant, la production de GBF total a diminué progressivement jusqu'en 2027, avec une production minimale de 0,01 Bm³.
- **HMN** : Le champ HMN a également montré une production de gaz nul, avec des valeurs constantes à 0,00 Bm³ tout au long de la période 2004-2015, il fait partie des champs de la deuxième phase de production qui a commencé en 2016. En 2016, la production de HMN était de 1,54 Bm³, ce qui en faisait l'un des principaux contributeurs à la production globale cette année-là. La production de HMN a montré une tendance à la baisse au fil des ans, atteignant un point bas de 0,04 Bm³ en 2027.
- **GMD** : Le champ GMD a initialement montré une production de gaz nulle, mais à partir de 2016, il a connu une augmentation progressive de la production pour atteindre 1,93 Bm³ en 2023. Cette augmentation peut indiquer un développement plus récent du champ ou une exploration plus poussée des réserves de gaz. En 2016, la production de GMD était de 0 Bm³, indiquant une absence de production pour ce champ cette année-là. À partir de 2018, la production de GMD a augmenté progressivement, devenant le champ le plus producteur à partir de cette année-là. La production de GMD a montré des fluctuations variables, atteignant un maximum de 2,10 Bm³ en 2018, puis diminuant légèrement jusqu'en 2027 avec une production de 0,03 Bm³.

- IS** : Le champ IS a montré une production initialement nulle jusqu'en 2016. À partir de 2017, la production a commencé à augmenter progressivement, atteignant un niveau de 0,02 Bm³ cette année-là. Par la suite, la production de IS a continué à augmenter régulièrement, avec une croissance plus prononcée à partir de 2019. En 2019, la production a atteint 0,59 Bm³, montrant une augmentation significative par rapport aux années précédentes. Au cours des années suivantes, la production de IS a connu des fluctuations relativement stables, oscillant entre 0,29 Bm³ en 2024 et 0,52 Bm³ en 2021. Ces fluctuations indiquent une certaine variabilité dans la production annuelle du champ. Finalement, en 2027, la production de IS est retombée à 0,03 Bm³, montrant une diminution par rapport aux années précédentes.

V.3.1 Scénario 1 (2004-2016)

Voici une figure qui représente la modélisation graphique de notre réseau suivant les données de ce scénario.

a) Modèle du scénario 1 (2004-2016)

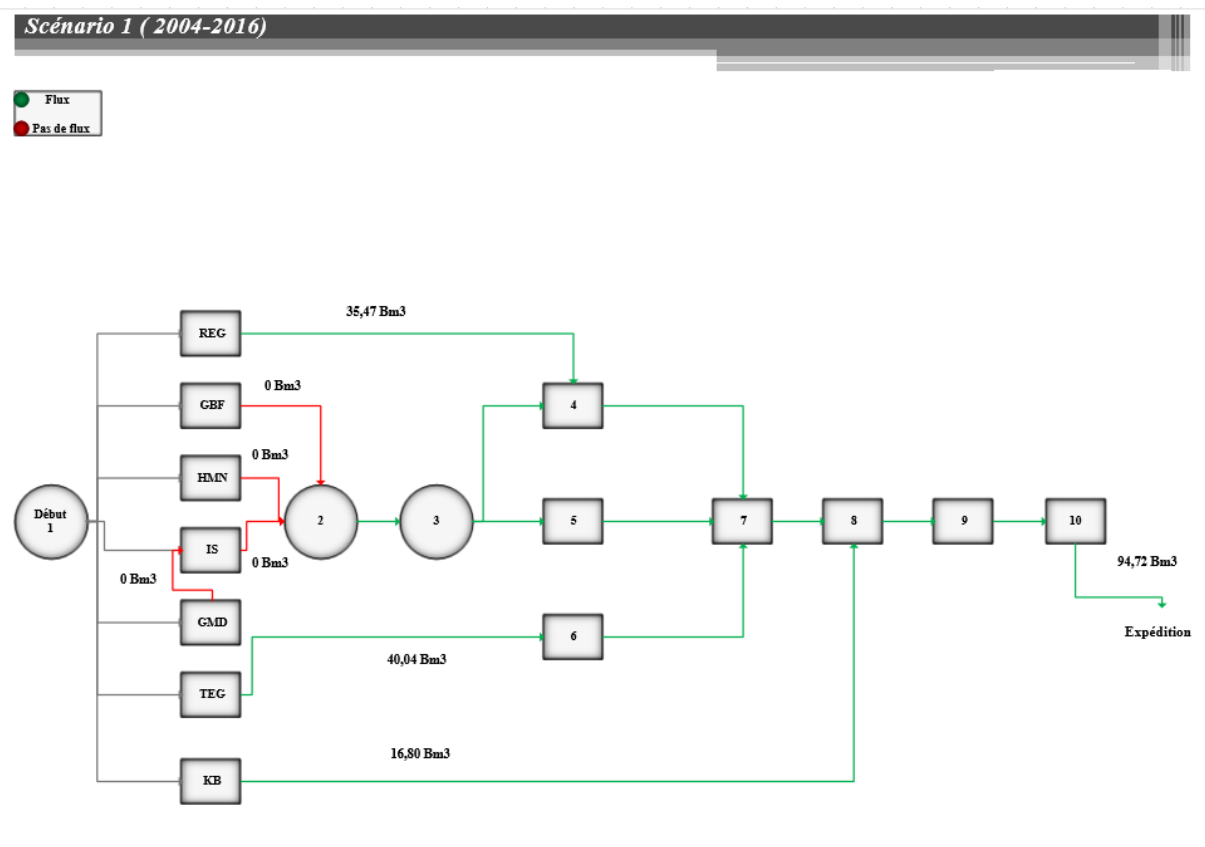


Figure V. 7 Modèle du Scénario 1

Source : Etablie par nous même

Ce modèle indique les flux induits durant la période de (2004-2016), la quantité totale produite durant cette période est de 94,72 Bm³

Nous passons à l'analyse des graphes de cette période :

b) Graphe de Production totale

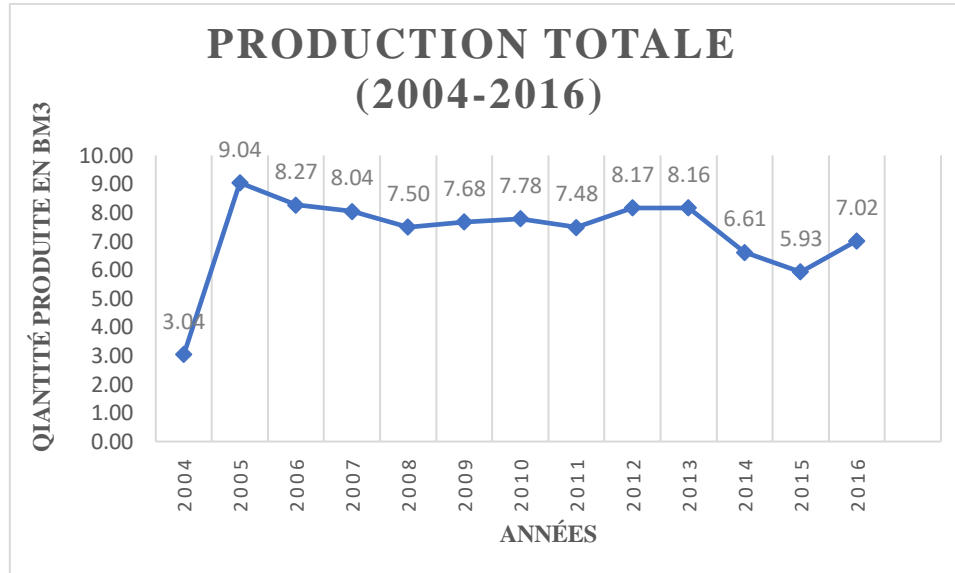


Figure V. 8 Graphe de production totale-Scénario 1

Source : Etablie par nous même

b.1 Interprétation

Le graphique représente la production annuelle du projet In Salah Gaz de 2004 à 2016. Les années sont indiquées sur l'axe horizontal, tandis que les valeurs de production sont indiquées sur l'axe vertical.

En observant les données, voici une interprétation :

- **Variation de la production :** La production de gaz dans le projet In Salah Gaz a connu des fluctuations au fil des années. On observe des années de croissance de la production, suivies de années de diminution. Ces variations peuvent être influencées par divers facteurs, tels que l'exploitation des réserves, les ajustements de l'activité de production ou les fluctuations du marché du gaz.
- **Croissance initiale (2004-2005) :** La production de gaz a connu une augmentation significative, passant de 3,04 Bm³ en 2004 à 9,04 Bm³ en 2005. Cette forte croissance peut être le résultat de l'optimisation des processus de production, de l'exploitation de nouvelles zones de réserves ou d'une demande croissante.
- **Stabilité et légères fluctuations (2006-2013) :** Pendant cette période, la production de gaz est restée relativement stable, oscillant autour de 7,50 à 8,27 Bm³. Bien qu'il y ait

eu quelques légères fluctuations d'une année à l'autre, la production est restée dans une fourchette relativement étroite.

- **Baisse de la production (2014-2016) :** À partir de 2014, on observe une diminution significative de la production de gaz, avec une valeur minimale atteinte en 2015 (5,93 Bm³). Cette baisse peut être attribuée à des facteurs tels que l'épuisement des réserves de gaz disponibles, des problèmes techniques ou des ajustements de l'activité de production.

En résumé, le graphique illustre les fluctuations de la production de gaz dans le projet In Salah Gaz de 2004 à 2016. La production a connu une forte croissance initiale, une période de stabilité relative, puis une baisse vers la fin de la période. Ces variations peuvent être influencées par divers facteurs internes et externes qui affectent l'industrie du gaz et la production d'une année à l'autre.

b.2 Conclusion partielle

En observant les données de production annuelle du projet In Salah Gaz de 2004 à 2016, plusieurs observations peuvent être faites :

- **Croissance initiale :** Entre 2004 et 2005, la production de gaz a connu une augmentation significative, passant de 3,04 Bm³ à 9,04 Bm³. Cette croissance peut être attribuée à l'optimisation des processus de production, à l'exploitation de nouvelles zones de réserves ou à une demande croissante.
- **Stabilité relative :** De 2006 à 2013, la production de gaz est restée relativement stable, oscillant entre 7,50 Bm³ et 8,27 Bm³. Bien qu'il y ait eu de légères fluctuations, la production est globalement restée dans une fourchette étroite.
- **Baisse de la production :** À partir de 2014, la production de gaz a commencé à diminuer de manière significative, atteignant une valeur minimale en 2015 (5,93 Bm³). Cette baisse peut être attribuée à des facteurs tels que l'épuisement des réserves de gaz disponibles, des problèmes techniques ou des ajustements de l'activité de production.

Il est important de prendre en compte plusieurs éléments pour interpréter ces données :

- **Réserves de gaz :** Les fluctuations de la production peuvent être liées à l'épuisement progressif des réserves de gaz disponibles dans le projet In Salah Gaz. Une baisse de production peut indiquer que les réserves sont en train de se tarir.
- **Facteurs techniques :** Les problèmes techniques, tels que des pannes d'équipement ou des difficultés opérationnelles, peuvent également avoir un impact sur la production de

gaz. Il est possible que des problèmes techniques aient contribué à la baisse de production observée.

- **Évolution du marché :** Les fluctuations de la demande et les variations des prix du gaz sur le marché mondial peuvent également influencer la production. Des ajustements de l'activité de production peuvent être effectués en fonction des conditions du marché.

En résumé, le projet In Salah Gaz a connu une croissance initiale de la production de gaz, suivie d'une période de stabilité relative, puis d'une baisse de production. Cette évolution peut être expliquée par des facteurs tels que l'épuisement des réserves, des problèmes techniques et les fluctuations du marché. Une analyse plus approfondie, incluant des données actualisées et une évaluation des facteurs externes, serait nécessaire pour obtenir une compréhension complète de la situation du projet In Salah Gaz.

c) Graphe de production par champ

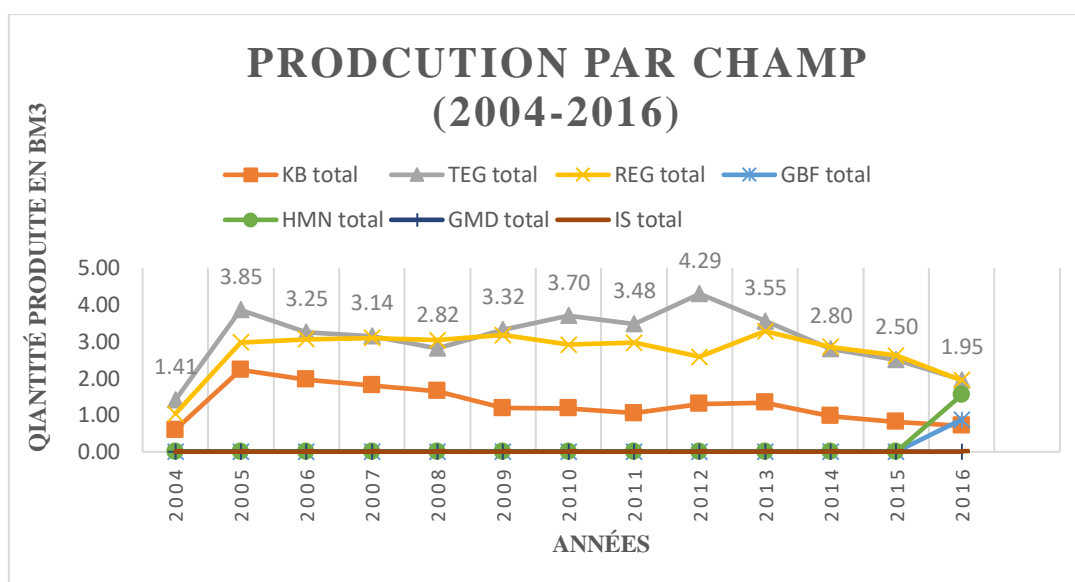


Figure V. 9 Graphe de production par champ-Scénario 1

Source : Etablie par nous-même.

c.1 Interprétation

Le graphique représente la production annuelle de gaz pour différents champs (KB, TEG, REG, GBF, HMN, GMD, IS) sur une période de 2004 à 2016. Les années sont indiquées sur l'axe horizontal, tandis que les valeurs de production sont indiquées sur l'axe vertical.

Voici une interprétation approfondie de ces chiffres :

- **Variation de la production par champ :** On observe des variations de la production de gaz d'un champ à l'autre au fil des années. Chaque champ a son propre profil de

production, ce qui peut être dû à des facteurs géologiques, à la taille des réserves, aux contraintes techniques spécifiques ou à d'autres considérations.

- **Production du champ KB :** Le champ KB total présente une production relativement stable au cours de la période étudiée, avec des niveaux de production oscillant entre 0,60 Bm³ en 2004 et 1,96 Bm³ en 2006, avant de diminuer à 0,71 Bm³ en 2016. Cette diminution peut être attribuée à des facteurs tels que l'épuisement des réserves ou des ajustements de l'activité de production.
- **Production des autres champs :** Les autres champs (TEG total, REG total, GBF total, HMN total, GMD total, IS total) montrent également des profils de production variés. Certains champs présentent une tendance générale à la baisse, comme le champ GBF total, dont la production atteint un pic en 2016 avec 0,88 Bm³, tandis que d'autres champs ont une production relativement stable, comme le champ TEG total et le champ REG total.
- **Absence de production pour certains champs :** Il est important de noter que certains champs (GBF, HMN, GMD, IS) n'ont pas enregistré de production de gaz au cours de la période étudiée, ce qui peut être dû à différentes raisons, telles que des réserves non exploitées ou des projets en phase d'exploration ou de développement.

En résumé, le graphique représente la production annuelle de gaz pour différents champs de 2004 à 2016. Chaque champ présente des profils de production distincts, avec des variations d'une année à l'autre. La production peut être influencée par des facteurs géologiques, des contraintes techniques, des ajustements de l'activité de production et d'autres considérations propres à chaque champ. Une analyse plus détaillée de chaque champ serait nécessaire pour comprendre pleinement les facteurs qui influencent leur production.

c.2 Conclusion partielle

Le graphique représente la production annuelle de gaz pour plusieurs champs (KB total, TEG total, REG, GBF, HMN, GMD, IS) de 2004 à 2016. Chaque champ présente des caractéristiques de production distinctes.

Le champ KB affiche une production relativement stable, avec une légère augmentation jusqu'en 2006, puis une diminution progressive jusqu'en 2016. Cela peut être le résultat de l'épuisement des réserves ou de l'ajustement de l'activité de production.

Les autres champs montrent des profils de production variés. Certains présentent une stabilité générale, comme le champ TEG et le champ REG, tandis que d'autres connaissent des fluctuations plus marquées.

Il est important de noter que certains champs, tels que GBF, HMN, GMD et IS, n'ont pas enregistré de production de gaz au cours de la période étudiée. Cela peut être dû à des raisons telles que des réserves non exploitées ou des projets en phase d'exploration ou de développement.

En résumé, le graphique met en évidence la diversité des profils de production de gaz des différents champs sur la période étudiée. Ces variations peuvent être influencées par des facteurs internes et externes propres à chaque champ, ce qui souligne l'importance d'une analyse approfondie pour comprendre les dynamiques de production des hydrocarbures.

V.3.2 Scénario 2 (2016-2017)

a) Modèle du scénario

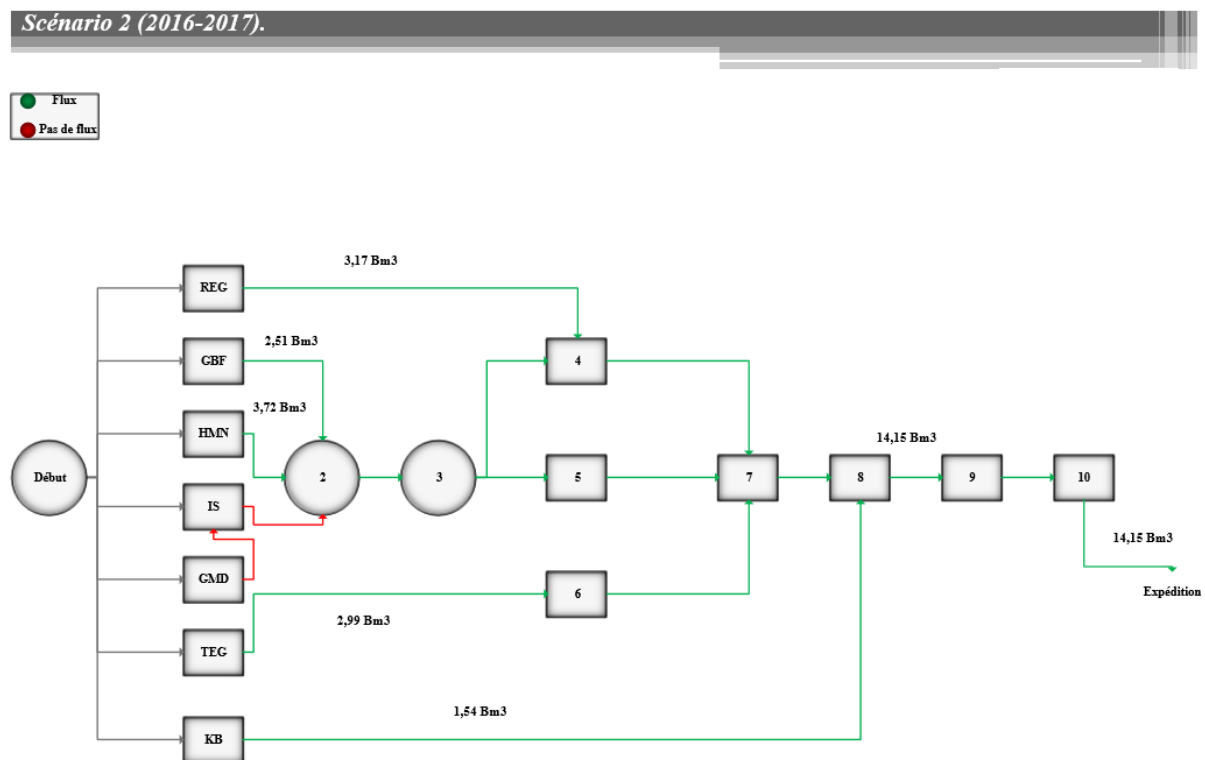


Figure V. 10 Modèle du scénario 2

Source : Etablie par nous même

Ce modèle indique les flux induits durant la période de (2016-2017), la quantité totale produite durant cette période est de 14,15 Bm³.

Nous passons à l'analyse des graphes de cette période :

b) Graphe de production totale

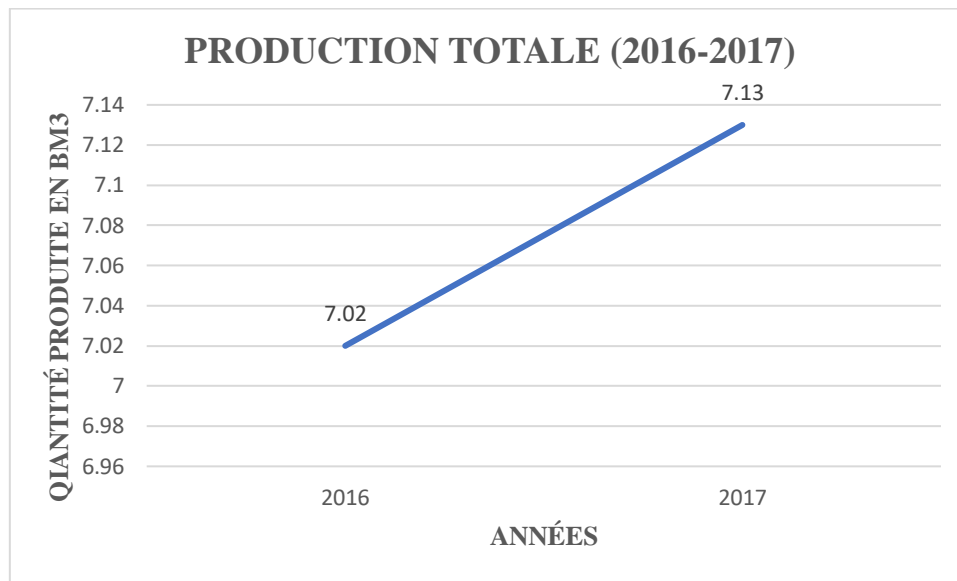


Figure V. 11 Graphe de production totale-scénario 2

Source : Etablie par nous même

b.1 Interprétation

Le graphe représente la production totale du projet In Salah Gaz pour les années 2016 et 2017. Voici une analyse de ces données :

- En 2016, la production totale d'In Salah Gaz s'est élevée à 7,02 Bm³. Cela indique le volume global de gaz produit par le projet au cours de cette année.
- En 2017, la production totale d'In Salah Gaz a légèrement augmenté pour atteindre 7,13 Bm³. Cette augmentation peut être interprétée comme une amélioration de la performance globale du projet et une augmentation de la production de gaz.

Il convient également de noter que d'autres facteurs, tels que les conditions du marché, les investissements dans l'exploration et la production, ainsi que les contraintes techniques, peuvent influencer la production totale d'un projet gazier. Une évaluation complète nécessiterait donc une prise en compte de ces éléments.

b.2 Conclusion partielle

, l'analyse des données de production totale d'In Salah Gaz pour les années 2016 et 2017 montre une légère augmentation de la production de gaz, suggérant une amélioration de la performance globale du projet. Cependant, d'autres facteurs tels que les conditions du marché, les investissements et les contraintes techniques peuvent également influencer la production totale. Une évaluation complète nécessiterait une prise en compte de ces éléments pour obtenir une image plus complète de la situation.

c) Graphe de production par champ

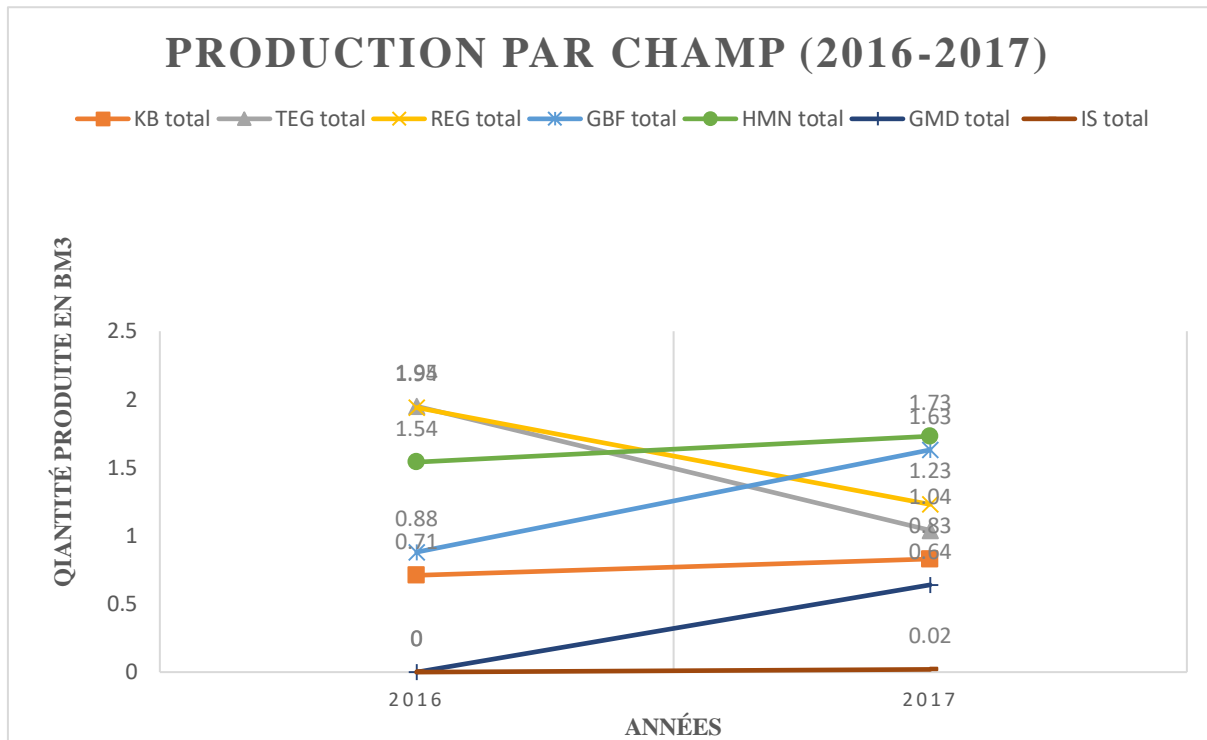


Figure V. 12 Graphe de production par champ-scénario 2

Source : Etablie par nous même

c.1 Interprétations

Le graphe représente la production par champ pour le projet In Salah Gaz sur les années 2016 et 2017. Voici une interprétation détaillée de ces données :

Champs et production en 2016 :

- **KB** : La production du champ KB était de 0,71 Bm³ en 2016.
- **TEG** : Le champ TEG a enregistré une production de 1,95 Bm³ en 2016, ce qui en fait le champ le plus productif cette année-là.
- **REG** : Le champ REG a produit 1,94 Bm³ en 2016.
- **GBF** : La production du champ GBF était de 0,88 Bm³ en 2016.
- **HMN** : Le champ HMN a enregistré une production de 1,54 Bm³ en 2016.
- **GMD** : Le champ GMD n'a pas produit de gaz en 2016.
- **IS** : Le champ IS a produit seulement 0,02 Bm³ en 2016.

c.2 Conclusion partielle

En compilant toutes les informations, voici une synthèse des interprétations du graphe représentant la production totale du projet In Salah Gaz pour les années 2016 et 2017 :

- **Année 2016 :**

La production totale d'In Salah Gaz était de 7,02 Bm³. Il s'agit d'une mesure globale de la production de gaz du projet pour cette année.

- **Année 2017 :**

La production totale d'In Salah Gaz a légèrement augmenté pour atteindre 7,13 Bm³. Cette augmentation indique une amélioration de la performance globale du projet et une augmentation de la production de gaz par rapport à l'année précédente.

En analysant ces données, quelques conclusions peuvent être tirées :

- Le projet In Salah Gaz a maintenu une production de gaz relativement stable au cours de ces deux années, avec une légère augmentation en 2017.
- La stabilité de la production peut être attribuée à une gestion efficace des champs gaziers et à des opérations de production bien exécutées.
- L'augmentation de la production en 2017 peut être le résultat de divers facteurs tels que des améliorations techniques, des investissements dans l'exploration et la production, ou des conditions favorables sur le marché.

Cependant, il est important de souligner que ces conclusions sont basées uniquement sur les données fournies pour les années 2016 et 2017. Une analyse plus approfondie nécessiterait une série de données sur une période plus longue pour évaluer les tendances de production à plus long terme, identifier les facteurs sous-jacents à ces variations et évaluer la durabilité de la production de gaz du projet In Salah Gaz.

Il convient également de noter que d'autres facteurs, tels que la demande en gaz, les contraintes opérationnelles et les considérations environnementales, peuvent également influencer la production globale d'un projet gazier. Par conséquent, une évaluation complète nécessiterait une analyse approfondie prenant en compte ces éléments.

Champs et production en 2017 :

- **KB :** La production du champ KB a augmenté pour atteindre 0,83 Bm³ en 2017, montrant une légère amélioration par rapport à l'année précédente.
- **TEG :** Le champ TEG a connu une baisse significative de sa production, passant de 1,95 Bm³ en 2016 à 1,04 Bm³ en 2017.
- **REG :** La production du champ REG a également diminué, passant de 1,94 Bm³ en 2016 à 1,23 Bm³ en 2017.
- **GBF :** Le champ GBF a enregistré une augmentation notable de sa production, passant de 0,88 Bm³ en 2016 à 1,63 Bm³ en 2017.

- **HMN** : Le champ HMN a maintenu une production élevée et stable, passant de 1,54 Bm³ en 2016 à 1,73 Bm³ en 2017.
- **GMD** : Le champ GMD est resté inactif, ne produisant pas de gaz en 2017.
- **IS** : Le champ IS a maintenu une faible production, atteignant seulement 0,02 Bm³ en 2017.

Cette interprétation met en évidence quelques tendances et variations dans la production des champs du projet In Salah Gaz :

- Les champs TEG et REG ont connu une diminution de leur production en 2017, ce qui peut être dû à des facteurs tels que l'épuisement des réserves ou des problèmes opérationnels ;
- Le champ GBF a enregistré une augmentation significative de sa production en 2017, indiquant peut-être une exploitation plus efficace des réserves ou des activités de développement ;
- Le champ HMN a maintenu une production stable et élevée, ce qui suggère une gestion efficace des réserves ou des caractéristiques géologiques favorables. Les champs GMD et IS ont eu une production négligeable, ce qui peut indiquer des problèmes techniques ou des réserves limitées.

V.3.3 Scénario 3 (2017-2027)

a) Modèle du scénario

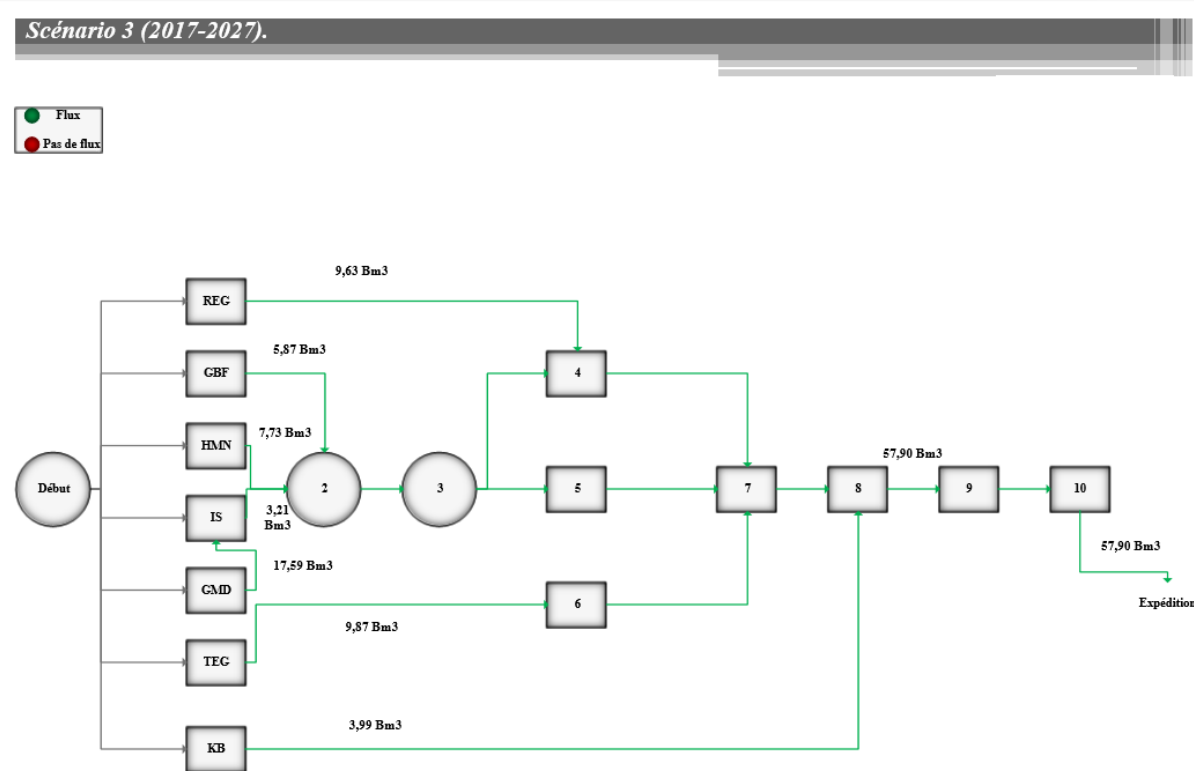


Figure V. 13 Modèle du scénario 3

Source : Etablie par nous même

Ce modèle graphique indique les flux induits durant la période de (2017-2027), la quantité totale produite durant cette période est de 57,90 Bm³

Nous passons à l'analyse des graphes de cette période :

b) Graphe de production totale

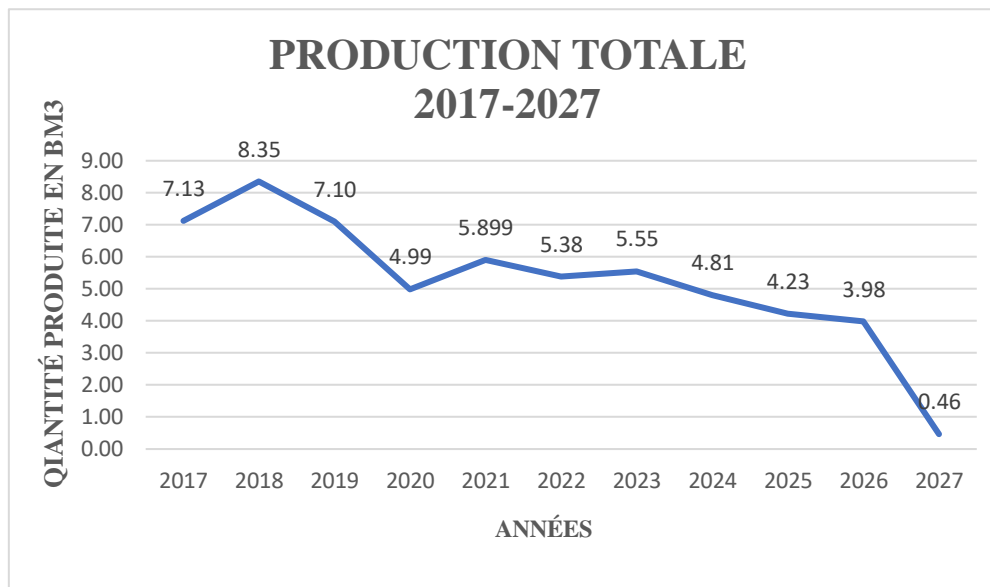


Figure V. 14 Graphe de production totale-scénario 3

Source : Etablie par nous même

b.1 Interprétation

Le graphe représente la production de gaz pour le projet In Salah Gaz au fil des années, avec les valeurs données pour chaque année. Voici une interprétation approfondie de ce graphe :

- **2017** : La production de gaz atteint 7,13 milliards de mètres cubes (Bm³).
- **2018** : La production augmente à 8,35 Bm³, montrant une croissance significative par rapport à l'année précédente.
- **2019** : La production diminue légèrement pour atteindre 7,10 Bm³. Bien que la production ait diminué par rapport à 2018, elle reste relativement élevée.
- **2020** : La production chute considérablement à 4,99 Bm³. Cette baisse peut être due à divers facteurs tels que des conditions géologiques moins favorables, des problèmes techniques ou des décisions de gestion.
- **2021** : La production remonte légèrement à 5,899 Bm³, mais elle reste en dessous des niveaux des années précédentes. Cela suggère que des défis persistants pourraient encore affecter la production.
- **2022** : La production continue de diminuer à 5,38 Bm³, indiquant une tendance à la baisse.
- **2023** : La production connaît une légère augmentation à 5,55 Bm³ par rapport à l'année précédente, mais elle reste inférieure aux niveaux initiaux de production.

- **2024-2027** : La production de gaz continue de diminuer progressivement au fil de ces années. En 2027, la production chute drastiquement à seulement 0,46 Bm³.

L'interprétation globale de ce graphe suggère une tendance générale à la baisse de la production de gaz pour le projet In Salah Gaz. Les premières années ont montré une croissance significative, mais à partir de 2020, la production a commencé à diminuer de manière constante. Cela peut indiquer des difficultés techniques, des contraintes géologiques ou d'autres facteurs qui ont un impact sur la production de gaz.

b.2 Conclusion partielle

En synthèse, le graphe de la production de gaz pour le projet In Salah Gaz présente les tendances suivantes :

- **Croissance initiale** : Entre 2017 et 2018, la production de gaz a connu une croissance significative, passant de 7,13 Bm³ à 8,35 Bm³.
- **Déclin progressif** : À partir de 2020, la production de gaz a commencé à diminuer régulièrement, atteignant son niveau le plus bas en 2027, avec seulement 0,46 Bm³.
- **Fluctuations intermédiaires** : Bien que la tendance générale soit à la baisse, il y a eu des fluctuations légères dans la production au fil des années. Par exemple, en 2019, la production a diminué légèrement, mais a légèrement augmenté en 2021 et 2023.
- **Facteurs potentiels** : Plusieurs facteurs pourraient influencer la baisse de la production de gaz, tels que des conditions géologiques moins favorables, des problèmes techniques ou des décisions de gestion.

Il est important de prendre en compte ces informations pour formuler des recommandations et des actions potentielles :

- **Analyse des facteurs de baisse** : Une analyse approfondie des facteurs qui ont contribué à la baisse de la production de gaz est nécessaire. Cela pourrait inclure l'examen des conditions géologiques, l'évaluation des problèmes techniques rencontrés et l'identification des décisions de gestion qui pourraient avoir un impact sur la production.
- **Mesures correctives** : Une fois les facteurs identifiés, des mesures correctives appropriées devraient être mises en place pour atténuer les problèmes et stimuler la production de gaz. Cela pourrait impliquer des investissements dans la recherche géologique pour identifier de nouvelles zones de production, l'amélioration des processus techniques et l'optimisation des décisions de gestion.

- **Suivi continu** : Il est essentiel de mettre en place un suivi régulier de la production de gaz afin de détecter rapidement les fluctuations et de prendre des mesures proactives pour les corriger. Cela pourrait inclure des rapports réguliers, des évaluations de performance et des analyses approfondies pour prendre des décisions éclairées.

En résumé, la tendance générale à la baisse de la production de gaz pour le projet In Salah Gaz nécessite une analyse approfondie des facteurs de diminution et la mise en place de mesures correctives appropriées. Un suivi continu de la production et une gestion proactive sont essentiels pour maintenir ou augmenter la production de gaz à l'avenir.

c) Graphe de production par champ

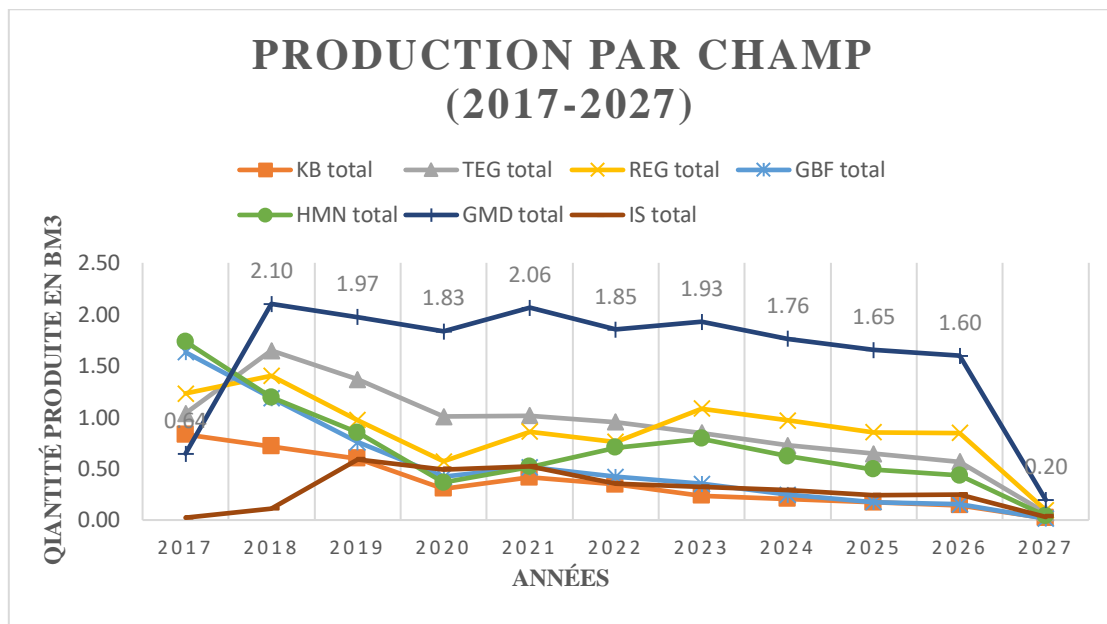


Figure V. 15 Graphe de production par champ-scénario 3

Source : Etablie par nous même

c.1 Interprétation

Le graphe représente la production annuelle de différents champs du projet In Salah Gaz au fil des années. Voici une interprétation approfondie de ce graphe en prenant en compte toutes les données fournies :

- **Champ KB** : La production de ce champ diminue régulièrement au fil des années, passant de 0,83 Bm³ en 2017 à seulement 0,02 Bm³ en 2027. Cela indique une baisse significative de la production de pétrole brut de ce champ.
- **Champ TEG** : Ce champ présente une certaine stabilité dans sa production globale, avec des variations légères d'une année à l'autre. La production reste relativement constante, oscillant entre 1,04 Bm³ en 2017 et 1,01 Bm³ en 2021, puis diminuant légèrement à 0,07 Bm³ en 2027.

- **Champ REG** : La production de ce champ montre une tendance à la baisse générale, passant de 1,23 Bm³ en 2017 à 0,10 Bm³ en 2027. Il y a une diminution constante de la production de gaz de ce champ au fil des années.
- **Champ GBF** : La production de ce champ est relativement stable, avec des fluctuations mineures d'une année à l'autre. La production varie entre 1,63 Bm³ en 2017 et 0,01 Bm³ en 2027, indiquant une production globalement constante.
- **Champ HMN** : La production de ce champ est également relativement stable, avec des variations légères d'une année à l'autre. La production oscille entre 1,73 Bm³ en 2017 et 0,04 Bm³ en 2027.
- **Champ GMD** : La production de ce champ montre une tendance générale à la baisse, passant de 0,64 Bm³ en 2017 à 0,20 Bm³ en 2027. Il y a une diminution progressive de la production de gaz naturel de ce champ.
- **Champ IS** : La production de ce champ diminue de manière significative au fil des années, passant de 0,02 Bm³ en 2017 à 0,03 Bm³ en 2027. Cela indique une diminution marquée de la production de gaz de ce champ.

En résumé, le graphe met en évidence différentes tendances de production pour chaque champ du projet In Salah Gaz. Certains champs connaissent une diminution constante de leur production, tandis que d'autres affichent une relative stabilité. L'interprétation de ces données suggère la nécessité d'analyser en détail les raisons de la baisse de production des champs en question et d'envisager des mesures correctives appropriées pour maintenir ou augmenter la production de gaz et de pétrole brut à l'avenir.

c.2 Conclusion partielle

En synthèse, le graphe représente la production annuelle de différents champs du projet In Salah Gaz. Voici une compilation des informations et une interprétation en tant que professionnel du domaine des hydrocarbures :

- **Tendance générale** : Plusieurs champs du projet In Salah Gaz montrent une tendance à la baisse de leur production au fil des années. Cela indique une diminution globale de la production de gaz et de pétrole brut.
- **Champs en déclin** : Les champs KB, REG, GMD et IS présentent tous une diminution progressive de leur production. Cela peut être dû à des facteurs tels que l'épuisement des réserves, des conditions géologiques moins favorables ou des problèmes techniques spécifiques à ces champs.

- **Stabilité relative :** Certains champs, tels que TEG, GBF et HMN, maintiennent une production relativement stable au fil des années. Cela peut indiquer une gestion efficace des réserves ou des caractéristiques géologiques favorables qui soutiennent la production constante.
- **Fluctuations mineures :** Il y a des fluctuations mineures d'une année à l'autre pour certains champs, mais ces variations restent relativement limitées. Cela peut être dû à des facteurs saisonniers ou à des ajustements opérationnels.

En tant que professionnel du domaine des hydrocarbures, il est important de considérer ces informations pour formuler des recommandations et des actions potentielles :

1. Analyse des champs en déclin : Une analyse approfondie des champs en déclin, tels que KB, REG, GMD et IS, est nécessaire pour comprendre les raisons de la baisse de production. Cela peut inclure des études géologiques approfondies, des évaluations des performances et des examens des pratiques de gestion.

2. Optimisation des champs stables : Les champs qui maintiennent une production stable peuvent servir de référence pour identifier les meilleures pratiques de gestion et les stratégies d'optimisation. Il est important d'identifier les facteurs qui contribuent à leur stabilité et de les appliquer aux autres champs lorsque cela est possible.

3. Exploration de nouvelles opportunités : Une évaluation des réserves et des opportunités d'exploration de nouveaux champs ou de zones d'extension peut être envisagée pour compenser la baisse de production des champs en déclin.

4. Surveillance continue : Un suivi régulier de la production de chaque champ est essentiel pour détecter rapidement les tendances et les fluctuations. Cela permettra de prendre des mesures correctives opportunes et de mettre en œuvre des stratégies d'optimisation appropriées.

En résumé, la tendance générale à la baisse de la production de gaz et de pétrole brut dans différents champs du projet In Salah Gaz nécessite une analyse approfondie des champs en déclin et des efforts pour optimiser les champs stables. L'exploration de nouvelles opportunités et une surveillance continue de la production aideront à maintenir ou à augmenter la production de manière durable.

V.4 Partie code

V.4.1 Explication du code

Le code est réparti en cellules, dont chaque cellule est expliquée en dessous :

```
class Graph:
    def __init__(self, vertices):
        self.V = vertices
        self.graph = []
```

Figure V. 16 Cellule 1

Source : Etablie par nous même

La classe Graph représente un graphe. Voici ce que fait la méthode `__init__()` :

- **def __init__(self, vertices):** : C'est le constructeur de la classe Graph. Il est appelé lorsque vous créez une nouvelle instance de la classe Graph.
- **self.V = vertices** : **self.V** est une variable qui représente le nombre de sommets (ou vertices) dans le graphe. Elle est initialisée avec la valeur passée en paramètre vertices.
- **self.graph = []** : **self.graph** est une liste vide qui sera utilisée pour stocker les arêtes (ou edges) du graphe.

En résumé, la classe Graph est utilisée pour représenter un graphe, et la méthode `__init__()` permet d'initialiser le nombre de sommets du graphe et de créer une liste vide pour stocker les arêtes.

```
def add_edge(self, u, v, w):
    self.graph.append([u, v, w])
```

Figure V. 17 Cellule 2

Source : Etablie par nous même

La méthode `add_edge(self, u, v, w)` permet d'ajouter une arête (ou edge) au graphe. Voici son explication :

- **self.graph.append([u, v, w])** : Cette ligne de code ajoute une nouvelle liste [u, v, w] à la liste self.graph. Cette liste représente une arête du graphe, où u est le sommet source de l'arête, v est le sommet cible de l'arête, et w est le poids (ou la valeur) associé à cette arête.

En utilisant la méthode add_edge(), vous pouvez ajouter des arêtes au graphe en spécifiant les sommets source et cible, ainsi que le poids associé à chaque arête. Ces arêtes ajoutées définissent la structure du graphe et les relations entre les sommets.

```
def bellman_ford(self, source):  
    distance = [float('inf')] * self.V  
    distance[source] = 0  
    predecessor = [None] * self.V
```

Figure V. 18 Cellule 3

Source : Etablie par nous même

La méthode **bellman_ford(self, source)** est utilisée pour exécuter l'algorithme de Bellman-Ford sur le graphe. Voici son explication :

- **distance = [float('inf')] * self.V** : Cette ligne de code initialise une liste distance de longueur self.V (le nombre de sommets dans le graphe) avec des valeurs initiales infinies. Cela représente les distances initiales de la source à tous les autres sommets du graphe. L'infini est utilisé pour indiquer que les distances sont inconnues au départ.
- **distance[source] = 0** : Cette ligne de code met la distance de la source à elle-même à 0, car la distance de la source à elle-même est toujours de 0.
- **predecessor = [None] * self.V** : Cette ligne de code initialise une liste predecessor de longueur self.V avec des valeurs nulles. Cette liste sera utilisée pour stocker les prédécesseurs de chaque sommet dans le chemin le plus court depuis la source.

L'algorithme de Bellman-Ford itère sur toutes les arêtes du graphe pour trouver les chemins les plus courts depuis la source vers tous les autres sommets. Il met à jour les distances et les prédécesseurs à chaque itération en utilisant la relaxation des arêtes.

La méthode bellman_ford(self, source) permet de calculer les distances les plus courtes et les prédécesseurs pour chaque sommet dans le graphe en utilisant l'algorithme de Bellman-Ford.

```
# Step 1: Initialize distances and predecessors
for _ in range(self.V - 1):
    for u, v, w in self.graph:
        if distance[u] != float('inf') and distance[u] + w < distance[v]:
            distance[v] = distance[u] + w
            predecessor[v] = u
```

Figure V. 19 Cellule 4

Source : Etablie par nous même

Dans cette partie du code, nous itérons sur les arêtes du graphe et effectuons la relaxation des arêtes pour mettre à jour les distances et les prédécesseurs dans l'algorithme de Bellman-Ford. Voici une explication du code :

- **for _ in range(self.V - 1):** : Cette boucle externe itère (self.V - 1) fois, où self.V est le nombre de sommets dans le graphe. Cette itération garantit que les distances sont mises à jour correctement pour les chemins les plus courts.
- **for u, v, w in self.graph:** : Cette boucle interne itère sur les arêtes du graphe, représentées par les tuples (u, v, w), où u est le sommet source, v est le sommet cible et w est le poids de l'arête.
- **if distance[u] != float('inf') and distance[u] + w < distance[v]:** : Cette condition vérifie si la distance de la source au sommet u n'est pas infinie (ce qui signifie qu'il existe un chemin de la source à u) et si la somme de la distance de la source à u et du poids de l'arête (distance[u] + w) est inférieure à la distance actuelle du sommet v. Si cette condition est satisfaite, cela signifie que nous avons trouvé un chemin plus court de la source à v, nous mettons donc à jour la distance[v] avec la nouvelle valeur et le prédécesseur[v] avec le sommet u.

L'objectif de cette étape est de trouver les chemins les plus courts en effectuant la relaxation des arêtes. Nous itérons sur toutes les arêtes du graphe et si nous trouvons un chemin plus court, nous mettons à jour la distance[v] et le prédécesseur[v] correspondant. À la fin de cette étape, les distances et les prédécesseurs seront mis à jour avec les chemins les plus courts depuis la source vers tous les autres sommets accessibles.

```
# Step 2: Check for negative cycles
for u, v, w in self.graph:
    if distance[u] != float('inf') and distance[u] + w < distance[v]:
        return "Graph contains a negative cycle"

return distance, predecessor
```

Figure V. 20 Cellule 5

Source : Etablie par nous même

Dans cette partie du code, nous vérifions la présence de cycles négatifs dans le graphe après l'exécution de l'algorithme de Bellman-Ford. Voici une explication du code :

- **for u, v, w in self.graph:** : Cette boucle itère sur toutes les arêtes du graphe, représentées par les tuples (u, v, w), où u est le sommet source, v est le sommet cible et w est le poids de l'arête.
- **if distance[u] != float('inf') and distance[u] + w < distance[v]:** : Cette condition vérifie si la distance de la source au sommet u n'est pas infinie (ce qui signifie qu'il existe un chemin de la source à u) et si la somme de la distance de la source à u et du poids de l'arête ($\text{distance}[u] + w$) est inférieure à la distance actuelle du sommet v. Si cette condition est satisfaite, cela signifie qu'il existe un chemin plus court de la source à v, même après la phase de relaxation. Cela indique la présence d'un cycle négatif dans le graphe.
- **return "Graph contains a negative cycle"** : Si la condition pour détecter un cycle négatif est satisfaite, la fonction retourne la chaîne de caractères "Graph contains a negative cycle" pour indiquer la présence de ce type de cycle dans le graphe.

return distance, predecessor : Si aucune détection de cycle négatif n'est effectuée, la fonction retourne les listes distance et predecessor, qui contiennent les distances les plus courtes et les prédécesseurs correspondants pour chaque sommet.

Cette étape finale du code permet de vérifier si le graphe contient un cycle négatif après l'exécution de l'algorithme de Bellman-Ford. Si un cycle négatif est détecté, cela signifie qu'il n'y a pas de plus court chemin dans le graphe car les distances peuvent devenir arbitrairement petites en bouclant dans le cycle négatif.

V.4.2 Résultat du code

En introduisant nos données de distance entre les sommets dans le code, le code nous affiche une arborescence de 722 Km similaire à nos calculs analytiques.

Le code nous a permis de minimiser notre ton de calcul, tout en diminuant le taux d'erreurs.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons utilisé les données de production fournies par La JV gas du projet In-salah gaz pour analyser et optimiser notre réseau. Notre dépôt d'archives de données comprend sept principaux champs en fichiers Excel, qui contiennent les débits de production de gaz annuels ainsi que des estimations de ces débits. De plus, nous disposons d'une fiche technique détaillant les caractéristiques techniques de notre réseau, tels que les diamètres des pipelines et les distances entre les sommets.

En utilisant l'algorithme de Bellman Ford, nous avons pu trouver le chemin optimal permettant d'effectuer les procédés dans les meilleurs délais. Cela nous a permis d'optimiser nos opérations et de minimiser les temps de traitement.

Pour renforcer notre approche d'optimisation, nous avons également réalisé une étude répartie sur différents scénarios, en nous basant sur l'analyse des fluctuations des débits de production. Cette analyse nous a permis de prendre en compte les variations possibles des débits et d'adapter notre planification en conséquence.

En somme, notre travail consistait à utiliser les données de production, appliquer l'algorithme de Bellman Ford pour trouver le chemin optimal, et renforcer notre approche d'optimisation grâce à une étude des scénarios basée sur l'analyse des fluctuations des débits de production. Ces efforts combinés nous ont permis d'améliorer les délais d'exécution des procédés et d'optimiser les performances de notre réseau.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'analyse de la production de gaz pour le projet In Salah Gaz de 2004 à 2027 a permis de mettre en évidence des tendances et des fluctuations significatives. Cette étude offre un aperçu des observations et des interprétations qui ont émergé de cette analyse. Les résultats mettent en évidence des périodes de stabilité, de baisse et de légère reprise de la production de gaz, ainsi que des variations au niveau des champs spécifiques. L'identification de ces tendances et des facteurs qui y sont associés est essentielle pour comprendre la situation actuelle du projet In Salah Gaz et formuler des recommandations adaptées.

Il est intéressant de noter les tendances et les fluctuations significatives dans la production de gaz pour le projet In Salah Gaz de 2004 à 2027. Voici une synthèse des observations et interprétations :

- **Tendance globale :** La production de gaz a connu des fluctuations d'une année à l'autre, avec des périodes de stabilité, de baisse et de légère reprise.
- **Stabilité et baisse de production :** Entre 2006 et 2010, la production de gaz était relativement stable, puis a connu une baisse notable à partir de 2014, atteignant un creux en 2015. Cela peut être attribué à des facteurs techniques, opérationnels ou économiques.
- **Reprise de production :** Après la baisse de 2014-2015, il y a eu une légère reprise de la production de gaz à partir de 2016, avec une augmentation progressive jusqu'en 2018. Cela peut être le résultat d'optimisations opérationnelles ou d'une demande accrue.
- **Nouvelle baisse de production :** À partir de 2020, la production de gaz a diminué à nouveau, atteignant un creux en 2020. Les raisons de cette baisse pourraient être liées à des problèmes opérationnels ou à des facteurs externes.
- **Prévision de production future :** Les projections pour les années 2023 à 2027 indiquent une légère augmentation de la production de gaz. Cependant, ces chiffres sont sujets à des variations en fonction de facteurs économiques, environnementaux et politiques.

En ce qui concerne les champs spécifiques :

- **Période 2004-2016 :** Le champ le plus producteur était le champ TEG, avec une augmentation significative de la production de gaz jusqu'en 2012, atteignant un pic de 4,29 Bm³. Cette croissance peut être attribuée à l'exploitation des réserves et à des investissements dans de nouveaux puits.

- **Période 2016-2027** : Le champ le plus producteur est devenu le champ GMD à partir de 2018, atteignant un maximum de 2,10 Bm³ en 2018. Cette augmentation peut indiquer un développement plus récent du champ ou une exploration plus poussée des réserves de gaz.

Il est important de noter que certains champs ont montré des tendances variables, avec une baisse générale de la production dans les champs KB total, TEG total et HMN total. Les prévisions futures indiquent une diminution continue de la production pour certains champs, tandis que d'autres connaîtront une légère augmentation suivie d'une diminution.

Il est également pertinent de considérer plusieurs facteurs pour interpréter ces données, notamment les réserves de gaz disponibles, les facteurs techniques tels que les problèmes opérationnels, ainsi que l'évolution du marché mondial du gaz.

En résumé, une analyse plus approfondie, incluant des données actualisées et une évaluation des facteurs externes, serait nécessaire pour obtenir une compréhension complète de la situation du projet In Salah Gaz et formuler des recommandations précises.

Ainsi, des recommandations plus détaillées en fonction des tendances observées dans la production de gaz pour le projet In Salah Gaz :

1. Analyse des champs en déclin

- Effectuer des études géologiques approfondies pour évaluer l'état des réserves de gaz dans les champs en déclin (KB, REG, GMD, IS) et déterminer si d'autres zones de production peuvent être explorées ;
- Identifier les problèmes techniques spécifiques qui contribuent à la baisse de production de chaque champ et mettre en place des mesures correctives ciblées. Cela peut inclure l'amélioration des processus de forage, de production et de maintenance des équipements ;
- Évaluer l'impact des facteurs économiques et environnementaux sur la production de chaque champ en déclin. Identifier les opportunités de réduction des coûts et d'amélioration de l'efficacité énergétique pour optimiser les opérations.

2. Optimisation des champs stables

- Analyser les meilleures pratiques de gestion mises en œuvre dans les champs stables (TEG, GBF, HMN) et les appliquer aux autres champs, le cas échéant ;
- Identifier les opportunités d'amélioration des processus et de l'efficacité opérationnelle dans les champs stables. Cela peut inclure l'adoption de technologies de pointe pour

l'extraction et le traitement du gaz, ainsi que l'optimisation des méthodes de surveillance et de contrôle.

3. Exploration de nouvelles opportunités

- Effectuer une évaluation approfondie des réserves restantes dans les champs existants et explorer les possibilités d'extension des zones de production. Cela peut impliquer des études sismiques et des analyses géologiques avancées pour identifier de nouvelles poches de gaz exploitables ;
- Évaluer les possibilités d'exploration de nouveaux champs ou de partenariats avec d'autres projets gaziers dans la région. Cela permettrait de diversifier les sources de production et de compenser la baisse de production des champs en déclin.

4. Surveillance continue

- Mettre en place un système de surveillance régulier de la production de chaque champ, en utilisant des technologies de télémétrie et des capteurs avancés. Cela permettra de détecter rapidement les fluctuations de la production et de prendre des mesures proactives pour les corriger ;
- Effectuer des évaluations de performance régulières pour suivre les progrès et identifier les domaines nécessitant des ajustements ou des améliorations supplémentaires ;
- Établir une collaboration étroite avec des experts du secteur et des institutions de recherche pour rester à la pointe des développements technologiques et des meilleures pratiques de l'industrie.

Bibliographie

1. Livre

- A.Lew & H. Mauch; « Dynamic Programming a Computational Tool »; Springer; 2006
- Amy Higginbotham & Adam Pellillo & Tami Gurley-Calvez & Tom- S. Witt; «The Economic Impact of The Natural Gas Industry and the Marcellus Shale Development in West Virginia »; Bureau of Business and Economic Research; 2010
- D. Babusiaux & P-R Bauquis & A. Chétrit & J-P. Favennec & R. Festor & M. Grossin & V. Lopez ; « Recherche et Production » ; Edition Technip ; 2002
- Dimitri P. Bertsekas; « Dynamic Programming and Optimal Control »; Athena Scientific; 2005
- Dr Doug Elliot & J.C Kuo & Dr.Perviaz Nasir; « Plant Processing of Natural Gas»; The University of Texas at Austin Petroleum Extension Service; 2020
- H. Paul Williams; « Model Building in Mathematical Programming »; Wiley; 2013
- Joseph J. Moder & Cecil R. Phillips; « Project management with CPM and PERT »; Van Nostrand Reinhold; 1970
- Laurent Smoch ; « Recherche Opérationnelle » ; Université du littoral-côte d'opale ; 2013
- Mark Needham & Amy E. Hodler; «Graph Algorithms »; O'Reilley; 2019
- Richard Bellman; « Dynamic Programming »; Princeton University Press; 1957
- Robert Faure & J-P. Boss & André Le Garff ; « La Recherche Opérationnelle » ; Presse Universitaires de France ; 1980
- Rojey Alexander ; « LE GAZ NATUREL DE LA PRODUCTION AUX MARCHES » ; Edition Technip, paris ; 2013
- Sellami Mohamed Hassen ; « Procédés de traitement de gaz » ; 2015
- Shimon Even; « Graph Algorithms »; Computer Science Press; 1979
- Steven J.Miller ; « An Introduction to Linear Programming »; Brown University; 2007
- Wayne L.; « Operations Research Applications of Algorithms »; Duxbury Press; 2003

2. Memoirs

- BAALI. S ; « Modélisation et Optimisation du plan de Production de la Raffinerie de Skikda » ; Mémoire de Master ; Université de Boumerdes ; 2013
- CHIKHI. S ; « Estimation de la Demande Gazière au niveau à l’horizon 2030 » ; Mémoire de Master ; Université Boumerdes ; 2017
- MANENO. A & MINRAGE.J ; « Simulation du procédé de production de gaz de synthèses par vaporeformage du méthane » ; Mémoire de Master ; Université de Mostaganem ; 2019
- TAIBI. A ; ; « Prévission de la production des puits dans le réservoir de schiste par l’apprentissage automatique et l’analyse des courbes de déclin ; Mémoire de Master ; Université de Boumerdes ; 2021
- YASNI, H & BOUDJADJA, Y ; « Optimisation de la Production journalière d’un Champ Pétrolier de la région de HASSI-Messaoud : Minimisation du coût de production » ; Mémoire de Master ; Université de Boumerdes ; 2012

3. Articles

- BRADLEY. M; « Forecasting Oilfield Economic Performance »; Society of Petroleum Engineers; 2005
- KAISER. J; « Hydrocarbons Production Cost functions in the Gulf of Mexico »; Center of Energy Studies; 2005
- LUO. D & XU. Z; « Modeling the operating costs for petroleum exploration and development projects »; The school of business administration University of Petroleum-Beijing; 2012
- RICARDO. E; « Forecast Techniques for Lifting Cost in Gas and Oil Onshore Fields »; Society of Petroleum Engineers; 2001
- ZHANG. B & Yong. Q; « Fuzzy Forecast and its application in the control of production cost »; China Academic Journal Electronic Publishing House; 2008

4. Rapports

- In-Salah Gas; « Depletion plan »; ISG development; 2015
- In-Salah Gas; « Depletion plan »; ISG development; 2018
- In-Salah Gas; « ISG induction sheet »; ISG development; 2003
- OULD KADDOUR. A; « Rapport Annuel »; SONATRACH; 2007

5. Sites

- In-Salah Gaz ; « BP Projects in Algeria » ; Consulté le 20/03/2023 sur ce site www.BP.com
- SONATRACH ; « Présentation de la SONATRACH » ; Consulté le 20/03/2023 sur ce site www.SONATRACH.dz

Résumé

L'optimisation des réseaux de production, de traitement et de transport dans l'industrie du gaz est cruciale pour garantir un approvisionnement en gaz efficace, une distribution fiable et l'optimisation des coûts. Cette étude explore l'application de l'algorithme de Bellman-Ford pour la programmation des opérations gazières, en tenant compte de la fluctuation des volumes de production et de la nécessité d'une prise de décision intelligente.

La nature complexe des réseaux gaziers, composés de multiples champs gaziers, d'installations de traitement, de points de livraison, nécessite des approches avancées pour assurer une gestion optimale. L'algorithme de Bellman-Ford, largement utilisé dans l'analyse des réseaux, permet de déterminer les itinéraires optimaux de transport du gaz en tenant compte des contraintes techniques, des délais de livraison et des coûts associés. Cette technique également contribue à la détection des anomalies, à la prévision des défaillances potentielles et à la proposition de stratégies d'optimisation pour maximiser l'efficacité du réseau gazier.

Cette recherche vise à explorer l'utilisation de l'algorithme de Bellman-Ford pour la programmation des opérations gazières. En analysant les données des réseaux de production, de traitement et de transport, cette étude fournit des recommandations pour une gestion optimisée. Les résultats de cette recherche contribuent à une meilleure compréhension de la manière dont les techniques d'optimisation peuvent être appliquées avec succès pour améliorer la gestion de réseaux gaziers complexes.

Mots-clés : industrie gazière, planification de la production, algorithme de Bellman-Ford, optimisation, fluctuation des volumes de production.

Abstract

Optimizing production, processing and transportation networks in the gas industry is crucial to ensuring efficient gas supply, reliable distribution and cost optimization. This study explores the application of the Bellman-Ford algorithm for scheduling gas operations, taking into account fluctuating production volumes and the need for intelligent decision-making.

The complex nature of gas networks, made up of multiple gas fields, processing facilities and delivery points, requires advanced approaches to ensure optimal management. The Bellman-Ford algorithm, widely used in network analysis, can be used to determine optimal gas transport routes, taking into account technical constraints, delivery times and associated costs. This technique also helps to detect anomalies, predict potential failures and propose optimization strategies to maximize gas network efficiency.

The aim of this research is to explore the use of the Bellman-Ford algorithm for scheduling gas operations. By analyzing data from production, processing and transmission networks, this study provides recommendations for optimized management. The results of this research contribute to a better understanding of how optimization techniques can be successfully applied to improve the management of complex gas networks.

Keywords: gas industry, production planning, Bellman-Ford algorithm, optimization, fluctuating production volumes.

ص خلم

قوئوم عزیزوتو ءءافكب زاعلا ریفوتن ءامضء ءیمهلاً غلاب ازمأ زاعلا ءعانصی فل قنلاو ءجلاءملاو جاتنلإءا ءاكبشءن یسختء دعتء ءابلقءء ءاعارم عم؁ ءیزاعلا ءایلمعلاء ءجمربلاء دروفنءاملیبء ءیمزراوخ قبیطءء ءساردلاء هءه فشكءسءء فیلاكءلاء نیسحتو عبء . ءیکذء ءارارقءا خءاءء ءرورضو جاتنلإءا موجد

مدقءم جءهء مءءخءسا؁ مبلسءء طاقنو ءجلاءم قءارمو ءءدعءم زاعل وقءنم ءنوكملاء؁ ءدقءملاء زاعلاء ءاكبشء ءعبیطء بءلطبءل قنلاء ءاراسملاء ءیءءبء؁ ءاكبشلاء لیلءءی فءعساو قءاظنءی لءء مءءخءسءی ءلاء؁ دروفنءاملیبء ءیمزراوخ جءمسءء بیءم ءرءاءن ءامضء فاشءكاءی فءأصبأ ءبءقءلاء هءه مءاسءء . ءطبءرملء فیلاكءلاءو مبلسءلاء ءبءمزلء لواءجلاءو ءبءقءلاء ءوبقلاء ءاعارم عم زاعلاء لءملاءا زاعلاء ءكبشء ءءافك مبلعءنل نیسءءلاء ءابجباءرءسا جءارءقواء؁ ءلمءءملاء لءاطءلأابء ءبءنءلاءو؁ ءاطءلأا

ءانابیل لبلءءل لءءنم . ءیزاعلاء ءایلمعلاء ءجمربلاء دروفنءاملیبء ءیمزراوخ مءءخءسا فاشءكءسا بیءل ءساردلاء هءه فءهءء ءبءفكلاء لصفأ مءهءی فءساردلاء هءه جءاءء مءاسءء بیءم ءرءاءل ءابصوءء ءساردلاء مءهء مدقءء؁ ل قنلاو ءجلاءملاو جاتنلإءا ءاكبشءء . ءدقءملاء زاعلاء ءاكبشءء ءرءاءن نیسءءلء جءانبء ءلءملاءا ءابءقءء قبیطءء

جاءنلإءا موجد ءابلقءء؁ نیسءءء؁ دروفنءاملیبء ءیمزراوخ؁ جاتنلإءا طیبءءء؁ زاعلاء ءعانصء : ءبءءاءملاء ءاملكلاء