

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MAGISTERE

Spécialité : **ENERGETIQUE**

Etudié par :

Me : OUMECHOUK HICHAM TAHAR

THEME

***Modélisation et performances d'un
gazoduc algérien évaluées avec
l'équation de SOAVE-REDLICH-
KWONG***

Soutenu devant le jury :

Président : Pr. S. RECHAK

Professeur E.N.P

Rapporteur : Pr. M. A.AIT ALI

Professeur E.N.P

Examineurs : Pr. A. SMAILI

Professeur E.N.P

Examineurs : Pr. A.Z.TOUDERT

Professeur E.N.P

ENP 2012

ملخص: وسيلة النقل الأكثر شيوعا لنقل الغاز الطبيعي هو عبر خطوط الأنابيب. هدفنا في هذه الرسالة هو اقتراح نموذج تحليلي لحساب الضغط و تدفق أحادي البعد مع التعميم الاحتكاك وانتقال الحرارة. معادلة الحالة استخدام سواف – ريدلش – وونغ حلها عن طريق خوارزمية نيوتن رافسون لحجم معين، ويتم الحصول على نتائج لخطوط أنابيب الغاز 40 , 42 و 44" أنواع الأقطار التي تستخدمها خطوط أنابيب الجزائرية.

الكلمات الرئيسية: الغاز الطبيعي، النقل وخطوط الأنابيب المعادلة سواف- ريدلش – وونغ

Résumé : Le mode de transport le plus répandu pour transport le gaz naturel est par gazoduc. Notre objectif dans ce mémoire est de proposer une modélisation analytique de la compression et d'un écoulement unidimensionnel généralisé avec frottement et transfert thermique. L'équation d'état utilisée est celle de SOAVE-REDLICH-KWONG, résolue par un algorithme de Newton-Raphson pour le volume spécifique ; les résultats sont obtenus pour des gazoducs de 40, 42 et 44" ouvrages types utilisés pour les gazoducs algériens.

Mot clé : Gaz naturel, Transport, Gazoducs, équation de Soave-RK

Summary: The most used mean of transport of natural gas is by pipeline. Our objective in this work is to propose an analytical model for compression and generalized one-dimensional flow with friction and heat loss. The equation of state used is that of SOAVE-REDLICH-KWONG solved with a Newton-Raphson algorithm for the specific volume. The results obtained for 40, 42, 44" pipelines are typical of Algerian natural gas pipelines.

Keyword: Natural Gas, Transportation, Pipelines, Soave-RK equation.

Dédicace

*Je souhaite dédier ce modeste travail, synonyme de
concrétisation de tous mes efforts fournis ces trois
dernières années :*

*A mes très chers parents, ma raison de vivre, symbole de courage
et de sacrifice, que Dieu les garde.*

A mes frères.

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins et mes cousines.

A Belkacem et Lakhdar qui on commence cette aventure avec moi

A mes promos de PG Energétique 2010

A toutes les familles Oumechouk et Terbeh

A tous mes Amis de la promotion propulsion 2009.

A tous mes amis de Laghouat et Alger

OUMECHOUK HICHAM TAHAR

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude ainsi que le plus grand respect à tous ceux qui m'ont aidé et soutenus dans ce travail.

Je tiens à remercier le bon DIEU, le tout puissant de m'avoir attribué la faveur de réussir mes études.

Je tiens aussi exprime mes vifs remerciements à mon promoteur Pr. Mohand A.AIT ALI pour m'avoir guide à la réussir de ce travail.

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants de l'option du magistère énergétique.

OUMECHOUK HICHAM TAHAR

Sommaire

Nomenclatureur

Liste des figures

Introduction	1
I-Evaluation du potentiel et de l'exploitation de Gaz Naturel Algérien	5
I.1. Introduction	5
I.2.Traitement du gaz naturel	6
I.2.2. Unité de boosting	6
I.2.3. Description du module "I	7
I.2.3.1.Description de processus	8
I.2.3.1. a. Zone de récupération du condensât	9
I.2.3.1.b.Zone de récupération du GPL et de stabilisation du condensât	10
I.2.3.2. Unité de glycol (régénération et injection)	12
I.2.3.2.a. L'injection du glycol	13
I.2.3.2.b.La régénération du glycol	13
I.3. Transport par méthanier	14
II. Transport par gazoduc	16
II.1. Gazoduc Algérienne	18
II.2.Gazoduc Pedro Duran Farrell	19
II.3.Gazoduc Enrico Mattei	20
II.4. Medgaz	22
II.5.Galsi gazoduc	23
II.6.Transsaharienne gazoduc	23
III. Modélisation analytique du transport par gazoduc	25
III.1. Problématique	25
III.2. Modélisation du transport du gaz naturel par gazoduc	26

III.2.1 Compression	26
III.2.2 .1.Equation d'état	27
III.2.1.2 Procédure de calcul relative à la compression	28
III-3 Equation de définition de calcul relative à l'écoulement dans le gazoduc	28
III-3.1 Algorithme de calcul	31
III-3.2 profil de température	32
III-3.2 profil de vitesse	32
IV-Résultat et discussion	34
IV.1 : Introduction aux études de cas	34
IV.2 : Diamètre 40 pouces	34
IV.3 : Diamètre 42 pouces	38
IV.4 : Diamètre 44 pouces	42
IV.5 : Application aux gazoducs algériens	45
IV.5.1 : Gazoducs GZ3, diamètre 42 pouce	45
IV.5.2 : Gazoducs GK1, diamètre 40 pouce	49
V. Conclusion	53
Annexe	
Bibliographie	

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-
REDLICH-KWONG

Nomenclature

P	pression [Pa]
P_f	pression de sortie pipe [Pa]
P_2	pression d'entre pipe [Pa]
P_c	pression critique [Pa]
V	vitesse [m/s]
ρ	Densité [kg/m ³]
v	volume [m ³]
T	Température [K]
T_f	Température de sortie pipe [K]
T_2	Température d'entre pipe [K]
T_c	Température critique [K]
T_r	Température réduit
\dot{m}	Débite massique [kg/s]
a(T), b	facteur de l'équation de Soave
R	Constante des gaz [Pa m ³ /kg k]
h	enthalpie massique [J/kg]
h_2	enthalpie massique de sortie compresseur réel [J/kg]
h_{2s}	enthalpie massique de sortie compresseur isentropique [J/kg]
h_1	enthalpie massique entre compresseur [J/kg]
u	énergie interne [J/kg]
u_2	énergie interne de sortie compresseur réel [J/kg]
u_{2s}	énergie interne de sortie compresseur isentropique [J/kg]
u_1	énergie interne entre compresseur [J/kg]
s_2	entropie de sortie compresseur réel [J/kg]
s_{2s}	entropie de sortie compresseur isentropique [J/kg]
s_1	entropie entre compresseur [J/kg]
\dot{P}	Puissance [W]
Cv	chaleur spécifique a volume constant [J/kg K]

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-
REDLICH-KWONG

C_p chaleur spécifique à pression constant [J/kg K]

η Rendement adiabatique

f facteur de frottement

D diamètre du gazoduc [m]

ε Rugosité de forme

A surface latérale de la conduite (m^2)

Re nombre de Reynolds

Liste des figures

Fig.1 : évolution du prix du GNL de 1997 -2007

Fig.2 : Evolution de l'exportation du GNL algérien vers USA

Fig.3 : Contexte géologique de l'extraction du gaz dans schistes

Fig.4 : Exportations Algériennes en 2007 en milliards de mètre cube

Fig.5 : champs de Hassi R'Mel

Fig.6 : Unité de boosting

Fig.7 : Schéma de l'unité de traitement

Fig.8 : Unité de glycol

Fig.9 : construction d'un gazoduc

Fig.10 : Gazoducs algériennes

Fig.11 : Maghreb-Europe Gas Pipeline

Fig.12 : Gazoducs Enrico Mattei

Fig.13 : Représentation 3D du Medgaz

Fig.14 : Galsi

Fig.15 : Transsaharienne

Fig.16 : diagramme T-s montrant le calcul de la différence d'enthalpie h_2-h_1

Fig.17 : Domain d'étude

Fig.18 : Puissance compresseur 40" profile 1

Fig.19 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 40'' profile 1

Fig.20 : Puissance compresseur 40" profile 2

Fig.21 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 40'' profile 2

Fig.22: Puissance compresseur 40" profile 3

Fig.23 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 40'' profile 3

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-
REDLICH-KWONG

Fig.24: Puissance compresseur 42" profile 1

Fig.25 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 42'' profile 1

Fig.26: Puissance compresseur 42" profile 2

Fig.27 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 42'' profile 2

Fig.28: Puissance compresseur 42" profile 3

Fig.29 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 42'' profile 3

Fig.30: Puissance compresseur 44" profile 1

Fig.31 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 44'' profile 1

Fig.32: Puissance compresseur 44" profile 2

Fig.33 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 44'' profile 2

Fig.34: Puissance compresseur 44" profile 3

Fig.35 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe 44'' profile 3

Fig.36 : Puissance compresseur GZ3 profile 1

Fig.37 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GZ3 profile 1

Fig.38: Puissance compresseur GZ3 profile 2

Fig.39 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GZ3 profile 2

Fig.40 : Puissance compresseur GZ3 profile 3

Fig.41 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GZ3 profile 3

Fig.42 : Puissance compresseur GK1 profile 1

Fig.43 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GK1 profile 1

Fig.44 : Puissance compresseur GK1 profile 2

Fig.45 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GK1 profile 2

Fig.44 : Puissance compresseur GK1 profile 3

Fig.47 : pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entrée pipe GK1 profile 3

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie indépendante a toujours manifesté un grand intérêt pour le développement de son potentiel de gaz naturel. Elle est devenue l'un des plus grands exportateurs de gaz naturel au monde. En sa production atteint 85 milliard de de mètre cube [1].

Mais durant la dernière décennie l'apparition des gaz de schiste en Amérique du nord a provoqué une offre important qui vient affecter à la baisse le cours mondial du gaz naturel, Ainsi la demande des USA en GNL est pratiquement nulle pour de nouveaux contractés [1]

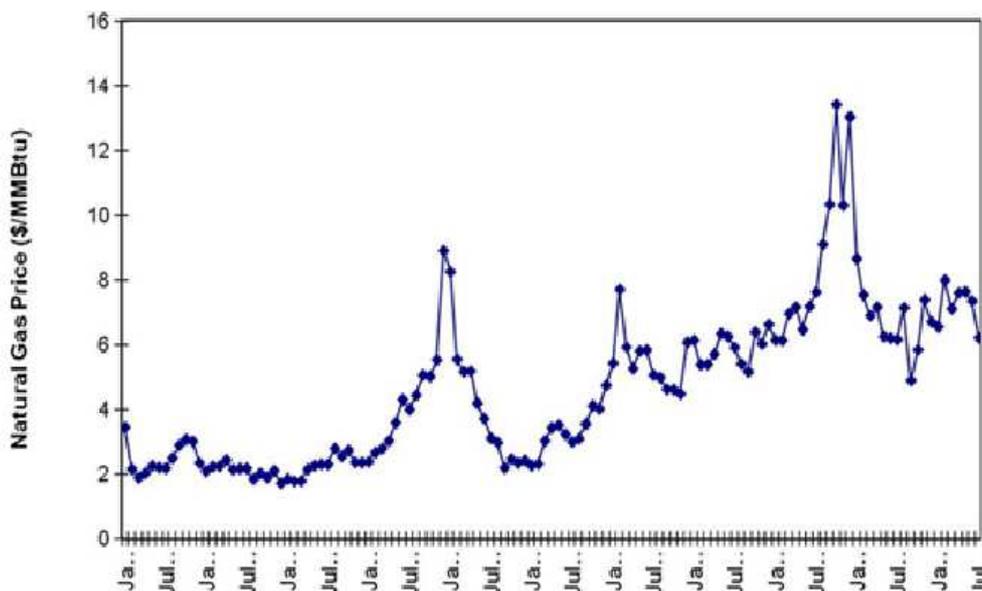


Fig.1 : évolution du prix du GNL de 1997 -2007[1]

Cependant, en ce qui concerne l'Algérie les contacts de vente à long terme qu'elle entretient avec l'UE essentiellement en gaz naturel sont en compétition avec les fournitures de la Russie. Ses ventes en GNL sont destinées en grand partie aux marchés japonais et sud-coréen en désavantage par rapport au Qatar, l'Indonésie et l'Australie [1]

Les exportations Algériens de GNL sont aussi désavantagées par un coût de production relativement élevé du a l'âge des usines construites avec les techniques des années 1970, à l'exception des nouvelles usines d'Arzew et Skikda.

Ainsi les contraintes nouvelles imposée par la nouvelle donne à l'industrie du GNL Algérienne instamment à la recherche de économies d'autoconsommation du GN transporté et liquéfié d'une part, et de conclure des alliances marchés pour réduire les désavantages de l'éloignement des pays gros consommateur de GN qui sont le Japon et la Corée du sud, par

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

exemple de Sonatrach et Gazprom envisageraient des contrats SWAP par les quels Gazprom fournira du GNL à la Chine, la Corée du sud et le Japon pour le compte de Sonatrach ,et celle-ci fournira du GNL a l'UE pour le compte de Gazprom.

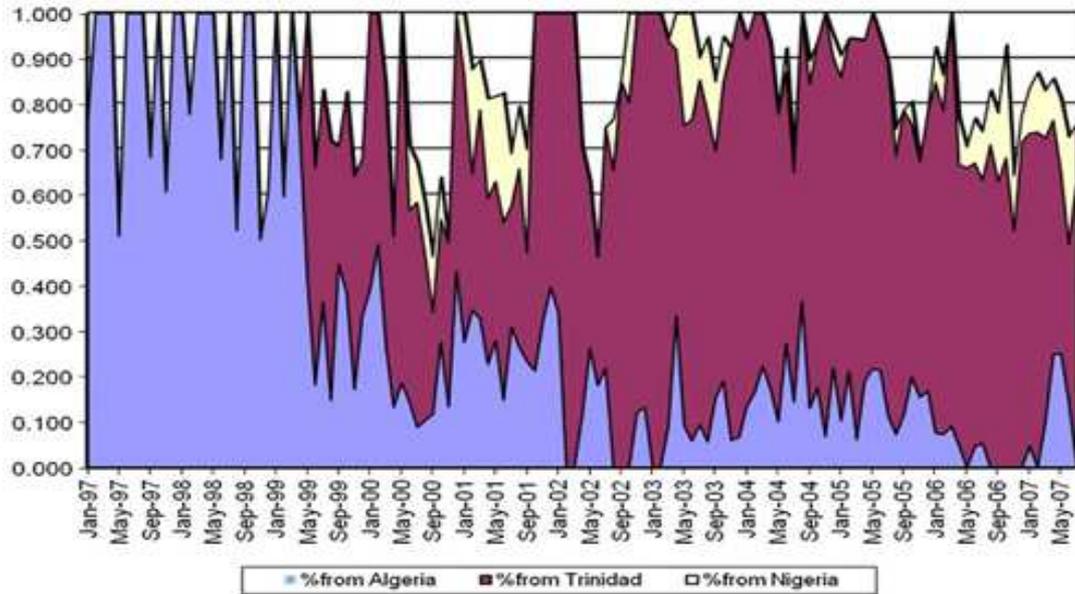


Fig.2 : Evolution de l'exportation du GNL algérien vers USA [1]

Le gaz naturel peut également être produit à partir d'un certain nombre d'autres sources non conventionnelles en site [2] :

- **Le gaz de schistes**

Le schiste est emprisonné dans une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté, et de se débiter en plaques fines ou « feuillet rocheux » On dit qu'elle présente une schistosité. Il peut s'agir d'une sédimentaire argileuse [2]. Le gaz de schiste est donc une forme de gaz naturel produite à partir des schistes. Il joue un rôle croissant dans l'approvisionnement en gaz naturel aux États-Unis depuis le début du XXI^e siècle. Un analyste s'attend à ce que les gaz de schiste constituent la moitié de la production nord-américaine de gaz naturel d'ici 2020, de même cette nouvelle solution est adopte aux Canada, en l'Europe on commence à envisage cette solution pour réduire les importations de gaz naturel russe et algérien

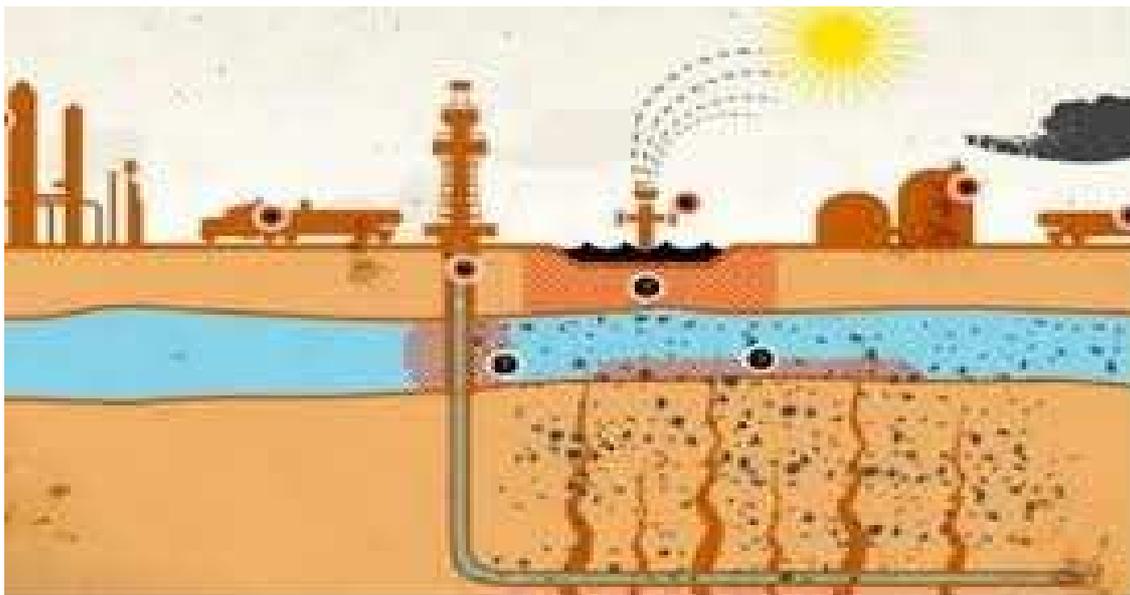


Fig.3 : Contexte géologique de l'extraction du gaz de schistes

- **Le gaz naturel synthétique**

Le charbon contient naturellement du méthane et du dioxyde de carbone dans ses pores. Historiquement, ce gaz a surtout été connu pour la menace mortelle qu'il présente sur la sécurité des mineurs - il est alors resté dans la mémoire collective sous le nom de grisou. Cependant, son exploitation est en plein développement, en particulier aux États-Unis. L'exploitation porte sur des strates de charbon riches en gaz et trop profondes pour être exploitées de façon conventionnelle. Il y a eu des essais en Europe également, mais la plupart des charbons européens sont assez pauvres en méthane. La Chine s'intéresse également de plus en plus à l'exploitation de ce type de gaz naturel [2].

Autoconsommation :

D'après le bilan énergétique du ministère des énergies et des mines pour l'année 2010 [3] l'Algérie produit 85 milliards de mètre cube de gaz naturel dont 45% de la production est destinée à l'exportation via les gazoducs 29% vers les usines de liquéfaction et le reste est pour la consommation nationale ; le transport via des gazoducs vers les usines de liquéfaction de gaz naturel Algériennes consomme relativement beaucoup 726 millions mètre cube pour le transport prêt de 0.85 % de la production nationale et de 3.64 milliards de mètre cube pour la liquéfaction soit 4.32%. Les gazoducs vers Arzew (Gz0, Gz1, Gz2, Gz3) ont une longueur de 510 km et ceux de Skikda (Gk1, Gk2) 573km environ ; ces gazoducs sont équipés de 5 stations de compression mise à part le Gz0 (Camel) qui est équipée de 4 stations ; en site les gazoducs Pedro Duran Farel reliant l'Algérie à l'Espagne et le Portugal via le Maroc a une distance de

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

1078 km et le Enrico Mattei reliant l'Algérie à l'Italie via la Tunisie a une longueur de 1300 km.

Problématique :

Les gazoducs sont des ouvrages conçues et optimiser pour transporter un débit annuel donnée sur une distance fixée le nombre de station de compression, le diamètre de la conduite et la compresseurs sont ainsi déterminer. L'autoconsommation des ouvrages existants ne peut être améliorée que par le rendement des moteurs d'entraînement.

L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation analytique de la compression et de l'écoulement généraliser et unidirectionnel d'un gazoduc pour plusieurs diamètre de conduites type utilisées dans les gazoducs algériens afin de situer leurs performances et leur potentiel d'amélioration éventuelles.

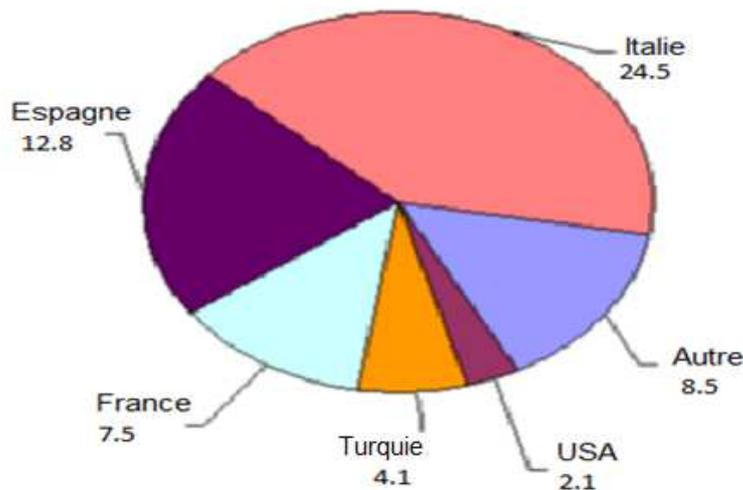


Fig.4 : Exportation Algérienne en 2007 en milliards de mètres cube [6]

Ce projet se développera sur les chapitres suivant:

- le premier chapitre fera une évaluation des capacités Algériennes de production de gaz naturel.
- le deuxième chapitre offre une description sommaire des gazoducs algériens.
- le troisième chapitre décrit la modélisation mathématique proposée.
- le quatrième chapitre traitera des résultats des calculs sur différents gazoducs
- le dernier chapitre fera la conclusion et discussion des résultats obtenus.

CHAPITRE I

Evaluation du potentiel de l'exploitation de gaz naturel algérienne

I.1.Introduction :

L'Algérie compte 4.5 milliards de mètres cubes de réserves prouvées de gaz naturel (les huitième plus grande réserve de gaz naturel dans le monde). Le champ de Hassi R'Mel fut découvert en 1956 et avec des réserves prouvées d'environ 2.4 milliard de mètres cube. Hassi R'Mel représente environ un quart de la production totale de gaz naturel sec. Le reste des réserves de l'Algérie de gaz naturel proviennent de gaz associés (ils se produisent aux côtés de réserves de pétrole brut) et non-associés des champs dans les régions sud et sud-est du pays [5], [6].

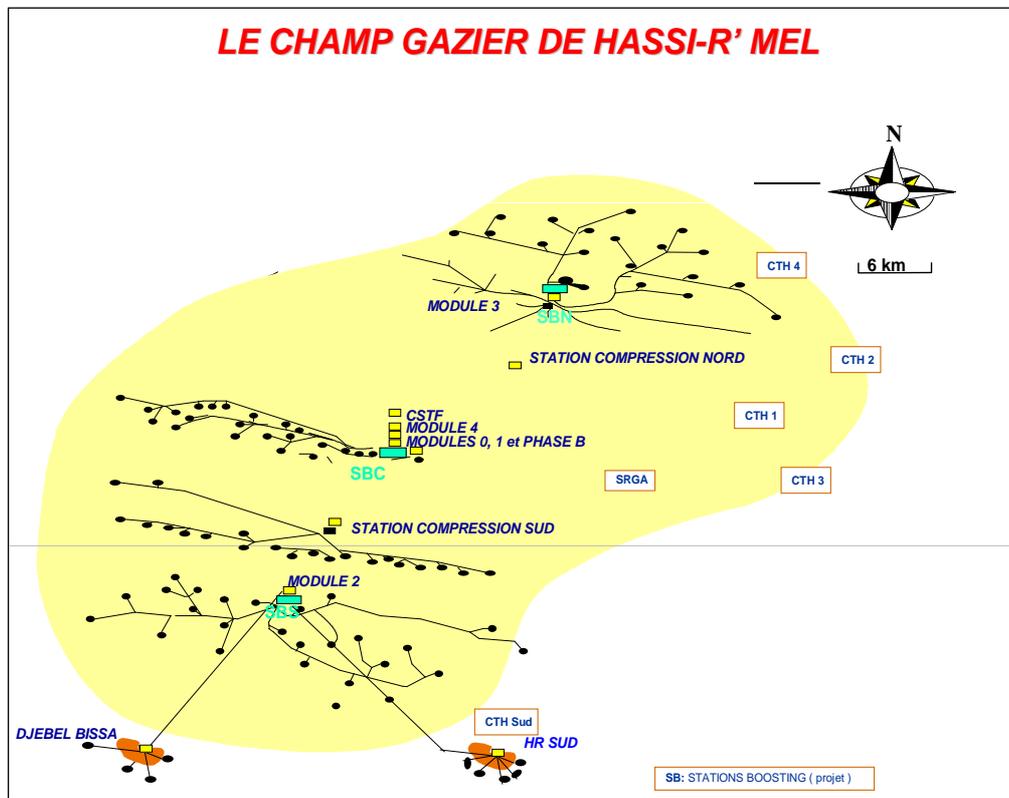


Fig.5 : champs de Hassi R'Mel [4]

L'Algérie a consommé 26 millions de mètres cubes de gaz naturel sec en 2007. Le pays a produit 68 milliard de mètres cubes de gaz naturel sec en 2007, il est le sixième producteur de gaz naturel dans le monde et le deuxième parmi les pays membres de l'OPEP après l'Iran. Le reste est exporté, en grande partie vers l'Europe et certains aux États-Unis. Le gouvernement algérien a encouragé l'utilisation domestique du gaz naturel, qui représentait 60 % de la consommation d'énergie du pays en 2007. Appartenant à l'Etat Sonatrach domine la

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

production de gaz naturel et la distribution en Algérie ; tout en appartenant à l'État Sonelgaz contrôle de la distribution la consommation finale. L'Algérie autorise de plus en plus l'investissement étranger dans le secteur, et les producteurs de gaz étrangers, y compris BHP-Billiton, BP, Eni, Repsol, Statoil et Total, ont conclu de nombreux accords de partenariat avec Sonatrach. Il est également prévu la participation étrangère dans le secteur de détail du gaz naturel.

Avant d'être expédié vers le nord du pays le gaz champ est assèche dans les usines de traitement est pour devenir transportable dans les gazoducs. Nous nous allons montrer les différent étape du traitement du gaz naturel a Hassi R'Mel.

I.2.Traitement du gaz a Hassi R'Mel

Après l'extraction du puits de gaz il doit être traite pour le transport par gazoduc Le champ de Hassi R'mel met en œuvre 2 types de procédés :

- Le "PROCEDE PRITCHARD", basé sur le refroidissement du gaz par échanges thermiques et par une détente iso-enthalpique au moyen de vanne "Joule-THOMPSON" après l'utilisation du propane comme fluide réfrigérant pour atteindre des températures de l'ordre de -15 °C pour le module 'O' et -18 °C pour le module '1' [4].
- Le "PROCEDE HUDSON" basé sur le fractionnement par différences de température et caractérisé par la détente au "TURBO-EXPANDER», qui permet d'atteindre une température relativement plus basé (-40 °C) ; et produit un travail de détente le procédé HUDSON est plus performant, car il permet une meilleure récupération des hydrocarbures liquides, ce procédé est utilisé dans les modules "II", " III ", " IV "[4]

.I.2.2.Unite de boosting: (Fig. 6)

Les unités de traitement de gaz sont conçues pour fonctionner à une pression d'entrée supérieure à 100 bars. Suite à la diminution de la pression du gisement, l'unité de boosting a été installée dans le but de maintenir la pression de gaz brut au-dessus de 100 bars.

La station de Boosting contient trois sections:

- Manifold.
- séparation d'entrée.
- Compresseurs de boosting.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

Le gaz brut qui vient des collecteurs (E1. W1. W2. W3. W4. W5) passe vers le manifold d'entrée, banalisé avec le manifold d'entrée du MODULE '0', arrive aux trois ballons de pré-séparation (D-901 A/B/C) à une température $T = 65\text{ °C}$. L'eau est séparée et envoyée vers le bournier, le condensât vers V 203 du Module '1' et les V 1012 du Module '0' et le gaz vers un ballon vertical de pré-séparation pour éliminer le maximum d'eau.

Ce gaz alimente le compresseur et sort à $P = 117\text{ kg/Cm}^2$ et $T = 90\text{ °C}$, passant par les aérons pour le refroidir à $T = 60\text{ °C}$ et alimente les Modules 'O' et Module "I".

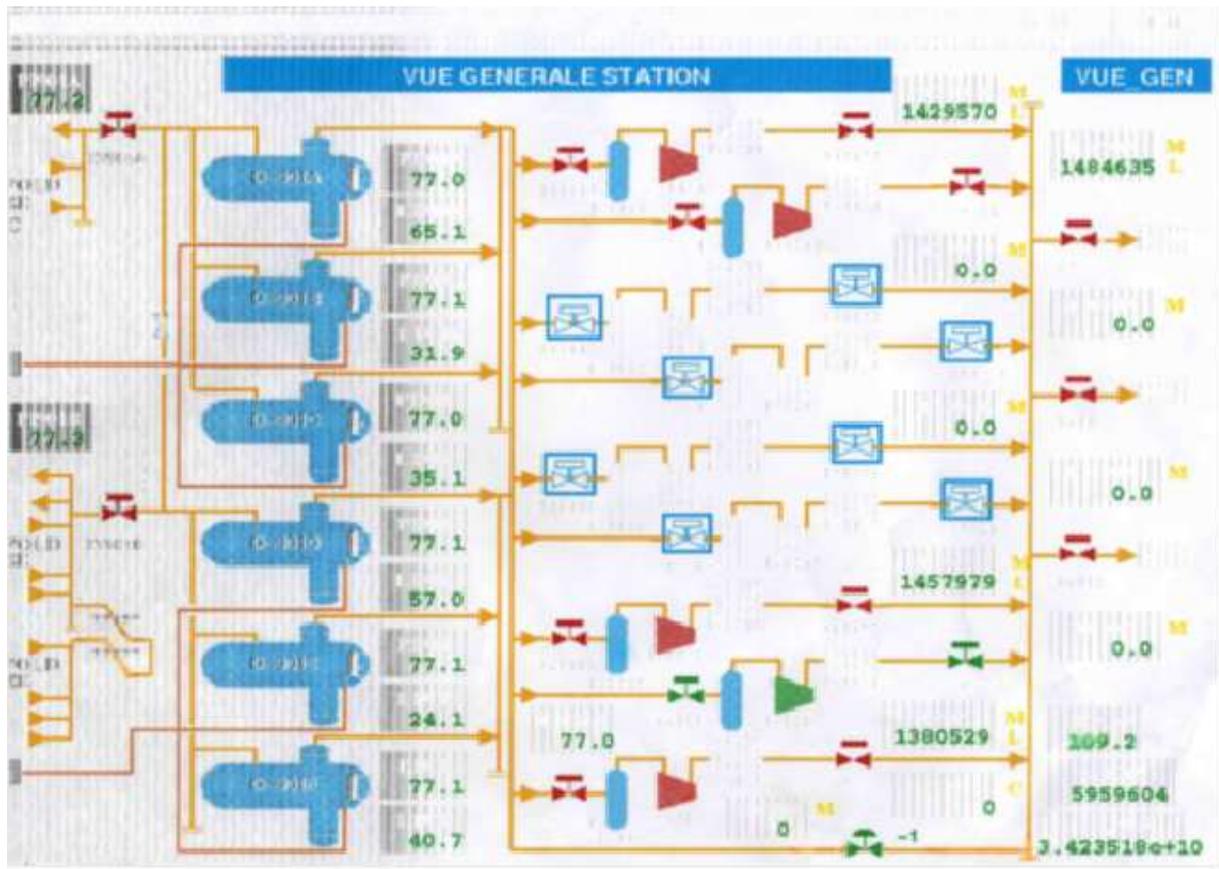


Fig.6 : Unité de boosting [4]

I.2.3. Description du module "I":

Le MPP1 (module processing plant 1) contient trois trains de traitement identiques, une unité de régénération de glycol hydraté, les utilités, les bacs de stockages, la salle de contrôle et un laboratoire d'analyses de routine.

Ce module a été réalisé par la compagnie américaine "STONE AND WEBSTER CORPORATION" en 1976. Le 1^{er} train a été mis en service en 1978, alimenté par les puits de la zone centre.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

Le module '1' contiens les services suivants:

- **Service d'exploitation:**

C'est le servie principal qui assure le bon fonctionnement de l'installation (24h/24h).

- **Service maintenance:**

Il comprend les sections Section électricité, Section instrumentation et Section mécanique.

- **Service de sécurité :**

Le personnel de ce service assure la sécurité du personnel et des équipements du module (il comprend la prévention et l'intervention).

I.2.3.1. Description de processus:

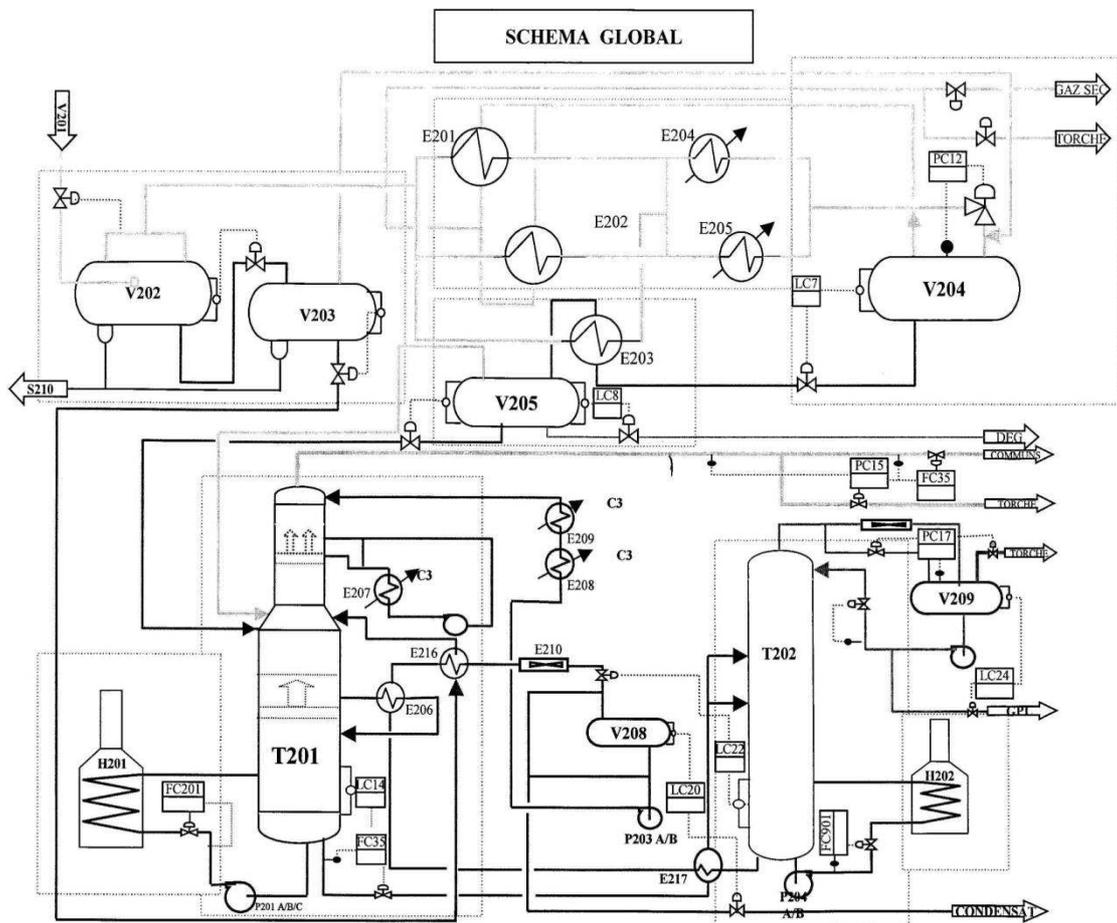


Fig.7 : Schéma de l'unité de traitement [4]

I.2.3.1.a. Zone de récupération du condensât:

Les gaz brut qui sort du boosting à une pression de 110 kg/Cm^2 et une température de 65°C , passe dans un tube de 36 " pour alimenter les trois trains de module vers le diffuseur d'arrivée **V-201** qui distribue le gaz aux trois trains en parallèle.

Le gaz passe à travers la vanne de pression **PV-7**, vers le séparateur d'entrée **V-202**, pour séparer le liquide d'alimentation et extraire l'eau libre qui sera évacuée vers le borbier via le puisard **S-210**, sous le contrôle de la vanne **LV-1**.

Le gaz brut provenant du séparateur **V-202** est déshydraté et refroidi simultanément dans l'échangeur de chaleur constitué de batteries d'échangeurs (**gaz/gaz**) **E-201**, **E-202 (A/B/D)** et (**gaz-liquide**) **E-203(A/B)** coté tube.

Le gaz sortant des échangeurs à une température de (0°C , -2°C), passe dans les chillers (**E-204** et **E-205**) utilisant du propane " C_3H_8 " comme fluide frigorigène ; ces derniers étaient employés lorsque la pression d'entrée était à 110,

La déshydratation du gaz d'alimentation est effectuée par l'injection directe de di-éthylène-glycol (DEG) à 78% dans la plaque tubulaire de chaque échangeur de manière uniforme afin d'éviter la formation des hydrates (givrage).

Les trois sorties de gaz sont rassemblées dans un collecteur de $T=-6^\circ\text{C}$, qui passe à travers la détente "JOULE-THOMPSON" où il subit une détente iso-enthalpique (chute de P \rightarrow chute de T à enthalpie constant) pour sortir avec les paramètres suivant: $P=78 \text{ kg/Cm}^2$, $T=-18^\circ\text{C}$ avec une séparation gaz/liquide.

La température finale du séparateur à froid **V-204** qui est contrôlée par la **TVC-34** est suffisamment basse afin que la teneur en eau du gaz de transfert soit inférieure à **50ppm**.

Le gaz sec récupéré du séparateur à froid **V-204** refroidit à contrecourant le gaz brut dans l'échangeur **E-201** et **E-202** pour récupérer les calories qu'il contient ; une fois réchauffé, il pénètre dans le pipe de gaz de vente à une pression de 76 bars et une température de 60°C .

Le liquide (mélange de condensât et de glycol hydraté) issu du séparateur à froid **V-204** est préchauffé dans l'échangeur (**gaz-liquide**), **E-203** coté calandre.

Le liquide est ensuite admis dans le séparateur **V-205**, à une température de 30°C et une pression de 26 kg/Cm^2 , où ce fait une séparation triphasique (gaz – condensât – glycol hydraté). Le condensât et le gaz sont envoyés au **18^{ème}** plateau du déethaniseur **T-201** sous le

contrôle de la vanne de débit **FV-32** et la vanne de pression **PV-13B** respectivement, alors que le glycol hydraté est envoyé vers l'unité de régénération du glycol.

Les hydrocarbures liquides provenant du **Boosting**, passant vers le ballon à **V-203** pour séparer l'eau une autre fois, le condensât sortant du **V-203** sont envoyés au **18^{ème}** plateau du déethaniseur **T-201** après leur chauffage dans l'échangeur **E-216** coté calandre.

I.2.3.1.b. Zone de récupération du GPL et de stabilisation du condensât :

Cette zone a pour objet de stabiliser le condensât et de produire du "**GPL**". Elle est composée de deux distillations successives des condensât dans deux type de colonne sont :

Le déethaniseur "T201":

Ayant pour objectif d'élimination du C_2^- (méthane-éthane), ces paramètres de fonctionnement sont les suivants:

- * Température de tête : $T = 18^\circ\text{C}$.
- * Température de fond : $T = 165^\circ\text{C}$.
- * Pression de service : $P = 22 \text{ kg/cm}^2$.

Principalement la colonne a pour rôle principale de fractionner les charges qui viennent de **V-205** ($P = 22 \text{ kg/cm}^2, T = 30^\circ\text{C}$) et de **V-203** (passent par un chilleur **E-216**, et entré à $P = 22 \text{ kg/cm}^2, T = 90^\circ\text{C}$) au niveau des **18^{ème}** plateaux , avec un débit contrôlé par la **FV32**, **FV12** successivement, est admise dans la zone de **flashi** pour la séparation en deux phases: liquide qui décent à la zone **d'Epuisement**, et gazeuse qui elle remonte à la zone de **rectification**.

* Les légers C_2^- (méthane - éthane) qui sortant de la tête de la colonne à $T = 18^\circ\text{C}$ vers les services des communs pour être comprimés.

Ont gardé la température de 18°C à la tête de colonne à l'aide d'un reflux de C_5^+ , qui aspirer en **V-208** par la pompe **P-203** A/B, et passer vers les chilleur à propane, **E-208** (haute pression) et **E-209** (basse pression), le débit d'entrer est régulé par la **FV-32**.

* Les lourds (soit les C_3^+) qui sortent du fond de la colonne, représentent l'unique alimentation du débutaniseur, après leur préchauffage dans la coté calandre de l'échangeur **E -217**.

Un reflux au niveau du **5^{ème}** plateau passe vers la chaleur latérale "**E-207**", pour garder une température basse à ce niveau.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

Une partie de condensât récupéré au fond de déethaniseur ayant une $T = 150^{\circ}\text{C}$ à 160°C est aspiré par les pompes **P-201A/B/C** vers le four **H-201** qui sort à $T = 168^{\circ}\text{C}$ pour assurer l'évaporation de tous les C_2^-

Le débutaniseur «**T202**»:

A pour objectif de fractionner a la charge du déethaniseur, afin d'obtenir des produits semi finis à savoir le condensât stabilisé et le gaz du pétrole liquéfié "GPL".

Le débutaniseur possède les paramètres suivants :

* Température de tête : $T = 60^{\circ}\text{C}$.

* Température de fonde : $T = 185^{\circ}\text{C}$.

* Pression de service : $P = 16 \text{ kg/cm}^2$

La seule charge du débutaniseur est le condensât non stabilisé sortant du fond du déethaniseur à une température de $T = 155^{\circ}\text{C}$ et une de pression de $P = 22 \text{ kg/Cm}^2$, il passe du coté calendre de **E-217**, et alimentes le débutaniseur **T-202**, au niveau de **24^{ème}** et **25^{ème}** plateaux, a une température de l'ordre de 160°C

Les gaz qui sortant de la tête de la colonne **T-202** à $T = 60^{\circ}\text{C}$ condensés par les aéro-réfrigérants **E-211**, pour atteindre la température de $T = 48^{\circ}\text{C}$ (phase liquide).afin d'aboutir dans le ballon **V-209**, d'où ils sont aspiré par l'une des trois pompes **P-205 A/B/C**.

Une grande partie du **GPL** est utilisée comme reflux pour le débutaniseur, et le reste comme production vers le stockage du "**CSTF**" (cas du GPL ON SPEC) ou vers le Module '4' (cas de OFF SPEC, hors spécifications).

Le condensât soutiré du fond de la colonne à $T = 180^{\circ}\text{C}$, est aspiré par l'un des pompes **P-204 A/B**, ver le rebouilleur **H-202**, puis refoulé à une pression de $P = 25 \text{ kg/cm}^2$ et une température de $T = 190^{\circ}\text{C}$,

Le condensât stabilisé qui sort du bas du débutaniseur **T-202**, est refroidi par son passage coté tube du : **E-217** pour préchauffer la charge du débutaniseur, puis dans le **E-206** pour le rebouilleur latéral du déethaniseur, et aussi dans **E-216** pour préchauffer la charge de la même colonne. Enfin il passe dans l'aéro-réfrigérant **E-210** pour maintenir une température de l'ordre de 50°C .

Le condensât stabilisé dans le V-208, d'où une partie est pompée par les pompes P-203 A/B et envoyé à la tête du déethaniseur, et le reste est envoyé vers les bacs de stockage de condensât S-204 A/B/C.

I.1.3.2. Unité de glycol (régénération et injection) :

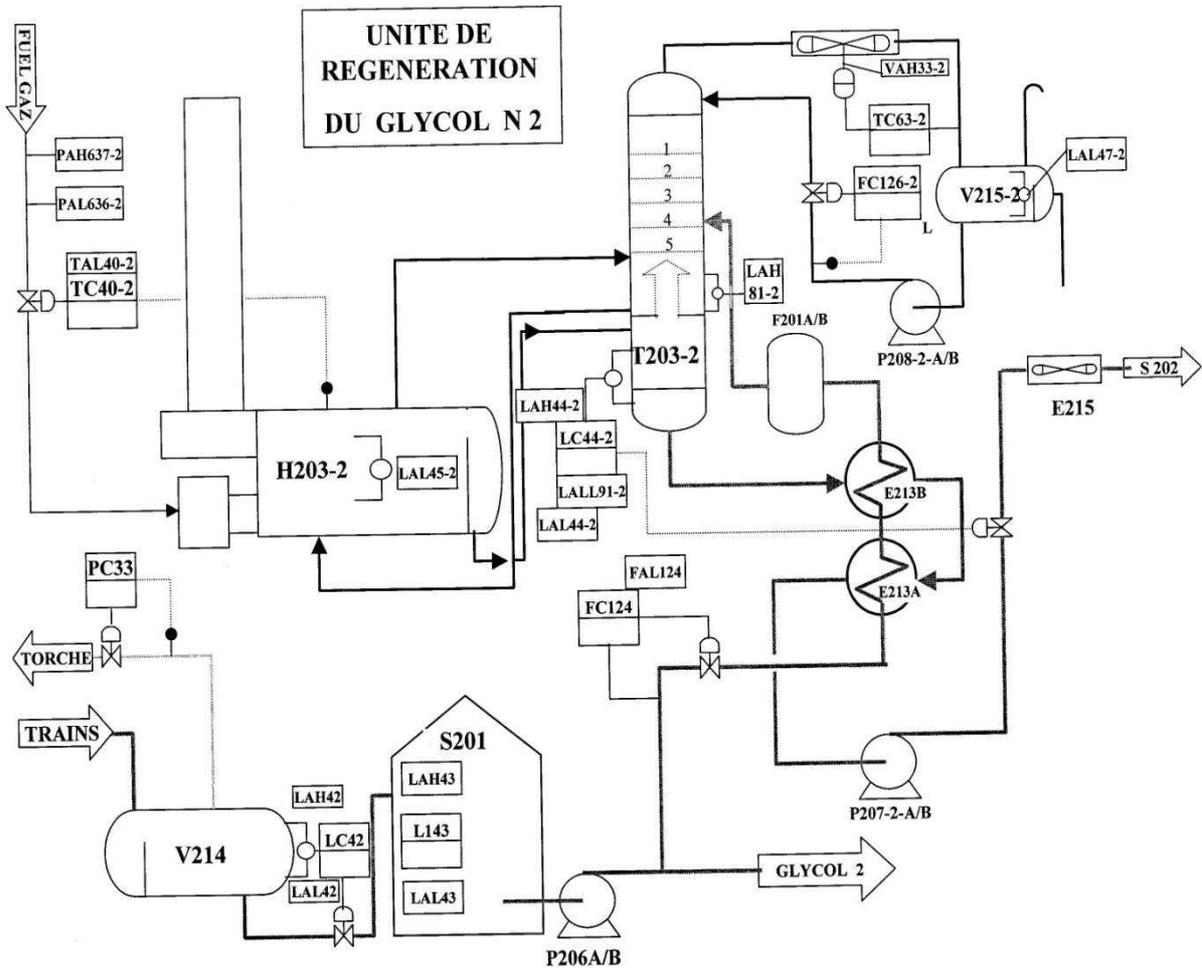


Fig.8 : Unité de glycol [4]

Les trois types de glycol qui sont utilisés à Hassi R'mel suivant les cas de traitement :

- MEG : mono-éthylène glycol $C_2H_6O_2$
- DEG : di-éthylène glycol $C_4H_{10}O_3$
- TEG : tri-éthylène glycol $C_6H_{14}O_4$

Pour le Module "1" on utilise le " DEG" aux caractéristiques montrées dans le tableau 1.

Tableau 01 : caractéristique du DEG [4]

Masse molaire (kg/mol)	106.122
Point de fusion (°C)	-10.45
Point d'ébullition (°C)	245
Tension de vapeur (Pa)	0.27
Masse volumique à 25°C (kg/m ³)	1115

I.1.3.2.a. L'injection du glycol:

Le gaz brut qui arrivé des puits contient une quantité importante d'eau qui pose le problème de givrage (formation des hydrates à une basse température) ce qui provoque le bouchage des tubes et qui déstabilise le bon fonctionnement de procédé.

Pour cela, on injecte le "DEG" à 78% de concentration, à l'entrée des barries d'échangeur (gaz/gaz) **E-201, E-202 (A/B/C/D)**, à l'aide de l'une des pompes à piston **P-210 A/B/C**, à une pression d'injection supérieure à la pression de service, environ de 120 kg/cm², et un débit de 10m³/h

I.2.3.2.b.La régénération du glycol:

Le Glycol hydraté est récupéré au niveau de **V-205** 1.2.3 pour le trois trains et envoyé vers le balane tampon de glycol hydraté **V-214** à une concentration de 67% ; puis il est stocké dans le bac de stockage de glycol hydraté **S-201**.qu'il aspiré après par la pompe **P-206 A/B** , puis il passe par la vanne automatique **FV-123** (pour la régulation du débit d'alimentation de l'unité) puis passé du côté tube de l'échangeur **E-213 A** et **B** pour être chauffé à T=77°C.

Le glycol chaud passe dans le filtre **F-201**, puis entre dans la colonne **T-203** au niveau du 4^{ème} plateau ou se produit la déshydratation du glycol.

Au niveau de plateau de récupération, de glycol récupéré à une température de l'ordre de 110°C, passe vers le rebouilleur **H-203**, pour être chauffé jusqu'à 120°C pour assurer l'évaporation de eau, puis il est réinjecté dans le bas de la colonne.

Les vapeurs de la tête (vapeur d'eau) passe par les aérons **E-214**, vers le ballon **V-215**.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

Mais le glycol est récupéré du fond de la colonne (glycol régénéré) ; il passe du côté calandre des échangeurs de chaleur **E-213** A/B, puis aspiré par la pompe **P-207** vers les aérons **E-215** afin d'avoir les paramètres de sortie $P=4 \text{ kg/cm}^2$ et $T=35^\circ\text{C}$, Ce dernier est stocké dans le bac **S-202**.

Les pertes de GLYCOL du procédé sont récupérées par l'injection de GLYCOL pur 88% de concentration dans le bac **S-202** puis on y'ajoute l'eau pour maintenir la concentration à 78%.

Le gaz naturel ainsi asséché de ces produits lourds (gazoline) et GPL est appelé gaz de transport, il est expédié vers les réseaux domestiques sonelgaz et vers les usines de liquéfaction qui produisent le GNL à l'exportation.

Le GNL est expédié outre-mer vers les terminaux de récupération et regazéification dans des bateaux spécialement conçus appelés méthaniers.

I-3-Transport maritime de gaz naturel

Ce mode de transport est utilisé depuis moins de quarante ans pour franchir l'obstacle que constituent les espaces marins. À partir du moment où le gaz naturel liquéfié GNL quitte les installations de liquéfaction, il est stocké et transporté par des navires s'appelés méthaniers.

Les méthaniers constituent un maillon indispensable à toute chaîne de GNL, comme ils transportent un liquide en ébullition à très basse température (-160°C), ils nécessitent une technologie sophistiquée et originale alliant les meilleures conditions de sécurité à la recherche d'un optimum économique.

La flotte de navire-citerne de GNL dans le monde comprend deux types de navires à proportions relativement égales. Les deux types comprennent une conception à coque double et sont considérés sécuritaires quant au risque d'incendie et à la prévention d'explosion (des vapeurs de gaz naturel accumulées et des cuves autoporteuses). Les deux types sont reconnus et classifiés par l'IACS [7].

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-
REDLICH-KWONG

Tableau 02 : Caractéristiques techniques de la flotte méthaniers algériens [7]

Caractéristique	Hassi R'Mel	Larbi Ben M'Hidi	Bachir Chihani	Mustapha Ben Boulaid	Abane Ramdane	Didouche Mourad	Lala Fatma N'soumer	Berge Arzew
Vitesse, nœud	18.8	19.4	19.4	19.8	20.2	20	19	19
Longueur lors tout, m	200	266.7	266.7	278.21	274.22	274.22		
Tirants d'eau max, m	8.5	10.85	10.85	2.8	13.32	13.32		
Capacité, m ³	36125	129767	129767	125260	126130	126130	145500	138000
Date de démarrage	1971	1977	1979	1976	1981	1980	2004	2004
Age	30	24	22	25	19	21	2	2

CHAPITRE II

Transport par gazoduc

I.1.Introduction :

Les gazoducs sont des systèmes complexes en longueur (plusieurs centaines de km, et même des milliers), destinés au transport du gaz naturel par canalisation. Les gazoducs sont constitués de tubes d'aciers soudés bout à bout, recouverts d'un matériau isolant (polyéthylène, polypropylène,...) contribuant à leur protection contre la corrosion. Ils peuvent être également revêtus de l'intérieur pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour prévenir la corrosion interne si le gaz transporté est corrosif. Les gazoducs sont en majorité terrestres, ils sont enfouis à environ un mètre de profondeur dans les zones habitées, soit posés à même le sol en zone désertique, ou en zone à sol dur (permafrost). Leur diamètre varie entre 50 millimètres (2 pouces) et 1420 millimètres (environ 56 pouces) des tube de 60 pouce sont parfois utiliser; pour les plus importants. Toutefois, le tarissement des sources de proximité et l'éloignement croissant des zones d'exploitation ont conduit à l'établissement de gazoducs sous-marins. Il y a trois différents types de topologies: linéaire arbre, et cycliques. Un gazoduc est composé de stations de compression qui fournir de l'énergie de pression nécessaire pour le transport de gaz via un pipeline.

Un certain nombre de turbocompresseurs situés en parallèle sont les équipements principaux d'une station de compression. Une partie du gaz traversant la station est utilisée comme gaz combustible pour le turbocompresseur.

Dans ces opérations l'exploitant du poste est responsable de deux décisions importantes: augmentation ou diminution de compression dans les pipelines, et démarrage ou l'arrêt des unités de turbocompresseur. Une décision erronée faite par l'opérateur peut causer l'augmentation des coûts de l'énergie ou l'insatisfaction du client.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

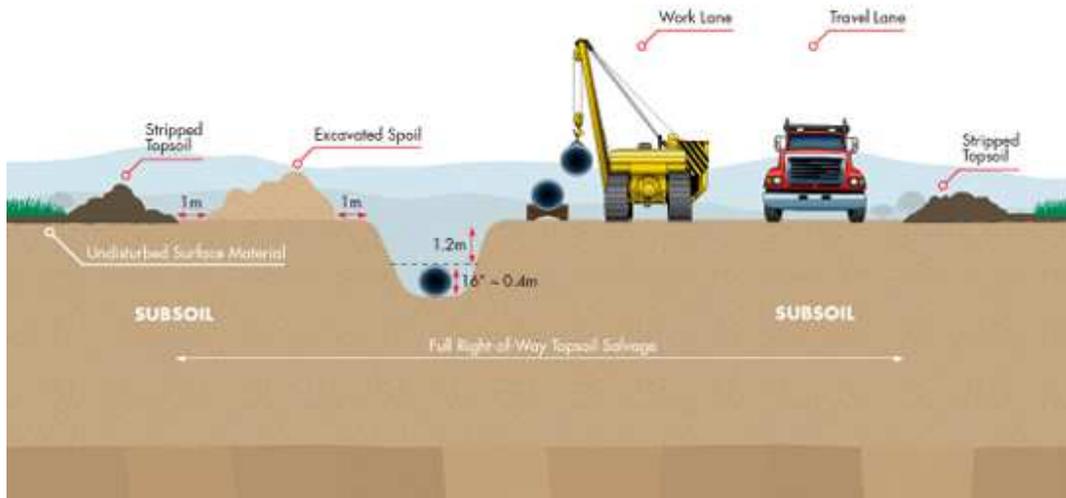


Fig.10 : construction d'un gazoduc

Il y a plusieurs travaux publiés dans ce domaine par exemple en site :

Chebouba et smati [9], [10] ils ont étudiés l'optimisation du transport algérien du gaz naturel par gazoduc en utilisation deux méthodes de programmation dynamique avec un choix automatique des compresseur pour essai de trouver un optimum pour la diminution la consommation du gaz naturel par les stations de pompage, le deuxième utilisé l'algorithme dit des colonies de fourmis ces résultat sont comparé pour déterminer la méthode optimale pour ce type de problème.

On cite aussi TABKHI, Pibouleau et Azzaro-Pantel [11] qui proposent leur modèle pour l'optimisation des réseaux de gazoducs c'est-à-dire la diminution du débit de gaz consommé dans les stations de pompage à l'aide d'un module de résolution CONOPT3 au sein de l'environnement GAMS (General Algebraic Modelling System) qui est utilisé pour traiter des problèmes non linéaires .

Dorao et Fernandino [12] ont fait une simulation pour représenter l'écoulement du gaz naturel dans les gazoducs avec la méthode spectral (LSQ-SEM).

II.2. Gazoduc Algériens

L'Algérie possède 32 stations de compression pour tous le système de gazoducs, le GN Algérien est transport après l'extraction et traitement des champs de Hassi R'Mel, Ain Amenas au Centre National de Dispatching gaz (CNDG) qui se trouve à Hassi R'Mel, de là il sera redistribuée vers les autres gazoducs.

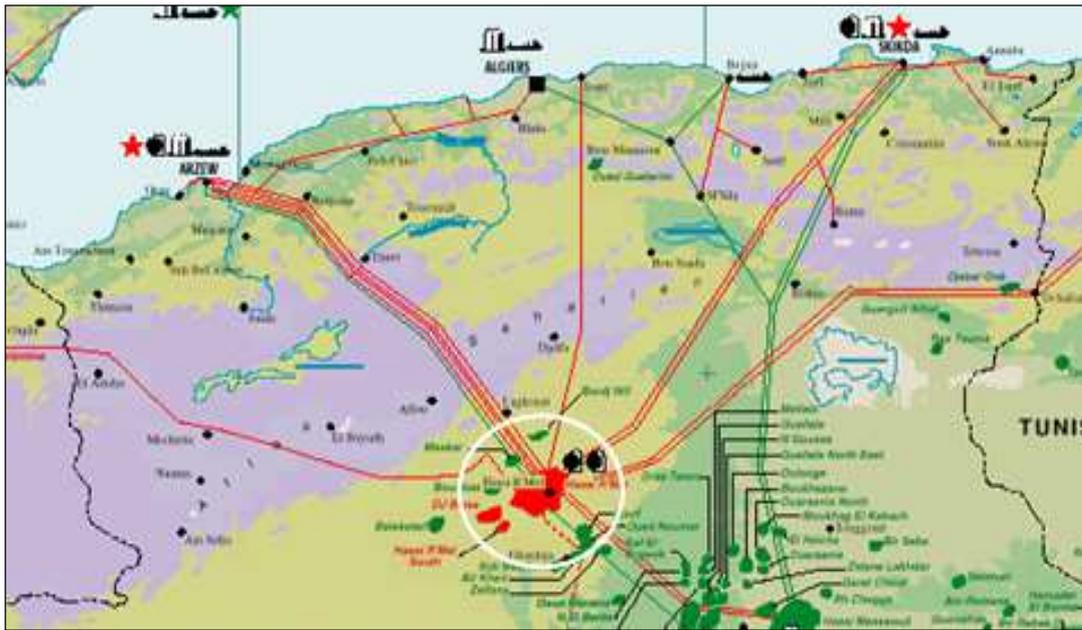


Fig.11 : Gazoducs algérienne [7]

C'est le plus grand système de distribution de gaz naturel pour les terminaux de liquéfié et exportation (GNL) le long de la mer Méditerranée. Ce système connecte Hassi R'Mel à Arzew via 4 gazoducs (GZ0, GZ1, GZ2, GZ3) sur plus de 507 km pour une capacité totale de 45 Mm³/an, tandis qu'un autre système relie Hassi R'mel à Skikda via 2 gazoducs (GK1, GK2) sur un distance de 579 km pour 20.5 Mm³/ an. Un plus petit gazoduc fonctionne aussi entre Hassi R'mel et Isser, près d'Alger CG1 sur 434 km avec une capacité de 7.1 Mm³ / an Hassi R'mel est la plaque tournante pour l'ensemble du réseau de transport de gaz naturel de l'Algérie [17].

II.2. Le gazoduc PEDRO DURAN FARRELL

Aussi connu sous le nom de Maghreb-Europe Gas Pipeline c'est un pipeline de gaz naturel, qui relie le champ Algérien de Hassi R'mel via le Maroc, à Cordoue en Andalousie (Espagne), où il est connecté aux réseaux de gaz espagnol et portugais. Il fournit principalement l'Espagne et le Portugal, ainsi que le Maroc en gaz naturel.

Le Maghreb-Europe Gas Pipeline a d'abord été proposé en 1963 par des sociétés françaises. Cette proposition prévoyait la prolongation de l'oléoduc jusqu'à Strasbourg en France. Toutefois, en raison du litige du Sahara occidental, toute transition par le Maroc a été écarté. En outre la consommation de gaz naturel en Espagne était trop faible pour justifier la construction du pipeline [16].

Le projet a démarré au début des années 1990. En 1992, les ministres de l'Espagne et de l'Algérie ont convenu de commencer la construction de l'oléoduc. Dans le même temps Sonatrach et Enagás ont signé un accord de fourniture à long terme. Il a été suivi par la signature de la Convention marocaine établissant les procédures pour la construction, l'exploitation et l'utilisation de l'oléoduc. Lors de la même année, la société de projet Europe - Maghreb Pipeline Ltd a été créée. En 1994, Transgas (société Portugaise) a rejoint le projet. La construction a débuté le 11 Octobre 1994.

Le pipeline est entré en service le 1er Novembre 1996. La section espagnole a été inaugurée à Cordoue le 9 Décembre 1996. La section portugaise a été inaugurée le 27 Février 1997. En 2000, le pipeline a été nommé après Pedro Duran Farrell.

Le pipeline fait 1620 km de long, il a été construit par Bechtel et Saipem pour un coût de 2,3 milliards de dollars. Le pipeline se compose de cinq sections : Le gazoduc algérien, le marocain, la section andalouse dont le diamètre est de 48 pouces (1200 mm), le tronçon vers le Portugal par Estrémadure (3'' de diamètre) et les sections sous-marines qui se composent de deux lignes de 22 pouces (560 mm). La capacité initiale du pipeline était de 8,6 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an, celle-ci a été étendu à 12 milliards de mètres cubes.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG



Fig.11 : Maghreb-Europe Gas Pipeline [16]

Le tronçon algérienne de pipeline, 515 km de long, commence à partir du champ de Hassi R'Mel en Algérie et va jusqu'à la frontière marocaine. Il est détenu et exploité par Sonatrach. Les 522 kilomètres (324 miles) de long de la section marocaine sont la propriété de l'Etat marocain et exploitée par Metragaz, une coentreprise de Sagane (une filiale de l'espagnol Gas Natural), Transgas (Portugal) et SNPP (Maroc). La longueur de la section de passage au large du détroit de Gibraltar est de 45 km (28 mi), elle est détenue conjointement par Enagás (Espagne), Transgas, et l'Etat marocain. La longueur de la section Andalouse et portugaise est respectivement de 269 km. (De plus, il y existe 270 km de pipeline dans la communauté autonome d'Estrémadura)

II.3.Le gazoduc ENRICO MATTEI

Aussi connu sous de Transméditerranéen pipeline, il est le pipeline de gaz naturel qui relie l'Algérie via la Tunisie à la Sicile et de là, à l'Italie continuellement. Une extension du gazoduc Transmet livre du gaz algérien à la Slovénie.

Le gazoduc entre l'Algérie et l'Italie a été proposé dans les années 1960. Une étude préliminaire de faisabilité a été menée en 1969. Entre 1974-75, un contrôle technique de pose de tuyaux dans la mer Méditerranée a été effectué. En 1977, les accords d'approvisionnement et de transit ont été

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

signés. La première phase du gazoduc a été construite entre 1978-1983 et la deuxième phase entre 1991-1994. La capacité du gazoduc a été doublée en 1994. En 2000, le gazoduc a été nommé après Enrico Mattei.



Fig.12 : Gazoduc Enrico Mattei [16]

Le pipeline commence à partir du champ de Hassi R'Mel en Algérie et se prolonge sur 550 km jusqu'à la frontière tunisienne. En Tunisie, le pipeline s'étend sur 370 km jusqu'à El Haouaria, dans la région du Cap Bon, après quoi le pipe traverse 155 km sur le Canal de Sicile. Il débouche à Mazara del Vallo en Sicile. De là, le pipeline traverse la Sicile sur 340 km, puis le détroit de Messine (15 kilomètres), pour enfin effectuer 1055 km dans la branche continentale italienne dans le nord de l'Italie et la Slovénie.

La section algérienne se compose de deux stations de compression et une ligne de 48 pouces (1220 mm) de diamètre. La section tunisienne se compose de trois stations de compression et deux lignes de 48 pouces (1220 mm) de diamètre. En 2007, l'entrepreneur italien Saipem a obtenu un contrat de deux nouvelles stations de compressions et de mise à niveau des stations de compression existantes permettant d'augmenter la capacité tunisienne de 6,5 milliards de mètre cubent. Les redevances pour le transport de gaz reçu par la Tunisie sont de 5,25 à 6,75 % de la valeur du gaz transporté. La section offshore à travers le Canal de Sicile se compose de trois lignes d'un diamètre de 20 pouces (510 mm) et deux lignes d'un diamètre de 26 pouces (660

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

mm) [16]. En Italie, le diamètre des deux lignes varie entre 42 pouces (1070 mm) et 48 pouces (1.220 mm).

La capacité actuelle du pipeline est de 30,2 milliards de mètres cubes (mmc) de gaz naturel par an. Il est prévu d'étendre cette capacité à 33,5 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an d'ici à 2012. La section algérienne est exploitée par l'Algérie et appartient à la société Sonatrach. La section tunisienne est la propriété de Sotugat (Société Tunisienne du Gazoduc Trans-tunisien) et exploité par Sergaz. La section à travers le canal de Sicile est exploitée par TMPC, une joint-venture d'Eni et Sonatrach. La section italienne est exploitée par Eni, filiale Snam Rete Gas.

II.4. Medgaz

Medgaz reliera Beni Saf de l'Algérie à Almeria en Espagne sur une distance de 210 Km, pour une profondeur de 2.160 mètres, avec une extension éventuelle vers la France. Avec un cout entre 0.9 a 1,2 milliard de dollars, le Medgaz devrait être d'exploitation en Septembre 2009, avec une première capacité de $11 \text{ Mm}^3 / \text{j}$ et peut être augmenté jusqu'à $43 \text{ Mm}^3 / \text{j}$ pour une capacité annuel de 8 milliard m^3/an [14].

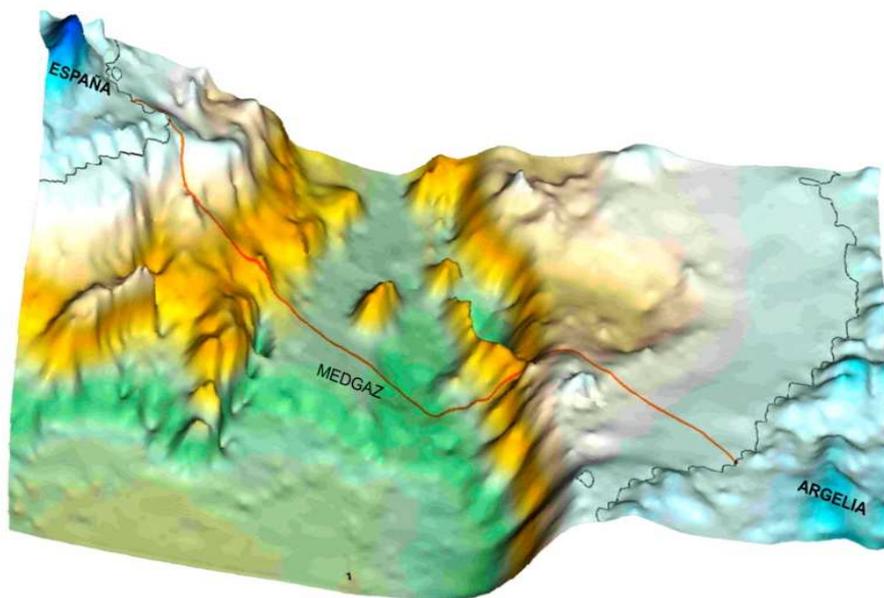


Fig.13 : Représentation 3D du Medgaz [14]

II.5. Galsi gazoduc

Le gazoduc Galsise partira du Hassi R'mel en passant par El Kala en Algérie puis en sous-marin jusqu'en Sardaigne à Cagliari puis à terre il passe par Oliban, puis en sous-marin à Piombino, en Italie, où il sera connecté au réseau de transfert de nationalité italienne. Le Galsi, en cours de construction, aura une capacité initiale de $22-28 \text{ Mm}^3 / \text{j}$, il est créée le 29 janvier 2003 à Milan, en Italie, avec un niveau de participation de Sonatrach à hauteur de 36 % ; la société Galsi doit réaliser le gazoduc stratégique sur une longueur de près de 900 km, dont 600 environ en offshore, et posé sur une profondeur allant jusqu'à 2 885 mètres entre l'Algérie et la Sardaigne. Malheureusement la baisse des prix de gaz naturel a fait suspendre ce projet qui est en cours de réévaluation. Sonatrach menacerait de retire ce projet à cause de l'engagement de l'Italie dans deux projet concernent l'un de la Russie vers le nord de l'Europe l'autre, le trans-adriatique pipeline



Fig. 14 : Galsi [15]

II.6. Gazoduc Transsaharienne

Sonatrach et la Nigerian National Petroleum Corporation ont pour objectif de construire un gazoduc 4500 km de Warri, au Nigeria à Hassi R'Mel, via le Niger. Le gazoduc proposé d'utiliser le Medgaz et de gazoducs Transme pour mener le gaz naturel nigérien vers les marchés européens.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG



Fig.15 : Transsaharienne

En Février 2009 les représentants de Sonatrach et la Nigerian National Petroleum Corp (NNPC) sont réunis à Lagos pour finaliser les plans de 12 milliards de dollars pour projet. Toutefois, la longueur immense et de l'insécurité sont deux risques à effet dissuasif sur les avancées du projet, en plans de son financement qui oscille entre 6 et 12 milliards USD.

CHAPITRE III

Modélisation analytique du transport par gazoduc

III.1.Problématique

Dans le transport du gaz naturel le problème d'autoconsommation énergétique est lié au fonctionnement et aux performances des stations de pompage et aux caractéristique de pertes de charge des canalisations. Pour un débit donné par l'objectif du projet, celles-ci sont affectées par le diamètre et la rugosité du pipe d'une part, les changements de direction (pertes de charges singulières) et les changements d'altitude (variation de l'énergie potentielle du fluide).Une fois le tracé du gazoduc adopté, il ne reste plus qu'à chercher l'optimum en faisant varier la pression de compression, le diamètre du pipe et le nombre de station de compression.

Par rapport aux stations de pompage les pertes sont liées à la caractéristique des machines telles que les pertes de charge dans la compression, les pertes mécaniques dues aux transmissions, mais surtout aux performances du cycle moteur entraînant le compresseur. Les stations de compression étant en général éloignées du réseau électrique national, la solution adoptée consiste donc à produire l'énergie de compression en prélevant du gaz naturel sur le débit du gazoduc, qui diminue ainsi après chaque station.

L'optimisation d'un concept de gazoduc est évidemment de nature économique et elle est faite sur la vie économique de l'ouvrage ; elle est donc sujette aux aléas des coûts énergétiques futurs et aux imprécisions du calcul économique. Les deux composantes du bilan global du projet de gazoduc sont celles relatives d'une part à la consommation énergétique et aux dépenses de fonctionnement qu'il y a lieu de ramener au temps zéro, et aux dépenses en équipements et travaux de construction qu'il y a lieu de cumuler au temps zéro.

Intuitivement, les dépenses en équipements et en énergie s'opposent pour résulter en un coût global minimum ; augmenter le diamètre du pipe et/ou le nombre de stations de compression augmente le cout des investissements. L'objectif ici n'est pas de réaliser une optimisation économique, mais seulement de proposer des outils de calcul thermodynamique relatif aux deux composantes de l'ouvrage pour éventuellement en faire usage dans un travail ultérieur.

III.2. Modélisation du transport du gaz naturel par gazoduc :

La modélisation thermodynamique du gazoduc comprend principalement deux parties, les stations de compression et la canalisation proprement dite. Dans ce qui suit nous allons poser une modélisation du transport du gaz naturel par gazoduc qui nous diviserons donc en deux parties, la première sera consacrée aux stations de compression de gazoduc, la seconde sera consacrée à l'écoulement du gaz dans le gazoduc.

III.2.1 : Compression

La puissance de compression est déterminée par la simple application du premier principe à un système ouvert (le gaz à comprimer) en supposant une transformation adiabatique mais irréversible. Le compresseur étant traversé par un grand débit que ne subit pas une élévation de température excessive, il est habituel de négliger les pertes thermiques car elles sont minimales relativement à l'énergie interne du gaz ; mais si nécessaire on pourra éventuellement en tenir compte en supposant une transformation polytropique [18].

En introduisant un rendement isentropique de compression, la puissance est donnée par :

$$\dot{P} = \frac{1}{\eta_c} \dot{m}(h_{2s} - h_1) \quad (3-1)$$

Cette transformation est schématisée sur un diagramme T-s la figure 3-1

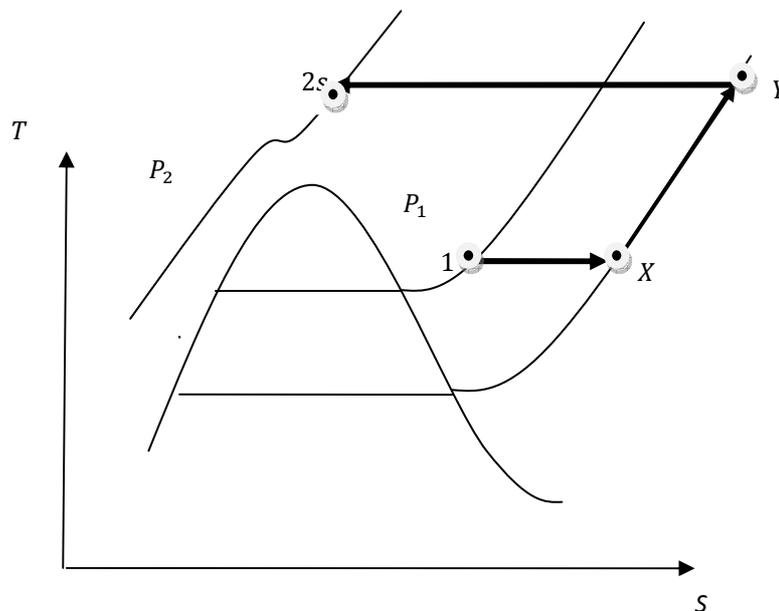


Fig.16 : diagramme T-s montrant le calcul de la différence d'enthalpie h_2-h_1 entre deux états quelconques

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-
REDLICH-KWONG

La différence d'enthalpie entre les états 1-2 est donner par :

$$(h_2 - h_1) = (h_x - h_1) + (h_y - h_x) + (h_2 - h_y) \quad (3-2)$$

Les états X et Y sont situé sur l'isobare des gaz parfaits, leur différence d'enthalpie est

donnée par :

$$(h_y - h_x) = \int_x^y Cp(T)dT \quad (3-3)$$

Les différence d'enthalpie entre les états 1et X d'une part, et Y et d'autre parte, qui sont relatives à des transformations isotherme, est donnée par la forme :

$$(h_x - h_1) = \int_1^x \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (3-4)$$

$$(h_2 - h_y) = \int_y^{2s} \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] dP \quad (3-5)$$

Si l'équation d'état utilisée n'est pas explicite en v, mais en P, comme la famille des équations dérivée de celle de van der walls, on utilisera la définition de l'enthalpie pour écrire :

$$dh = du + d(Pv) \quad (3-6)$$

D'où

$$(h_2 - h_1) = (u_2 - u_1) + (P_2v_2 - P_1v_1) \quad (3-7)$$

Et les changements de l'énergie interne, pour écrire :

$$(u_2 - u_1) = (u_x - u_1) + (u_y - u_x) + (u_2 - u_1) \quad (3-8)$$

Avec

$$(u_x - u_1) = \int_1^x \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv \quad (3-9)$$

$$(u_2 - u_y) = \int_y^2 \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv \quad (3-10)$$

$$(u_y - u_x) = \int_x^y Cv(T)dT \quad (3-11)$$

III-2.1.1 Equation d'état

L'équation d'état de SOAVE-REDLICH-KWONG(1972) [21] recommandée pour l'évaluation des propriétés d'hydrocarbure, en particulier en phase gazeuse

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad (3-12)$$

Avec $a(T) = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} (1 + m(1 - T_r^{0.5}))^2$ et $b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$

Pour le cas d'un mélange on a : $a = (\sum a_i^{1/2} x_i)^2$ et $b = \sum x_i b_i$

III-2.1.2 Procédure de calcul relative à la compression

L'état 1 de la compression est défini par la pression et la température ; on calculera le volume spécifique qui correspond ici à celui de la racine le plus élevé donné par l'équation (3-12).

La compression idéale étant supposée isentropique, la variation d'entropie ($S_{2s}-S_1$) est nulle ; on utilisera à cet effet la relation :

$$(s_{2s} - s_1) = (s_x - s_1) + (s_y - s_x) + (s_2 - s_y) \quad (3-13)$$

La transformation (1-X) est isotherme, la transformation (X-Y) est isochore de gaz parfait, la transformation (Y-2s) est isotherme .l'équation (3-13) donne ainsi :

$$\int_1^x \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv + \int_x^y C_v(T) \frac{dT}{T} + \int_y^{2s} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv = 0 \quad (3-14)$$

La somme des trois termes doit être rendue nulle ; à cet effet, on fera varier la température à volume constant, ce qui fera varier la pression et ce jusqu'à convergence numérique, l'état s_{2s} sera ainsi par sa pression et sa température ; le volume est aussi connu. La variation isentropique de l'enthalpie de compression peut alors être calculé par :

$$(h_{2s} - h_1) = \int_1^x \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv + \int_x^y C_v(T) dT + \int_y^{2s} \left[T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] dv + (P_2 v_2 - P_1 v_1) \quad (3-15)$$

Ainsi après intégration en obtient la variation enthalpie isentropique il suffira de diviser par le rendement compresseur pour déterminer l'enthalpie réel de en déterminera la puissance, la température et le volume de sortie pour un débit et une pression de sortie donnée.

III-3 : Equation de définition de calcul relative à l'écoulement dans le gazoduc

Connaissant l'état du gaz à son entrée un tronçon du gazoduc, l'objectif qui à réaliser est de déterminer la chute de pression dans un tronçon de diamètre et longueur donnée, moyennant des hypothèses à énoncer, pour déterminer avec la température l'état du gaz à l'entrée du compresseur de la station. La température pourra soit supposée égale à celle du sol, soit

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

soumise à détermination simultanée avec la chute de pression, selon les hypothèses à admettre.

Equation pertinentes :

i. Soit l'équation (3- 12) de S.R.K
$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)}$$

ii. **Equation d'énergie** pour un écoulement en régime permanent soumis à un transfert thermique avec coefficient global U vers le sol à une température T_s [19]:

$$Cp(T)dT + d\left(\frac{v^2}{2}\right) = \frac{\pi D}{\dot{m}}(T - T_s)Udx \quad (3-16)$$

iii. **L'équation de continuité** pour un gaz de la section A constant [19]:

$$d(\rho V) = 0 = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} \quad (3-17)$$

iv. **Equilibre de la quantité de mouvement :**

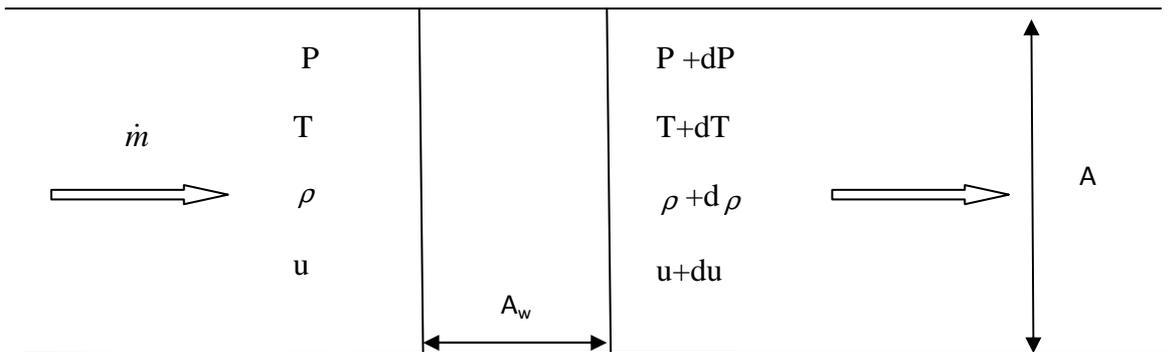


Fig.17 : Domain d'étude d'un tronçon de gazoduc

$$-AdP - \tau_w dA_w = \dot{m}dV \quad (3-18)$$

$$\text{Avec : } \tau_w \cong \frac{f\rho V^2}{2} \quad (3-19)$$

Le facteur de frottement et détermine en utilisant la charte de Moody

Ou la variation de la quantité de mouvement est équilibrée par la chute de pression et le cisaillement pariétal du fluide, de signe opposé à la vitesse

On définit la relation du diamètre hydraulique :
$$D = \frac{4Adx}{dA_w} \Rightarrow dA_w = \frac{4A}{D} dx \quad (3-20)$$

On introduit le coefficient de frottement et le diamètre hydraulique dans l'équation de mouvement pour obtenir une forme intégrable numériquement en tenant compte de l'équation de l'énergie :

$$-dP = -\frac{2f}{AD} \rho V^2 dx + \dot{m} du \Rightarrow -dP = \frac{2f\dot{m}}{AD} u dx + \frac{\dot{m}}{A} du \quad (3-21)$$

$$d\left(\frac{V^2}{2}\right) = -\frac{\pi DU}{\dot{m}} (T - T_s) U dx - C_p(T) dT \quad (3-22)$$

l'équation (3-21) montre que la pression diminue le long du gazoduc avec le frottement pariétal et l'accélération de l'écoulement.

En résumé, il y a quatre inconnues à l'état final, en fin de tronçon de gazoduc :

La pression **P**, la température **T**, la masse volumique **ρ** et la vitesse **V** ; les trois premières étant liées par l'équation d'état ; et on dispose de quatre équations indépendantes pour déterminer ces quatre propriétés inconnues : l'équation d'énergie, l'équation du mouvement, l'équation de continuité, et l'équation d'état ; le problème a donc une solution unique.

- i. Avec un changement de variable $\theta \equiv (T - T_s)$, et $d\theta \equiv dT$, l'équation d'énergie (3-

$$21) \text{ s'écrit : } d\left(\frac{V^2}{2}\right) = -\frac{\pi DU}{\dot{m}} \theta U dx - C_p(\theta - T_s) d\theta \quad (3-23)$$

En supposant une chaleur spécifique constante, qui varie peu avec la pression et la température de l'écoulement, l'équation (3-23) permet d'écrire que la somme des variations de l'énergie cinétique et de l'énergie interne est vérifiée par :

$$\left(\frac{V^2}{2}\right)_2^f + C_p(\theta_f - \theta_2) = \int_2^f U A \theta dx \quad (3-24)$$

- ii. L'équation du mouvement est :

$$dP + \dot{m} \frac{dV}{V} = -2\dot{m} V \frac{f}{AD} dx \quad (3-25)$$

- iii. L'équation d'état : $P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a(T)}{v(v+b)}$ (3-26)

- iv. L'équation de continuité $\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0$ (3-27)

v. Le coefficient de transfert thermique global pour un cylindre c'est [20] avec

$$U = \frac{1}{\left(\frac{r_1}{h} + \frac{r_1 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\lambda_{pipe}} + \frac{r_2 \log\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{\lambda_{isolant}}\right)} \quad (3-28)$$

Le coefficient de convection thermique est déterminé par l'Analogie de Reynolds-

colburne $h = \frac{\dot{m}c_p f}{8A Pr^{2/3}}$ avec Pr est le nombre de Prandtl [21].

III-3.1 Algorithme de calcul :

Hypothèses préliminaire :

- La température finale θ_f en bout de tronçon tend vers la température du sol comme par exemple $T_f = T_s + 10^\circ\text{C}$; les effets de cette hypothèse seront analysés après l'obtention de la solution

- La chaleur spécifique va légèrement décroître de la valeur correspondant à T_2 à la sortie du compresseur à celle de T_f à la fin du tronçon de gazoduc. La variation de Cp par rapport à la pression et la température constante est donnée par :

$$\left(\frac{\partial C_p}{\partial P}\right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P \text{ dont la valeur peut être obtenue à partir de l'équation d'état.}$$

Ce terme étant positif, la chaleur spécifique est supposée constante avec une bonne approximation.

- Puisque la solution de ce système de deux équations non linéaires et deux équation intégrale n'est pas priori aisée, on procédera par itération et successive pour lesquelles on devra supposer un profil de la vitesse et un profil de la température dont les soient vérifier expérimentalement ou non, cela reste à voir ; ces intégrales représentent des quantités accumulées sur la longueur du gazoduc ; elles varient donc selon le profil adopté qui connecte les propriétés d'état ; elles influencent la convergence de la procédure de calcul et sans doute les valeur de convergence. La comparaison avec d'autres profils montrera et vérifiera ou pas le bienfondé de cette approche approximative et itérative. La valeur numérique de la convergence est donc solutions du problème.

- a. On suppose une pression et une température finales en bout du tronçon du gazoduc et on résout l'équation de S.R.K par un algorithme de Newton-Raphson, par exemple on obtient ρ_f

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

b. On intègre l'équation (3-27) et on obtient :

$$\left(\frac{\rho_f}{\rho_2}\right) = \left(\frac{V_2}{V_f}\right) \Rightarrow V_f = V_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_f}\right) \quad (3-29)$$

c. On intègre l'équation (3-27) et on suppose une pression finale P_f , d'où :

$$(P_f - P_2) + \frac{\dot{m}}{A}(V_f - V_2) = -\frac{2\dot{m}f}{AD} \int_2^f V dx \quad (3-30)$$

d. L'intégration de l'équation d'énergie (3-16)

$$\left(\frac{V^2}{2}\right)_2^f + Cp(T_f - T_2) + \frac{\pi D U L T_s}{\dot{m}} = \frac{\pi D U}{\dot{m}} \int_2^f T dx \quad (3-31)$$

III-3.2 profil de température :

Supposons une distribution de la température qui soit : $T = T_s + (T_2 - T_s)e^{-\frac{\alpha x}{L}}$

Pour $x=0$, $T=T_2$; pour $x=L$ $T = T_s + (T_2 - T_s)e^{-\alpha}$

L'intégration de l'équation (3-31) donnera une température finale qui satisfait l'équation (3-24), c'est-à-dire la variation de l'énergie cinétique et thermique intégrée sur le tronçon de gazoduc ; une autre distribution donnera une valeur différente de la température finale mais qui satisfait aussi l'équation (3-24).

On remplace le profil de température da (3-31) on a

$$\left(\frac{V_f^2 - V_2^2}{2}\right) - Cp(T_f - T_2) + \frac{\pi D U L T_s}{\dot{m}} - \frac{\pi D U L T_s}{\dot{m}} = \frac{\pi D U}{\dot{m}} (T_2 - T_s) \int_2^f e^{-\frac{\alpha x}{L}} \quad (3-32)$$

Après intégration (3-32) devient :

$$\left(\frac{V_f^2 - V_2^2}{2}\right) - Cp(T_f - T_2) = \frac{\pi D U L}{\dot{m}} (T_2 - T_s)(1 - e^{-\alpha}) \quad (3-33)$$

La convergence est en fonction du coefficient α à déterminer

III-3-3 profil de vitesse

A. Soit le premier profil (linéaire) pour la vitesse :

$$V(x) = V_2 + \frac{x}{L}(V_f - V_2) \quad (3-34)$$

D'où on a
$$\int_0^L V(x)dx = \frac{L}{2}(V_f + V_2) \quad (3-35)$$

On remplace (3-35) dans l'équation (3-30):

$$P_f = P_2 - \frac{\dot{m}}{A}(V_f - V_2) - \frac{\dot{m}fL}{AD}(V_f + V_2) \quad (3-36)$$

B. Soit le deuxième profil pour la vitesse :

On a le profil suivant :

$$V(x) = \sqrt{V_2^2 + \frac{x}{L}(V_f^2 - V_2^2)} \quad (3-37)$$

D'où on a
$$\int_0^L V(x)dx = \frac{2L}{3} \frac{(V_f^3 - V_2^3)}{(V_f^2 - V_2^2)} \quad (3-38)$$

On remplace (3-38) dans l'équation (3-30) :

$$P_f = P_2 - \frac{\dot{m}}{A}(V_f - V_2) - \frac{4\dot{m}fL}{3AD} \frac{(V_f^3 - V_2^3)}{(V_f^2 - V_2^2)} \quad (3-39)$$

C. Soit le troisième profil pour la vitesse :

On a le profil suivant :

$$V(x) = \left(V_2^{0.5} + \frac{x}{L}(V_f^{0.5} - V_2^{0.5}) \right)^2 \quad (3-41)$$

D'où on a
$$\int_0^L V(x)dx = \frac{L}{3} (\sqrt{V_f V_2} + V_f + V_2) \quad (3-42)$$

On remplace (3-42) dans l'équation (3-30) :

$$P_f = P_2 - \frac{\dot{m}}{A}(V_f - V_2) - \frac{2\dot{m}fL}{3AD} (\sqrt{V_f V_2} + V_f + V_2) \quad (3-43)$$

CHAPITRE 4

Résultat et discussions

IV.1 : Introduction aux études de cas

Trois études de cas ont été réalisées pour des conduites de 40, 42 et 44 pouces, pour les trois profils de vitesse mentionné dans le chapitre précédent avec des tronçons de 100 kms de longueur, et avec pour chaque cas, six valeurs de coefficients de frottement, variant de 0,0020 à 0,0033. Les valeurs usuelles sont plus proches de 0,0020 que de 0,0033. Les valeurs de 0,0027 et 0,0030 peuvent être considérées comme incluant des pertes singulières de changement de direction et d'accroissements de longueur au-dessus de 100 kms pour les changements de dénivellation. Pour simplifier, on peut considérer que les performances réelles sont cernées par la valeur de 0,00020 les minima, et 0,0027 pour les maxima de puissance de compression.

Ces cas sont sensés baliser les performances des gazoducs algériens réalisés avec ces diamètres. Le fluide considéré est du Méthane avec un débit massique de 13.5 milliards de NM^3 par an ; pour rappel les gazoducs algériens vers les usines de liquéfaction sont de 40 pouces (GZ1, GZ2, GK1) et 42 pouces (GZ3).

Pour chaque cas de diamètre de gazoduc, on donne l'évolution de la pression de sortie en fonction de la pression d'entrée d'une part, et la puissance d'autre part en fonction de la pression d'entrée de gazoduc. En fait, la pression (et la température) de sortie d'un tronçon constituent l'état d'entrée du gaz dans la station de compression. On remarquera que le rapport de pression de compression est le paramètre le plus influent sur la puissance de compression.

IV.2 : Diamètre 40 pouces

Les figure 19, 21, 23 montre que pour le débit massique considéré, la pression minimale de compression sera de 7.07 MPa et la pression maximum finale 4.40 MPa pour le 1ere profil, 4.36 pour le 2ème profil et 4.41 pour le 3émz soit des taux de compressions respectif de 1.60, 1.62, 1.60 pour la valeur du coefficient de frottement 0,0033 ; les puissances correspondante sont de 27.15, 27.5, 26.69 MW (voir figures 18, 20, 22).

La puissance la moins élevée correspond ($f=0,00020$) à une pression d'entrée gazoduc de 11.11 MPa et une pression de sortie qui est la presque la mémé pour les 3 profils de 10.31 MPa, avec

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

des puissances respectif de 4.96, 4.99, 4.95 MW (voir figures de 18 à 23). Clairement, du point de vue puissance, il sera plus économique d'opter pour un régime de pression le plus élevé, acceptable du point de vue de résistance des matériaux. On sait que celle-ci diminue rapidement avec le diamètre de la conduite pour une épaisseur de tube donnée. L'utilisation de pressions élevées est donc limitée par le diamètre admissible, donc le coût de la conduite.

Pour limiter la discussion de tous les cas de figures, on considèrera les puissances minima et maxima correspondant respectivement aux coefficients de frottement 0,00020 et 0,0033, pour une pression d'entrée gazoduc de 11.11 MPa pour les 3 profils de vitesse, soit 4.96, 4.99, 4.95 et 8.04, 8.12, 8.02 MW pour le diamètre de 40 pouces. Les pressions de sortie correspondantes sont 10.31 pour les 3 profils et 9.77, 9.78, 9.77 MPa, respectivement.

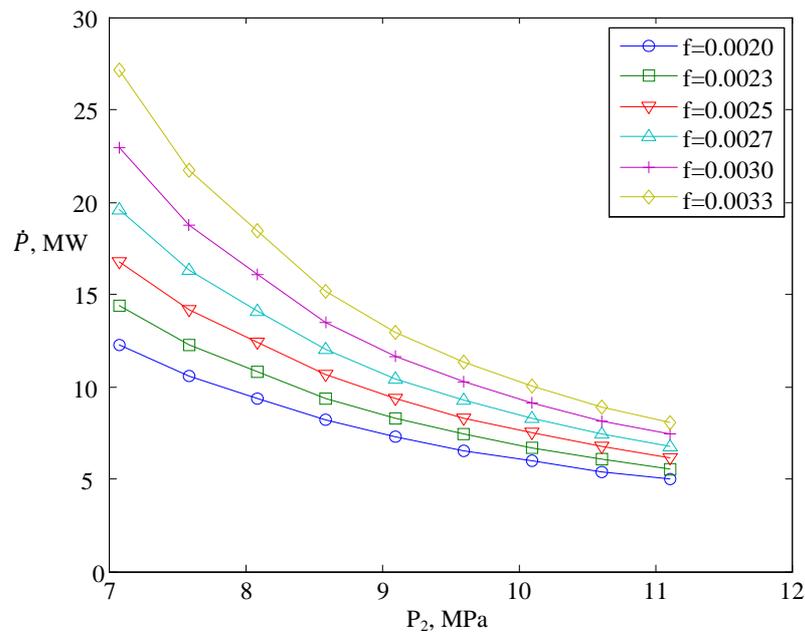


Fig.18: Puissance compresseur 40" profile 1

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

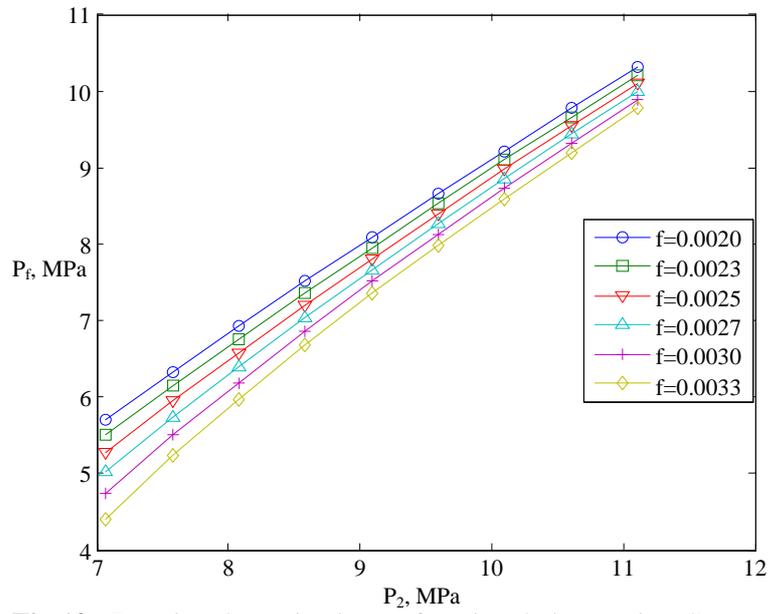


Fig.19 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 40'' profil 1

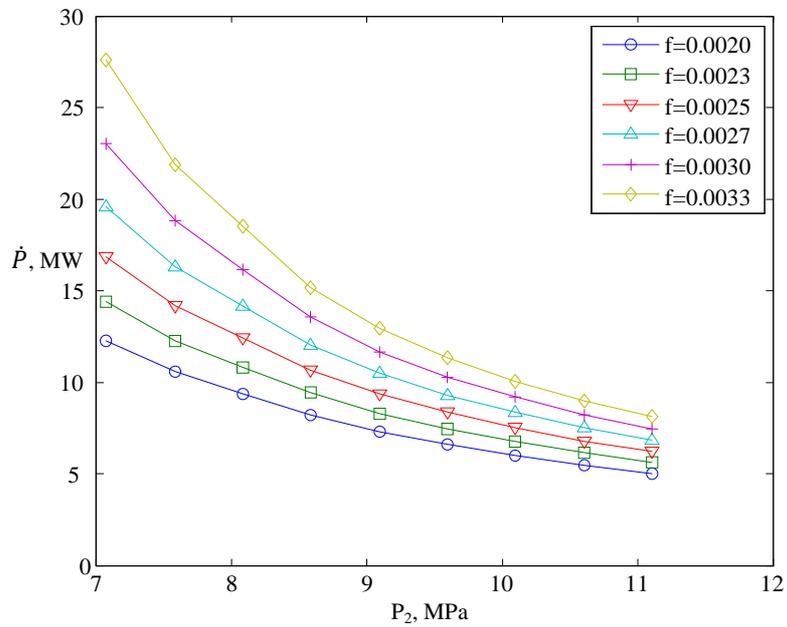


Fig.20 : Puissance compresseur 40'' profil 2

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

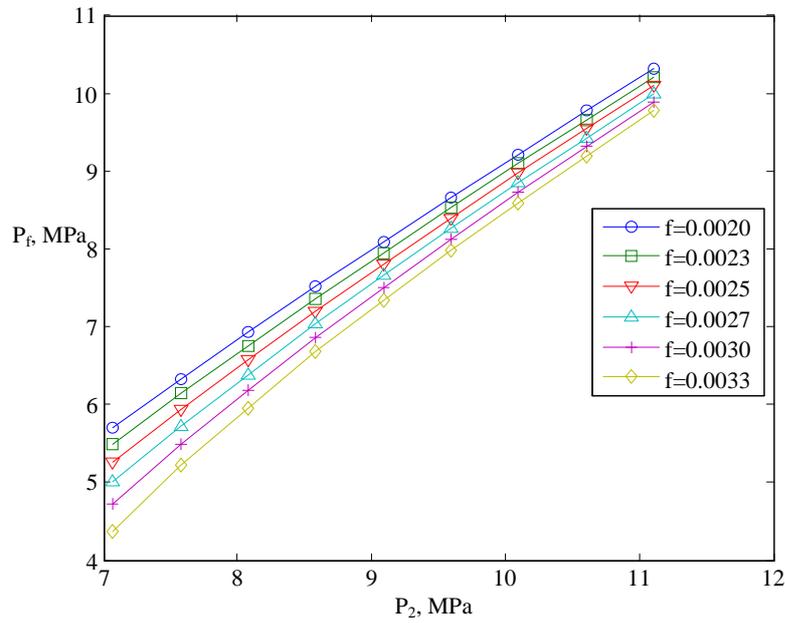


Fig.21 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 40'' profil 2

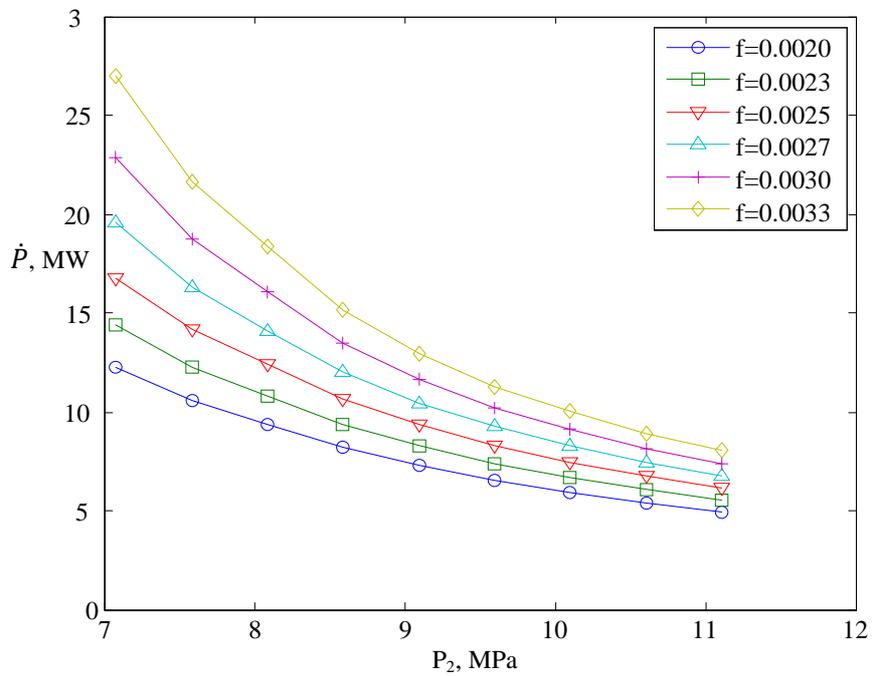


Fig.22 : Puissance compresseur 40" profil 3

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

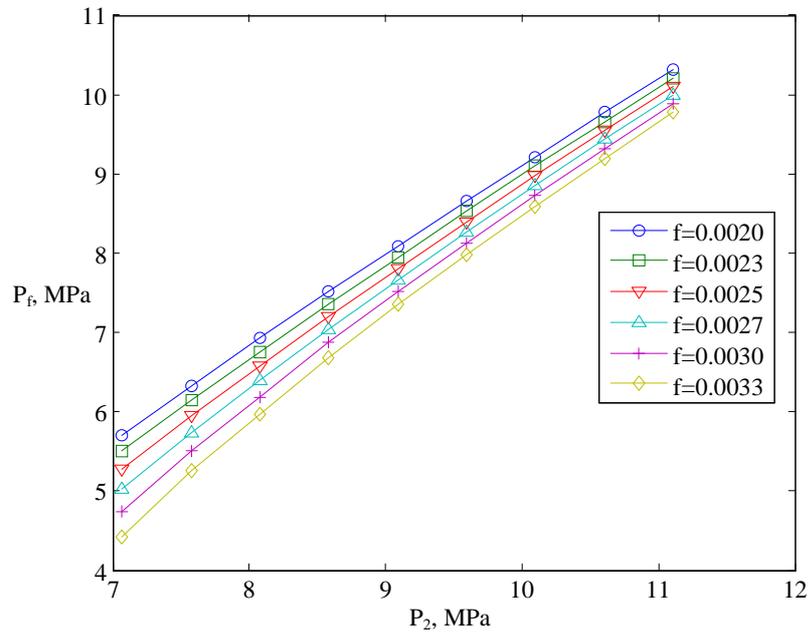


Fig.23 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 40''

IV.3 : Diamètre 42 pouces

Les résultats sont donnés par les figures de 24 à 29 ci-dessous. Les puissances minima et maxima correspondant respectivement aux coefficients de frottement 0,00020 et 0,0033, pour une pression d'entrée gazoduc de 11.11 MPa pour les 3 profils, sont de 4.06, 4.09, 4.04 et 6.15, 6.19, 6.13MW pour le diamètre de 42 pouces. Les pressions de sortie correspondantes sont de 10.5 pour les 3 profils et 10.50 et 10.10 MPa et, respectivement.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

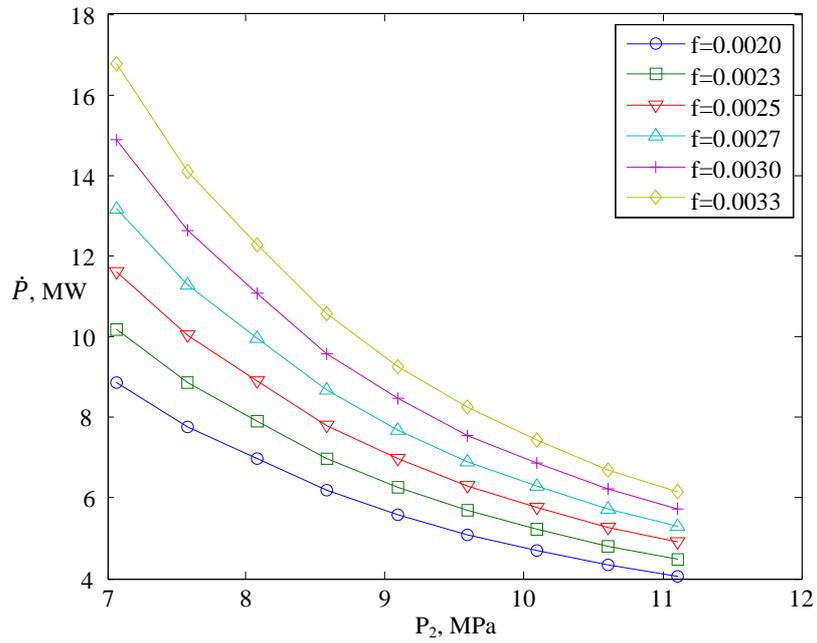


Fig.24 : Puissance compresseur 42" profil 1

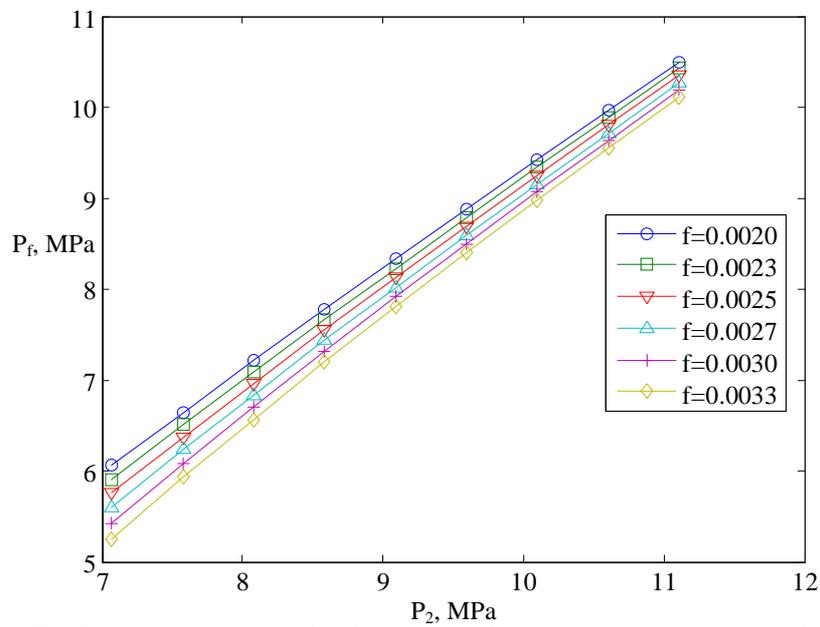


Fig.25 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 42'' profil 1

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

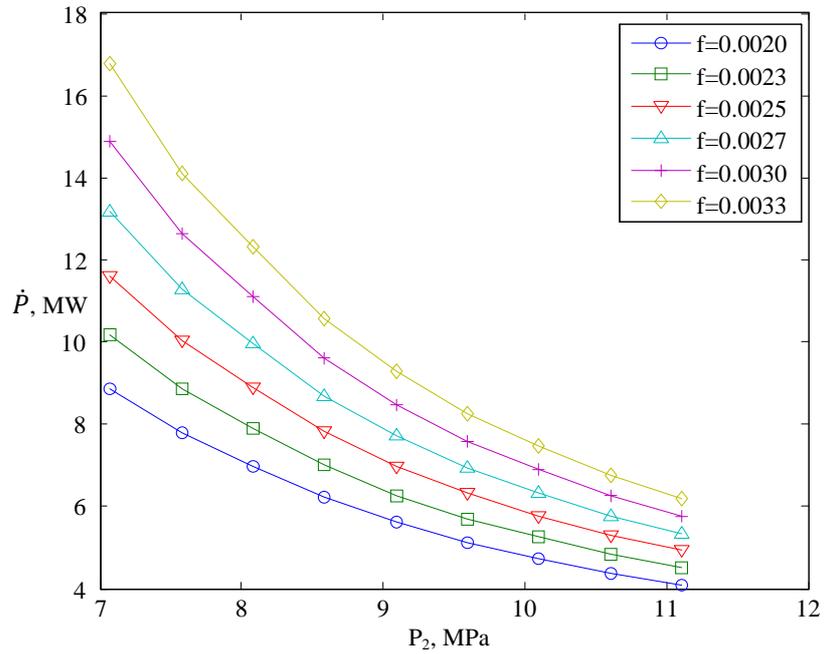


Fig.26 : Puissance compresseur 42" profil 2

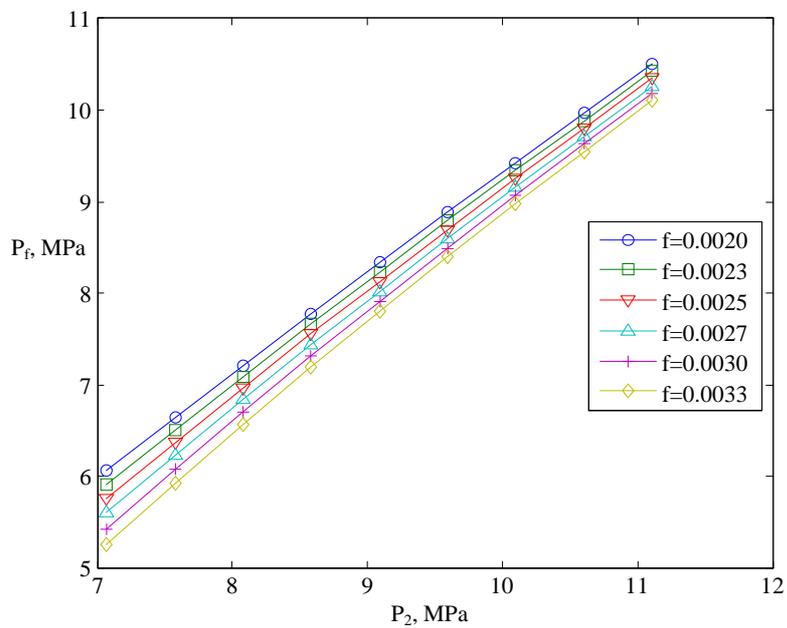


Fig.27 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 42'' profil 2

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

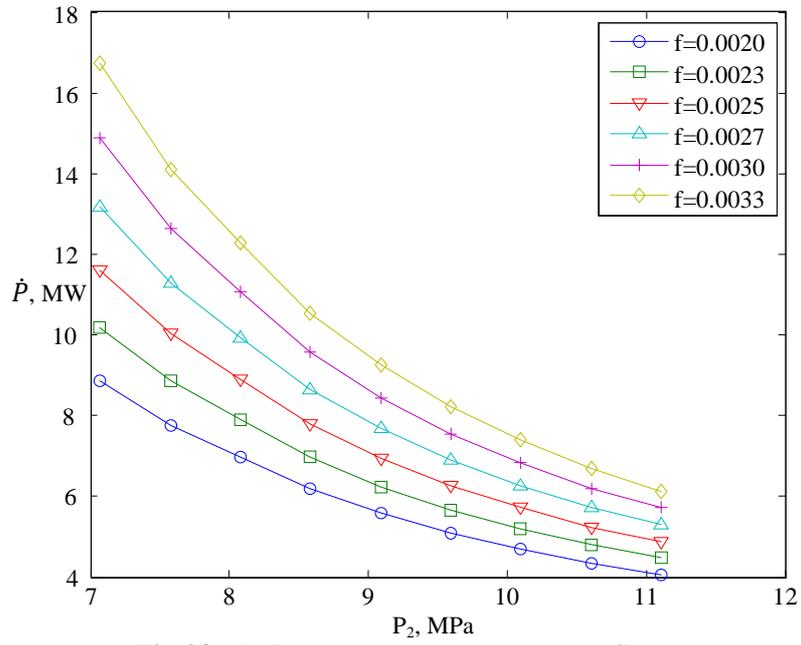


Fig.28 : Puissance compresseur 42" profile 3

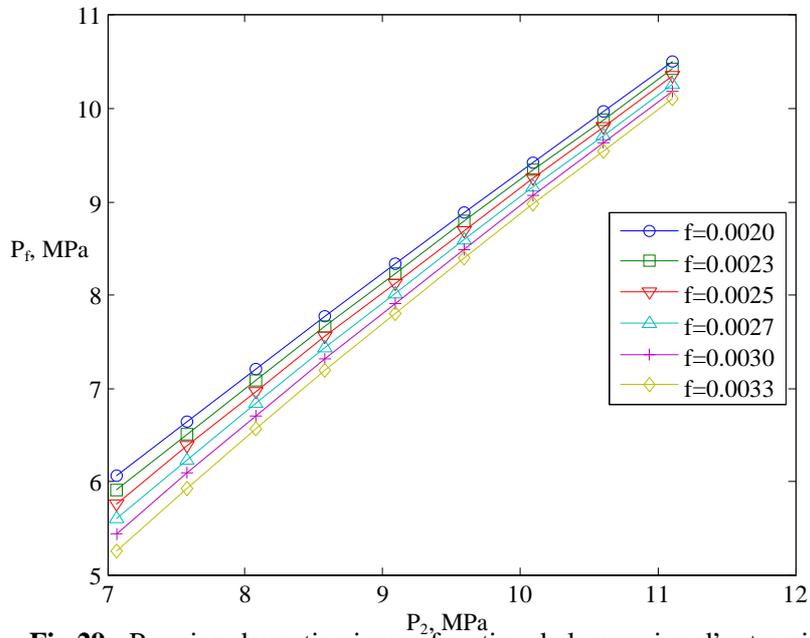


Fig.29 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 42'' profil 3

IV.4 : Diamètre 44 pouces

Les résultats sont donnés par les figures de 30 et 35 ci-dessous. Les puissances minima et maxima correspondant respectivement aux coefficients de frottement 0,0020 et 0,0033, pour une pression d'entrée gazoduc de 11,11 MPa pour les 3 profils de vitesse, sont de 3.62, 3.65, 3.61 MW et 5.19, 5.23, 5.17 MW pour le diamètre de 44 pouces. Les pressions de sortie correspondantes pour les 3 profils sont de 10.63 et 9,3 MPa, respectivement.

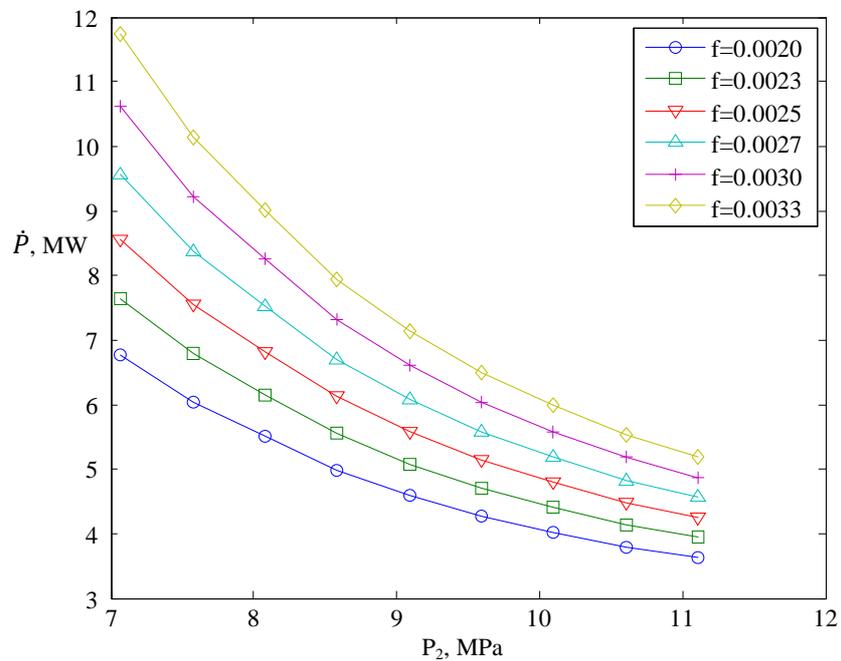


Fig.30 : Puissance compresseur 44" profile 1

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

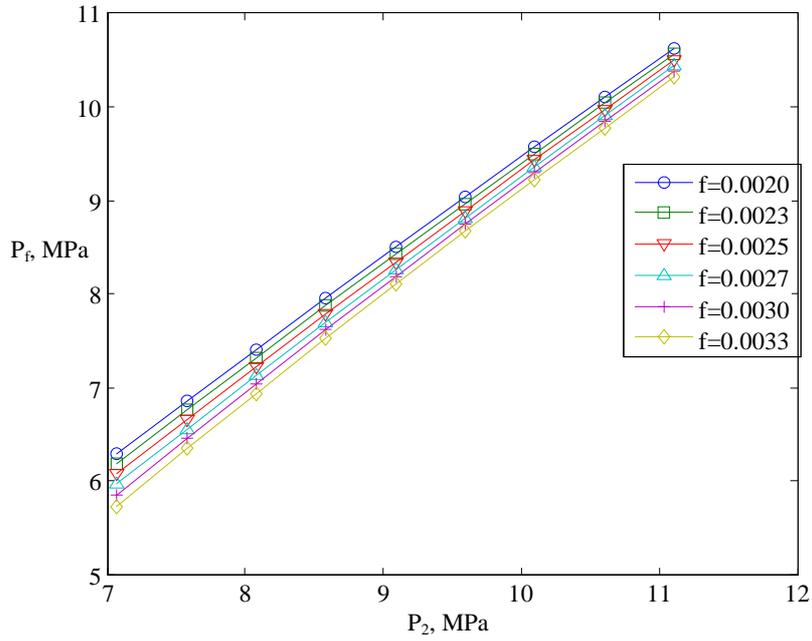


Fig.31 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 44'' profil 1

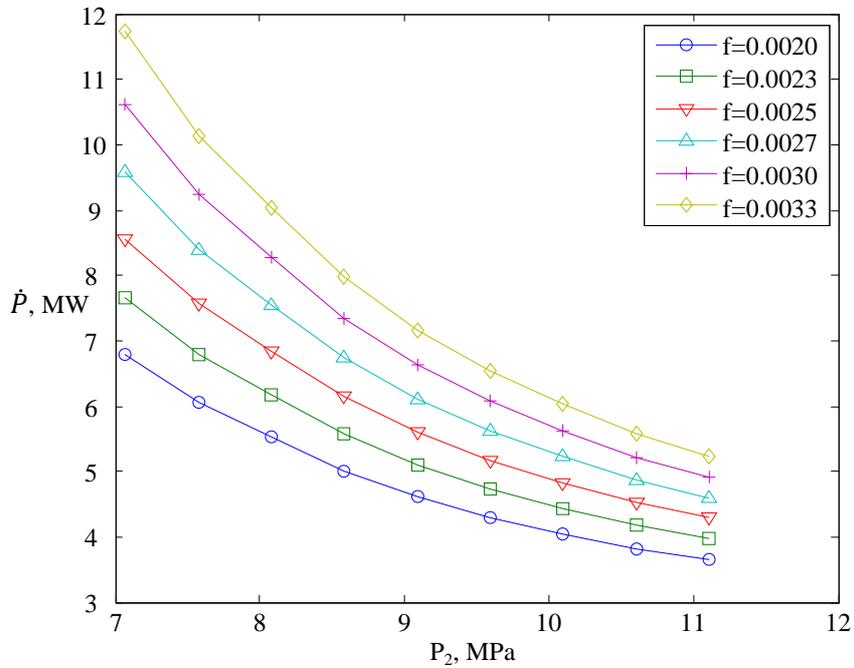


Fig.32 : Puissance compresseur 44" profil 2

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

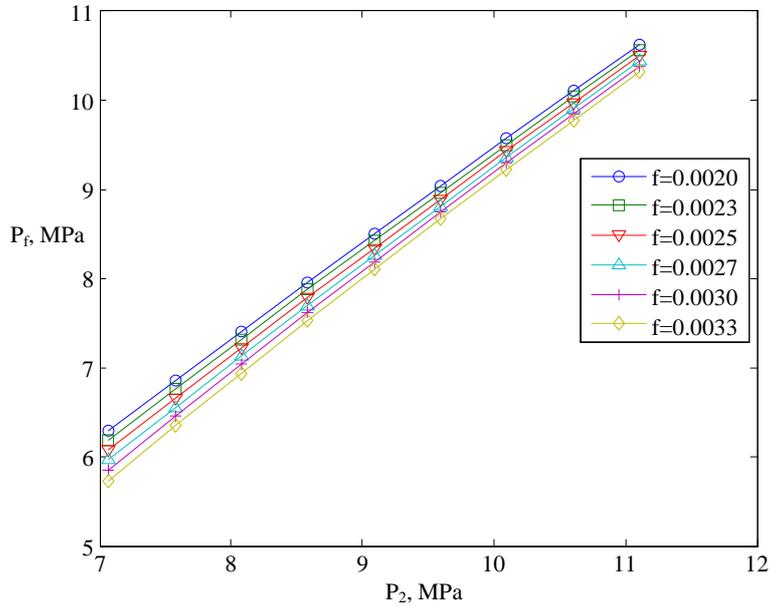


Fig.32 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 44'' profil 2

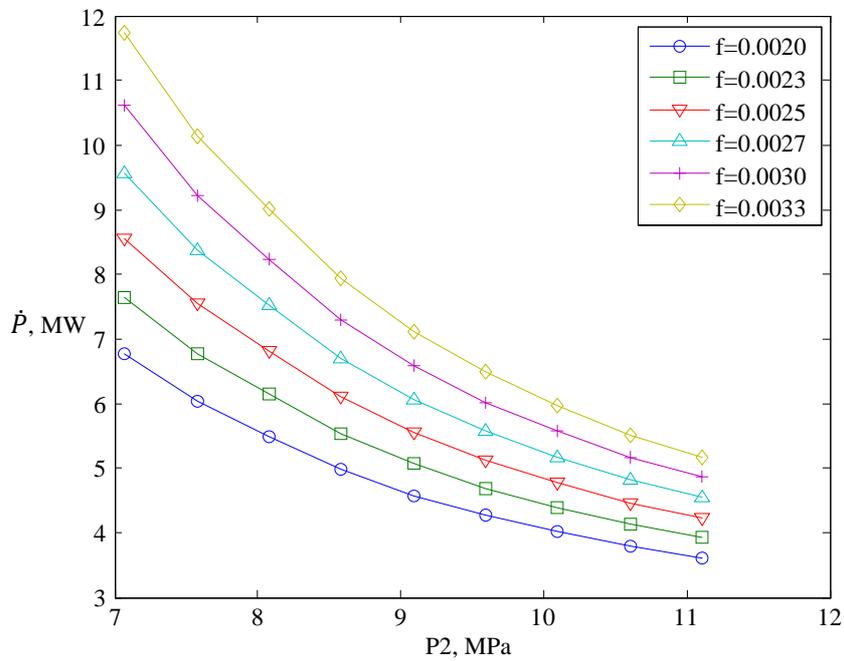


Fig.34 : Puissance compresseur 44"profil 3

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

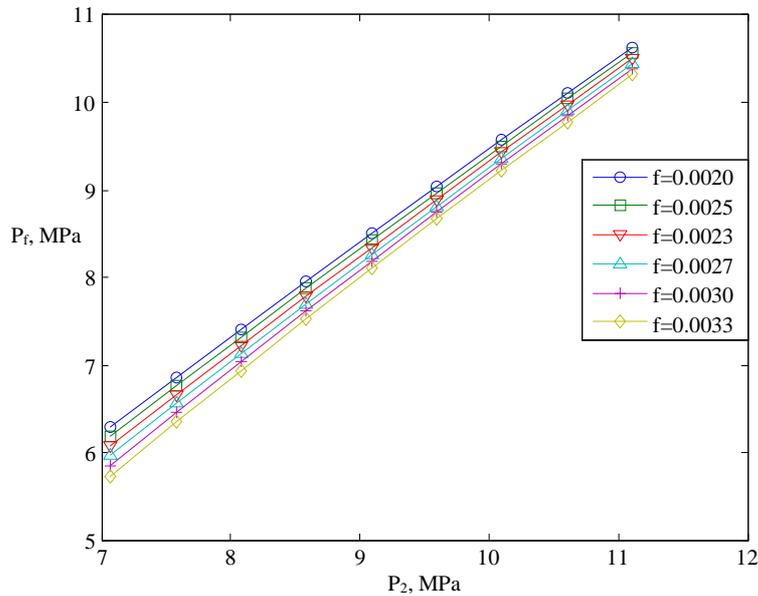


Fig.35 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe 44'' profil3

IV.5 : Application aux gazoducs algériens

Les caractéristiques des gazoducs algériens GZ3, GK1 sont données en Annexe A.

IV.5.1 : Gazoduc GZ3, diamètre 42 pouces

Les résultats sont donnés par les figures de 36 à 41 ci-dessous. Les puissances minima et maxima correspondant respectivement aux coefficients de frottement 0,0020 et 0,0033, pour une pression d'entrée gazoduc de 11,11 MPa pour les 3 profils de vitesse, sont de 6.00, 6.08, 5.99 MW et 10.05, 10.08, 10.04 MW pour le diamètre de 42 pouces. Les pressions de sortie correspondantes qui sont les même pour les 3 profils sont de 10.27 et 9.69 MPa, respectivement.

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

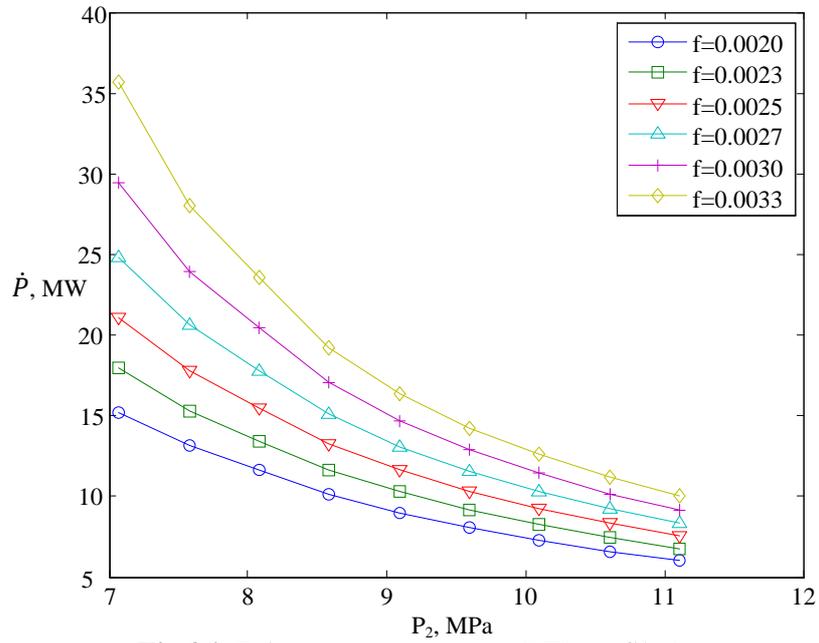


Fig.36: Puissance compresseur GZ3 profil 1

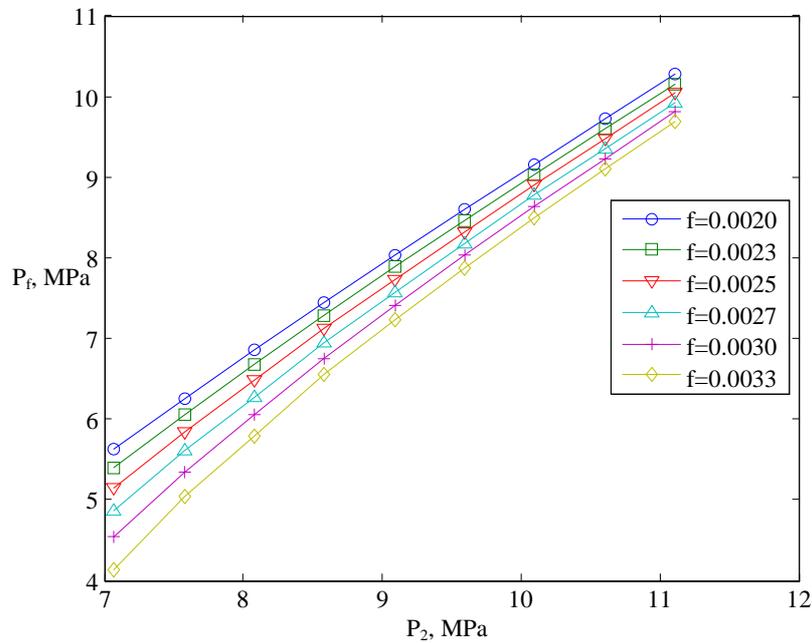


Fig.37 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe GZ3 profil 1

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

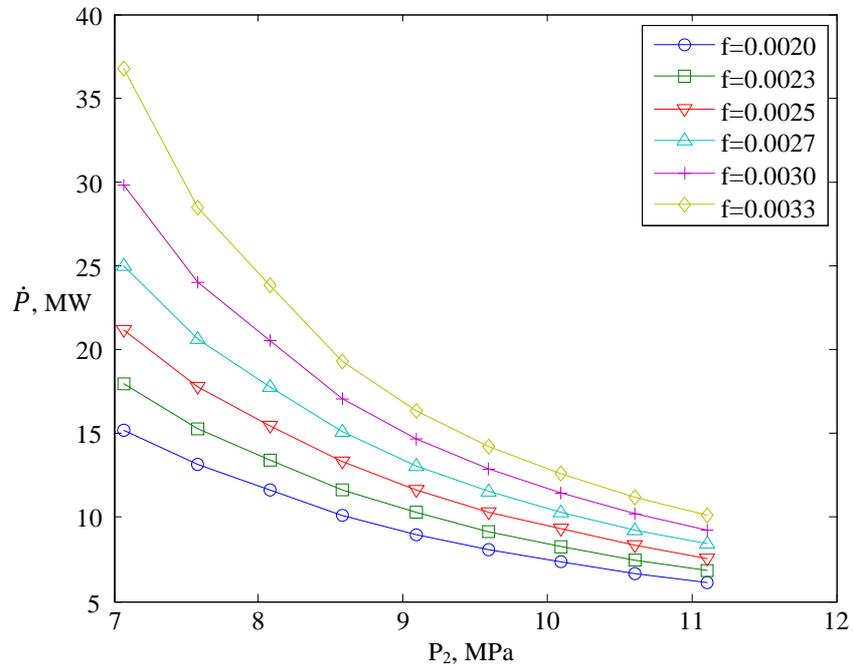


Fig.38 : Puissance compresseur GZ3 profil 2

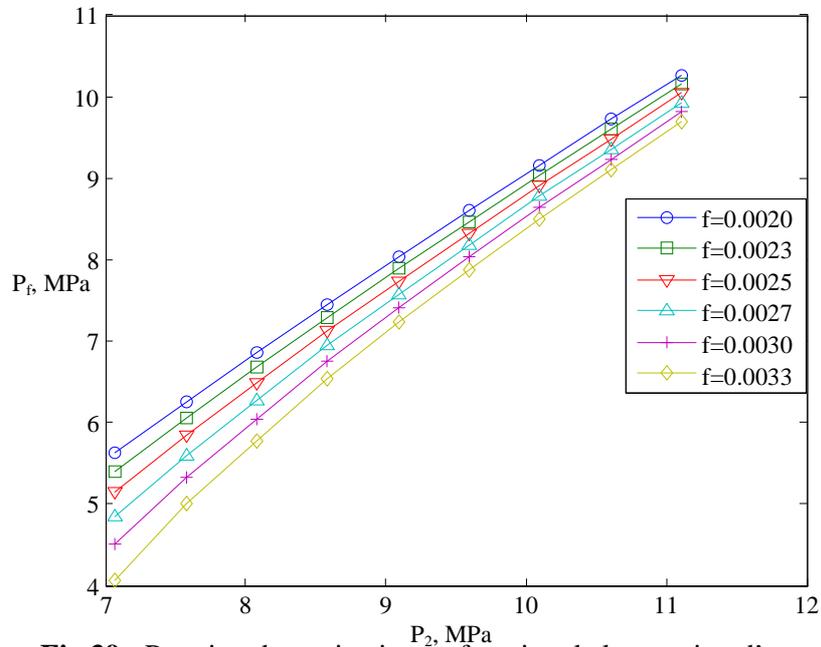


Fig.39 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe GZ3 profil 2

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

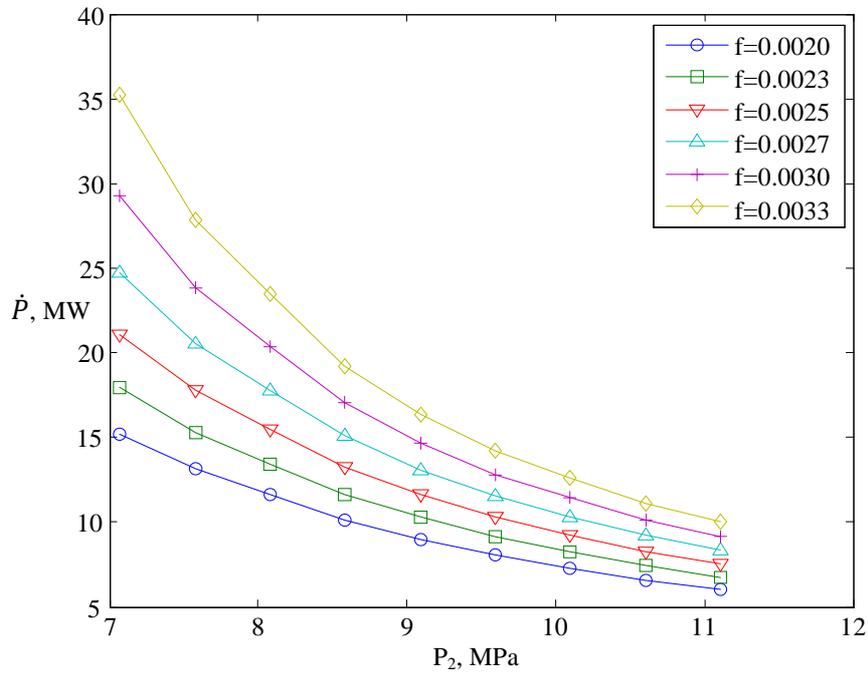


Fig.40 : Puissance compresseur GZ3 profil 3

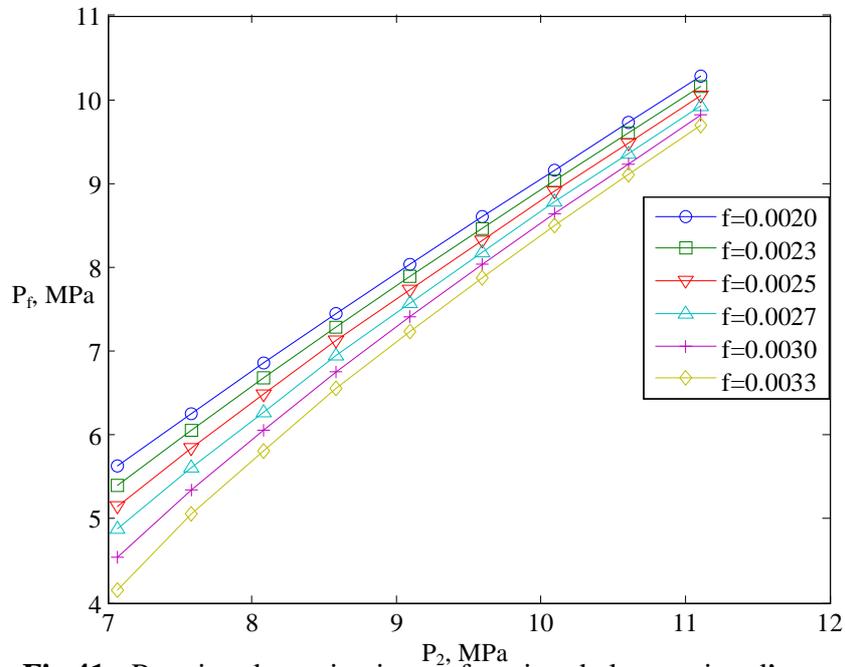


Fig.41 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe GZ3 profil 3

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

En comparant avec le cas précédent du 42'', on remarque que pour le même diamètre mais un débit différent (15,6 milliards de NM³/an, soit 15% de plus) les puissances doublent alors que les pressions d'arrivée diminuent (à comparer avec 10.21 et 9.69 MPa).

IV.5.2 : Gazoduc GK1, diamètre 40 pouces

Les résultats sont donnés par les figures de 42 à 47 ci-dessous. Les puissances minima et maxima correspondant respectivement aux coefficients de frottement 0,0020 et 0,0033, pour une pression d'entrée gazoduc de 11,11 MPa pour les 3 profils de vitesse, sont de 5.60, 5.69, 5.61 MW et 8.86, 8.93, 8.83 MW pour le diamètre de 42 pouces. Les pressions de sortie correspondantes qui sont les même pour les 3 profils sont de 10.21 et 9.60 MPa, respectivement.

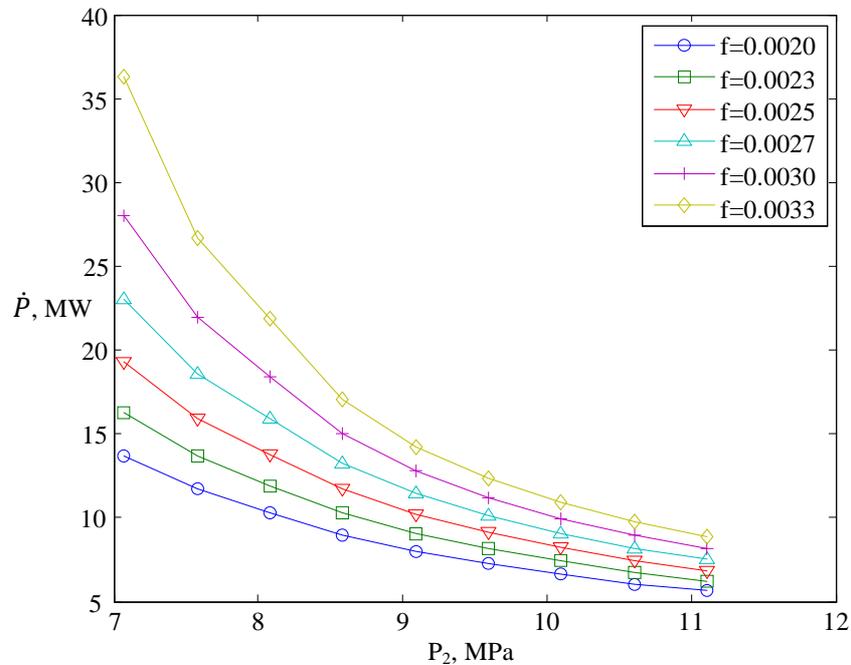


Fig.42 : Puissance compresseur GK1 profile 1

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

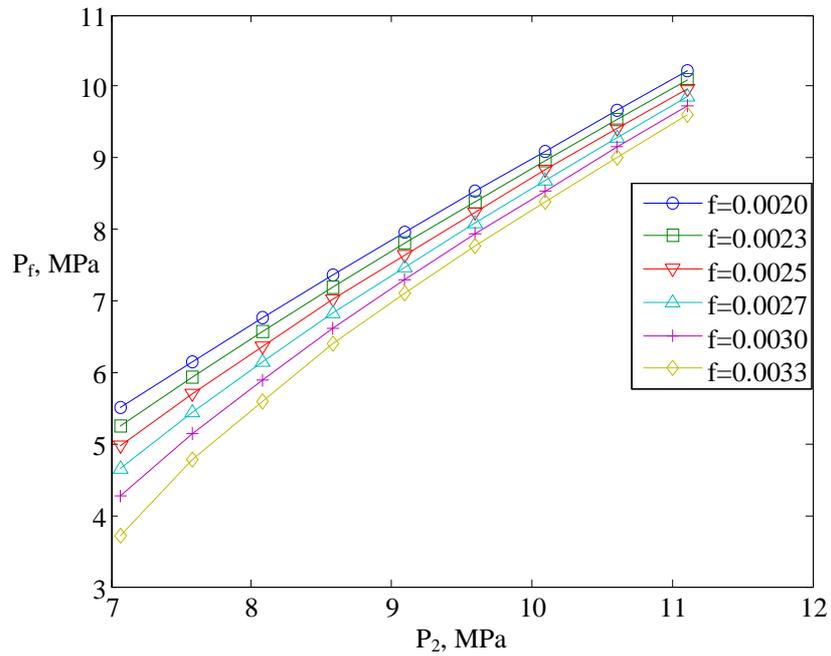


Fig.43 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre GK1 profil1

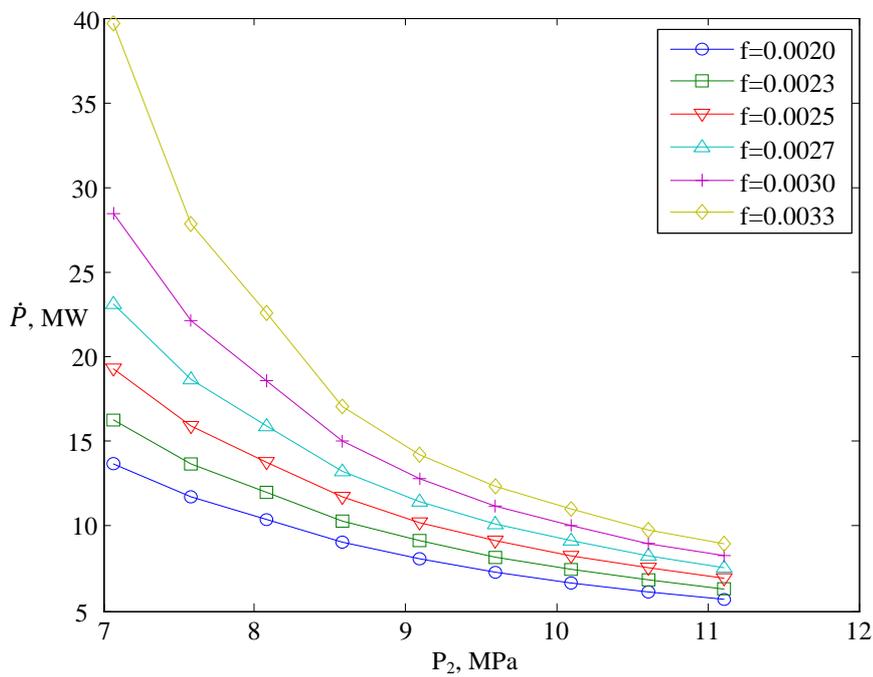


Fig.44 : Puissance compresseur GK1 profile 2

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

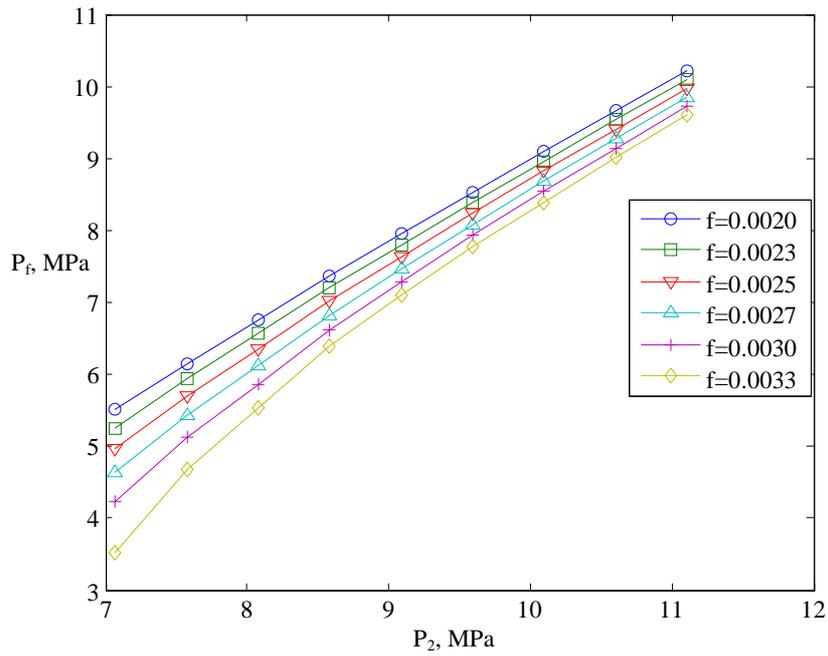


Fig.45 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe GK1 profil 2

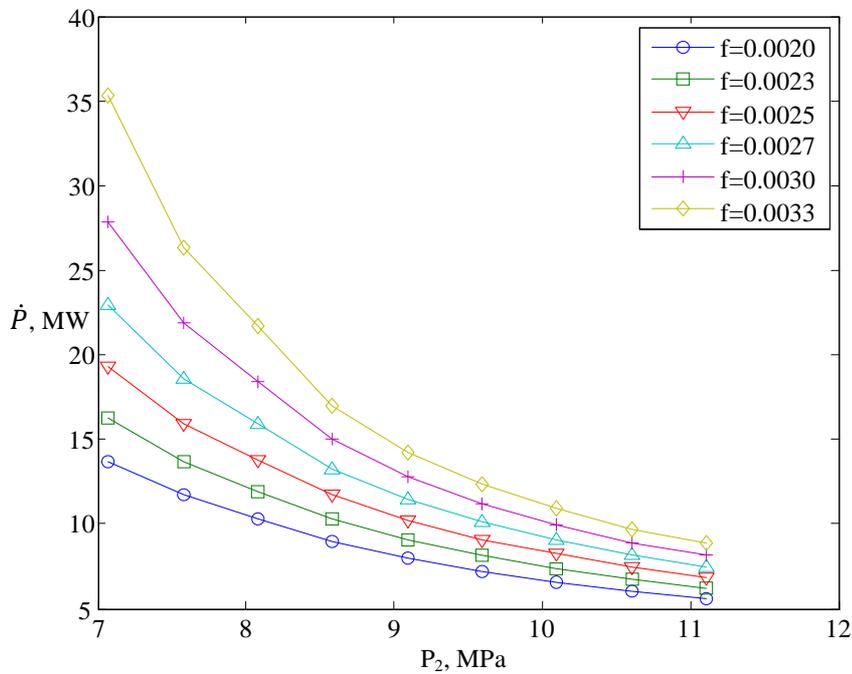


Fig.46 : Puissance compresseur GK1 profile 3

Modélisation et performances d'un gazoduc algérien évaluées avec l'équation de SOAVE-REDLICH-KWONG

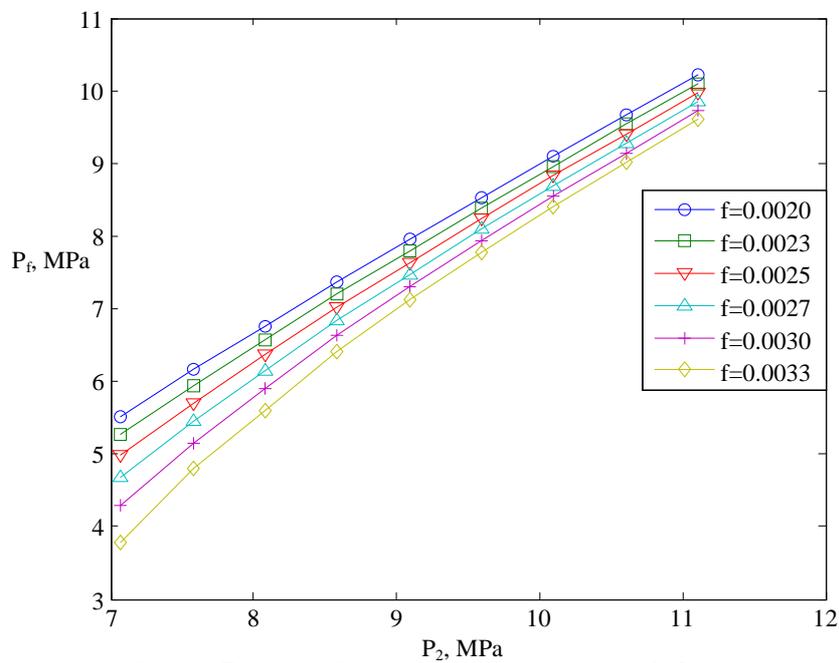


Fig.47 : Pression de sortie pipe en fonction de la pression d'entre pipe GK1 profil 3

En comparant ces résultats avec ceux du cas précédent de 40'', on remarque pour que pour les mêmes débits et diamètre interne, des tronçons de gazoduc plus longs de 15 kms (environ 12%) les puissances minima et maxima augmentent, alors que les pressions d'arrivée diminuent d'avantage.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail est présenté comme contribution à l'étude de transport de gaz naturel par gazoduc avec une équation d'état analytique, en l'occurrence celle de Redlich-Kwong-Soave, pour évaluer les états thermodynamiques du gaz considéré comme substance compressible simple, qui sont donc fonction de deux variables indépendantes. Cette équation d'état cependant comporte en plus un paramètre déterminé par un facteur acentrique. Cette équation d'état s'ajoute aux équations de mouvement, de continuité et de l'énergie pour déterminer les quatre variables de l'écoulement considéré comme unidimensionnel mais avec frottement et transfert thermique vers le sol. Ces variables sont le volume spécifique, la pression, la température et la vitesse.

Les calculs sont réalisés, de façon itérative jusqu'à convergence, selon le formalisme des valeurs d'état, indépendantes des chemins des transformations mises en œuvre, et avec un algorithme itératif de Newton-Raphson, programmé en langage MATLAB. Les équations du mouvement et de l'énergie sont intégrées sur la longueur du tronçon de gazoduc de 100 kms, en utilisant des schémas de distributions pour la vitesse et la température, paramétrées de façon à respecter les valeurs limites et à assurer la convergence globale.

Le schéma de calcul est stable et converge rapidement. Les résultats obtenus pour plusieurs diamètres de conduites et plusieurs valeurs du coefficient de frottement sont cohérents et consistants avec les quelques données disponibles dans la littérature, et d'après les caractéristiques des gazoducs algériens avec différents débits massiques (13,5 et 15,6 milliards de NM^3/an) et diamètres de conduites, 40, 42 et 44 pouces.

Cette procédure analytique est une contribution originale au calcul des écoulements compressibles unidimensionnels et généralisés ; elle est développée de façon rigoureuse, et susceptible d'être étayée par des données d'ouvrages de gazoducs concrets pour en généraliser l'utilisation du concept des distributions paramétrées de la vitesse et de la température avec une autre équation d'état similaire, celle de Peng-Robinson, éventuellement dans la cadre d'un doctorat.

Annexe

Annexe. A composition et fiche technique des gazoducs :

Compositions du gaz naturel

Composition vol. moyenne		Algérie	Cp (kJ/kg.K)	Cv (kJ/kg.K)	M (kg/mol)	P _c (MPa)	T _c (°k)	ω
		%						
Méthane	CH4	89	2.254	1.736	16	4.61	190.6	0.012
Ethane	C2H6	8.31	1.778	1.491	30	4.88	305.5	0.100
Propane	C3H8	1.32	1.703	1.498	44	4.26	370.0	0.152
Butane	C4H10	0.47	1.694	1.534	56	3.80	425.2	0.038
Pentane	C5H12	0.01	1.664	1.549	72	7.38	304.2	0.224
Azote	N2	0.89	1.040	0.742	28	3.39	126.2	0.200

Fiche technique gazoducs algérien

Gazoducs	GZ0	GZ1	GZ2	GZ3	GK1
De Hassi R'Mel	Hassi R'mel Arzew	Hassi R'mel Bethioua	Hassi R'mel Bethioua	Hassi R'mel Arzew	Hassi R'mel Skikda
Diamètre en pouce	24/20	40	40	42	40
Longueur Km	509	507	511	512	573
Nb de stations de compression	4	5	5	5	5
Nb de totale machines dans la ligne	9	20	15	20	20
Puissance installé MW	45.10	29.10	21.710	29.10	21.710
Capacité 10 ⁹ m ³ /an	2.8	13.5	13.5	15.6	13.5
Année de mise en service	1961	1976/1979	1982	1989	1971/1978

Annexe. B Programme de calcul:

```
clear all
clc
%programme pour le calcul de la consommation du gaz naturel dans un
gazoduc
%introduction des paramètre debit,cp,cv,R,L,d,Ts,P2
m=353.98;
cp=2.254;
cv=1.736;
R=8.314;
eta=0.85;
d=1.0668;
L=1e5;
Ts=288;
A=pi*d^2/4;
P2=70*101e3;
Pe=P2/1.5;
mu=0.129e-4;
re=m*d/(A*mu);
kgaz=0.0332;
pr=mu*cp*1000/kgaz;
f=0.013/4;
h=f*(m*cp*1000/(8*A*pr^(2/3)));
r=d/2;
r1=r+20e-3;
r2=r1+5e-3;
Ut=(r/h+(r1)*log((r1)/r)/16.5+25e-3/2+r2*log(r2/r1)/0.17)^-1;
%calcul de la compression
P1=35*101e3;
T1=300;
v=7e-4;
eps10=1;
while eps10>=1e-7
v1=v-fv(v,T1,P1)/fv1(v,T1);
eps10=v1-v;
v=v1;
end
for k=1:1:2
%calcul vx
Px=100000;
v=22.4e-3;
eps10=1;
while eps10>=1e-7
vx=v-fv(v,T1,Px)/fv1(v,T1);
eps10=vx-v;
v=vx;
end
%calcul de la température et volume isentropique T2s,v2s
eps2=1000;
T2s=300;
N1=1000;
while N1>0;
v2s=(T2s*R)/P2;
eps1=1;
while eps1>=1e-7
v2t=v2s-fv3(v1,v2s,vx,T1,T2s)/fv4(v2s,T2s);
eps1=v2t-v2s;
v2s=v2t;
end
eps2=(P2-soave(T2s,v2s));
if eps2<=1e4
break
end
end
```

```

        elseif soave(T2s,v2s)>P2
            error('Solution diverges');
        end
        T2s=T2s+0.5;
        N1=N1-1;
    end
    if N1<=0
        erreure('pas de convergence')
    end
    vy=vx;
    %calculé du la puissance isentropique
    yx=1/bsoave*(asoave(T1)-
    T1*asoavep(T1))*log(vx*(v1+bsoave)/(v1*(vx+bsoave)));
    yy=1/bsoave*(asoave(T2s)-
    T2s*asoavep(T2s))*log(v2s*(vy+bsoave)/(vy*(v2s+bsoave)));
    dhs=m*(cv*(T2s-T1))+m/16*((P2*v2s-P1*v1)+yx+yy);
    %calculé de la puissance réel
    dh(k)=dhs/eta;
    %calculé de T2,v2
    T2(k)=(T2s+((1/eta-1)*dhs/(m*cp)));
    eps = 1;
    v2(k)=v2s;
    while eps>=1e-7
        ve = v2(k)-fv(v2(k),T2(k),P2)/fv1(v2(k),T2(k));
        eps=ve-v2(k);
        v2(k)=ve;
    end
    ro2=16e-3/v2(k);
    u2(k)=m/(ro2*A);
    % calculé des perte dans le pipe
    % calculé du volume vf
    Pf(k)=Pe;
    Tf(k)=Ts+3;
    v=Tf(k)*R/Pf(k);
    for i=1:1:1000
        N=100;
        eps = 1.e-8;
        while (N>0)
            ve = v-0.1*fv(v,Tf(k),Pf(k))/fv1(v,Tf(k));
            if abs(ve-v)<eps
                vf(k)=ve;iter=N-1;
            break;
        end;
        if abs(fv(ve,Tf(k),Pf(k)))>P2
            disp(['iterations = ',num2str(iter)]);
            error('Solution diverges');
        end;
        N = N - 1;
        v = ve;
    end;
    if N<=0
        erreure('pas de convergence')
    end
    % calculé de la vitesse uf
    rof=16/(1000*vf(k));
    uf(k)=m/(A*rof);
    ut=u2(k)*1.9;
    u(1)=u2(k);
    x(1)=0;
    T(1)=T2(k);
    y=11;
    for j=1:1:100
        x(j+1)=x(j)+1000;
        T(j+1)=Ts+exp(-y*x(j+1)/L)*(T2(k)-Ts);
    end

```

```

        u(j+1)=(u2(k)^(0.5)+x(j+1)/L*(uf(k)^(0.5)-u2(k)^(0.5)))^2;
    end
    % calcule de Tf
    Tf(k)=T2(k)-(pi*d*Ut*L*(T2(k)-Ts)*(1-exp(-y))/(y*m*cp*1000))-(uf(k)^2-
u2(k)^2)/(2*cp*1000);
    % calcule de Pf
    Pf(k)=P2-m*(uf(k)-u2(k))/A-2*m*f/(A*d)*(L/2*(uf(k)+u2(k)));
    epsn=abs(soave(Tf(k),vf(k))-Pf(k));
    if Pf<=0
        erreure('P2 non convenable')
    end
end
end
P1=Pf(k);
T1=Tf(k);
v1=vf(k);
Pe=Pf(k);
End

```

Fonction a(T) paramètre de SRK

```

function [y]=asoave(T)
% composition est caractéristique thermodynamique du gaz naturel
x=[0.89,0.0831,0.0831,0.0132,0.0047,0.0001,0.0089];
Tc=[190.6,305.5,370,425.1,304.2,126.2];
Pc=[46.1,48.72,42.6,34,73.83,37.96];
om=[0.012,0.1,0.152,0.038,0.224,0.2];
% asoave(T) calcule de la fonction de soave
y1=0;
for i=1:1:6;
    m(i)=0.48+1.574*om(i)-0.176*om(i)^2;
    alpha(i)=(1+m(i)*(1-(T^0.5/Tc(i)^0.5)))^2;
    ac(i)=0.42748*alpha(i)*(8.314*Tc(i))^2/(Pc(i)*101e3);
    y1=y1+(ac(i)^0.5*x(i))^2;
end
y=y1;
end

```

Fonction b paramètre de SRK

```

function [y ] =bsoave(~)
% composition est caractéristique thermodynamique du gaz naturel
x=[0.89,0.0831,0.0831,0.0132,0.0047,0.0001,0.0089];
Tc=[190.6,305.5,370,425.1,304.2,126.2];
Pc=[46.1,48.72,42.6,34,73.83,37.96];
y=0;
for i=1:1:6
    b(i)=0.08664*8.314*Tc(i)/(Pc(i)*101e3);
    y=y+b(i)*x(i);
end

```

Bibliographie

- [1] Dan Maxwell, Zhen Zhu “Natural gas prices, LNG transport costs, and the dynamics of LNG imports”, Elsevier Economic Energy, 2010
- [2] T.K. Ghosh and M.A. Prelas “Fundamentals and Non-Renewable Resources”, vol 1 chapitre 7, springer, édition 2009
- [3] Bilan Energétique National 2010, édition 2010
- [4] Manuel technique du champ de Hassi R'Mel
- [5] http://www.econostrum.info/Gaz-naturel-l-Algerie-va-augmenter-sa-production-de-30_a518.html
- [6] <http://www.eia.gov/cabs/Algeria/Full.html>
- [7] Houmeur Sana « Modélisation et optimisation de l’aval des chaînes de GNL Algériennes », thèse magistère économie d’énergie, Umbb mai 2009
- [8] Arthur J. Kidnay, et al “Fundamentals of Natural Gas Processing} Taylor and Francis Group 2006
- [9] Saeid Mokhatab, et al “handbook of natural gas transmission and processing” Elsevier, édition 2006
- [10] Ammar Chebouba, Abdelnacer Smati « Optimisation d’un pipeline de transport de gaz naturel par la programmation dynamique avec choix automatique des compresseurs » 1ères journées nationales sur le traitement, le stockage, le transport et la distribution des hydrocarbures, 19-23 octobre 2003
- [11] A. Chebouba, et al “Optimization of Natural Gas Pipeline Transportation using Ant Colony Optimization Algorithm” Computers & Operations Research 36 (2009) 1916 -- 1923
- [12] F. Tabkhi, et al « Optimisation de réseaux de transport de gaz naturel » SIMO 2006.11-12 octobre 2006 – Toulouse (France)
- [13] C.A. Dorao, M. Fernandino “Simulation of transients in natural gas pipelines” Journal of Natural Gas Science and Engineering 3, (2011) 349-355
- [14] http://www.medgaz.com/medgaz/pages/datos_significativos-fr.htm

- [15] http://www.mem-algeria.org/fr/hydrocarbures/2012/Carte_Gisement_Hydrocarbures_reseau_Transports_par_canalisation-0.jpg
- [16] <http://www.energie-algerie.com/energie-algerie/gazoduc>
- [17] Rapport annual 2010 Sonatrach TRC
- [18] Richard E. Sonntag et al “Fundamentals of thermodynamic”, Wiley, 6th edition 2003
- [19] Michel A. Saad “compressible fluid flow”, PRINTICE-HALL, 1985
- [20] John H. Lienhard & fils “A heat transfer textbook”, Phlogiston Press, 2003
- [21] Georges Heyen « Cour thermodynamique chimique applique » laboratoire d’analyse est synthèse université de liège, septembre 2002