

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université M'Hamed Bougara

Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de Master

Spécialité : Génie mécanique : transport et distribution des hydrocarbures.

Présenté par :

- LHADJ MOHAND Thanina
- KORDJIDJ Fatma-Zohra

THEME :

**CALCUL THERMO-HYDRAULIQUE ET ETUDE
DE STRESS DU GAZODUC GR5 SOUS CAESAR II**

Soutenance Publiquement le : .. /.. / ..

Devant le jury :

Président du jury :

Encadreur : Dr : YOUNSI Karim

Examineur :

Examineur :

Année Universitaire : 2016/2017

REMERCIEMENT

Nous tenons en premier lieu à remercier le bon Dieu de nous avoir donné le courage pour réussir dans notre cursus.

Au terme de ce modeste travail nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent mémoire en particulier :

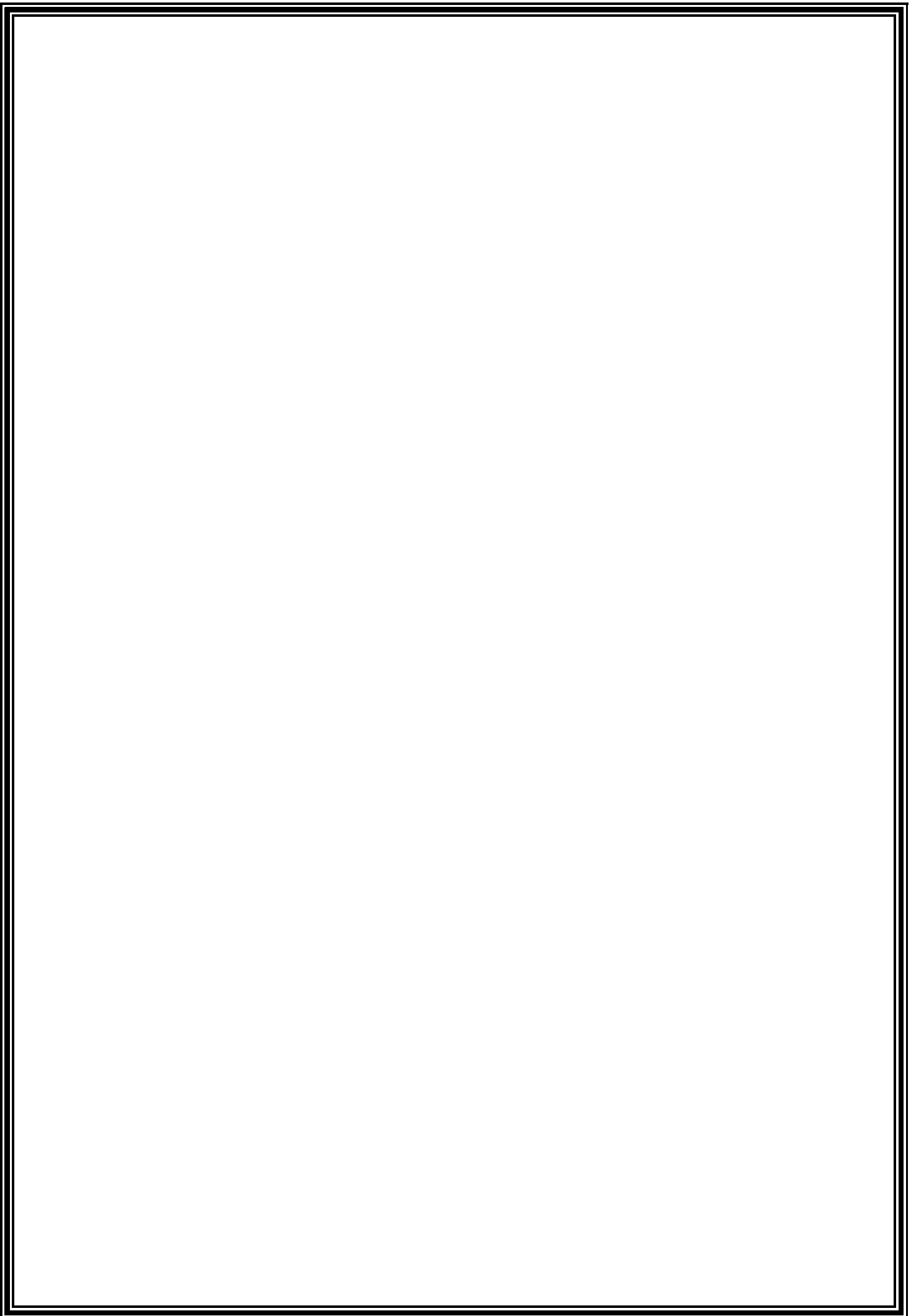
*Notre promoteur, le **Docteur YOUNI Karim**, pour m'avoir suivi de près tout au long de mon travail sa disponibilité, ses conseils, qu'il soit assuré de nos sincères reconnaissances et qu'il trouve dans ce travail notre témoignage respectueux.*

*Nous remercions également, **Mr MALKI .Y, M' HAMAI, Mr BADJI.k, M' IDIR .H, M^{me} MEDJERAB.A**, qui nous ont beaucoup aidé et bénéficié par leurs connaissances, leurs conseils et critiques durant notre préparation du mémoire de fin d'étude.*

*Nous remercions également le personnel du TRC, PEGAZ ET RTC pour leurs aides durant la période de stage et de nous avoir ménagé toutes leurs efforts et leurs savoir pour nous permettre une parfaite assimilation. En particulier **Mr LOUIBA, M' ATLAOUI.M, M' LAMRAOUI.S***


Nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'université de BOUMERDES en particulier ceux du département transport des hydrocarbures

Thanina et Fatma-Zohra



DÉDICACES

Je dédie ce mémoire à

- ❖ Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments, pour leurs patiences illimitées, leur encouragement continu, leur aide, en témoignage de mon Profond amour et respect pour leurs grands sacrifices
- ❖ Mon frère GHILES, qui, je souhaitais vraiment qu'il soit avec moi en ce jour un peu Spéciale, même si je sais que ton âme est toujours présent, 
- ❖ Mes grands-parents (JOSEF et MEZHOURA), mes oncles et tentes, mes cousins et mes cousines, Et mon petit frère LYES.
- ❖ Tous les membres du PETROLEUM CLUB
- ❖ Tous les membres du Club EUREKA
- ❖ Tous les membres de l'association algérienne de l'industrie du gaz AIG
- ❖ La famille AYC et surtout le groupe AYC-OURGLA
- ❖ Tous mes amis sans exceptions et Toutes les personnes que j'aime
- ❖ Moniteurs et joueurs de mon équipe de HAND-BALL
- ❖ Mon binôme avec qui j'ai partagé les moments difficiles de la réalisation de ce mémoire



THANINA

Dédicaces

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, pour m'avoir donné la force et la patience

Avec toute mon estime et mon amour, je vous dédie ce modeste travail

Aux deux plus chères personnes de ma vie que j'aime le plus au monde, mes parents

*A mon cher père : **MOHAMED**, d'avoir été toujours à mes côtés pour m'encourager, ton aide moral et affectif durent toutes les années de mes études, pour me voir atteindre ce but*

*A mon chère maman : **FATIHA**, pour ton amour, tes sacrifices illimités, J'espère un jour pouvoir t'apporter le bonheur que tu y as fait pour moi durent tout ma vie*

Pour cela et pour ce qui ne être dit, mes affections sans limite

*A mes très chères sœurs : **NONA, AMINA, HAYET, FAREIL***

*A mes adorables frères : **MOHAMED, ABD EL HADI***

*A mes cousines : **FATIHA, KHADIJA, NORHANE, SIRINE, LINA***

*Et spécialement a mes tantes **AHLEME, NAIMA***

*A mes chère Amies : **LAMIS, HIND, AISHA, MARIEME, THANINA, ILHAM, IKRAM***

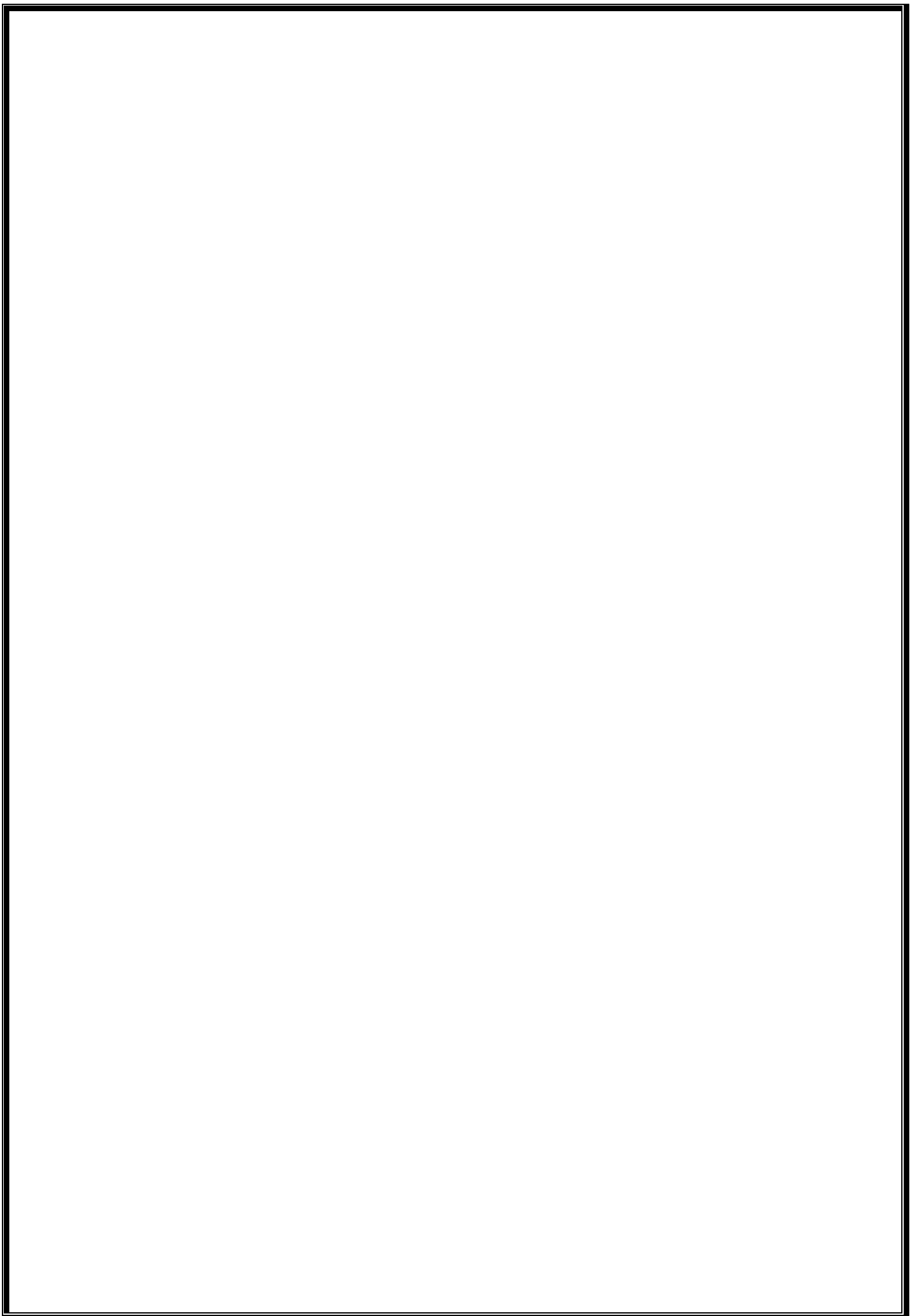
*Son oublier mes préférable amie : **KHALED, OUSSAMA, ABDOU, ISLAM, ZAHRO, HAYTME***

*A tous les membres de groupe **TRANSPORT***

Que la paix d'ALLAH soit avec tous.



Fatma-Zohra



SOMMAIRE

Introduction	1
Problématique :	2
L'objet de l'étude :	3

CHAPITRE 01 : Description du GAZODUC GR5

I.1. Description du système de transport canalisation GR5 :	4
I.2. Situation géographiques du STC GR5.....	5
I.3. Profil altimétrique du STC GR5 :	6
I.4. Caractéristiques du STC GR5 :	6
I.4.1. Les longueurs et diamètres nominales :	6
I.4.2. Les caractéristiques de l'acier de construction du STC GR5 :	6
I.4.3. Schéma Descriptif du STC-GR5 en phase I :	7
I.4.4. Schéma Descriptif du STC-GR5 en phase II :	7
I.4.5. Le facteur de marche :	7
I.4.6. Le débit horaire tout au long des tronçons :	8
I.4.7. Les Pressions de services :	8
I.4.8. La localisation Géographique des postes de sectionnement :	8
I.4.9. La localisation géographique des postes de coupure :	10
I.4.10. Caractéristiques des Points d'Injections de gaz :	10
I.5. Les stations de compression :	11
I.5.1. Caractéristiques d'exploitation des deux stations de compressions en phaseII :	11

CHAPITRE II : Étude Thermo-Hydraulique

II.1. Introduction :	12
II.2. Les propriétés physico-chimiques du gaz naturel :	13
II.2.1. Fraction molaire :	13
II.2.2. La masse molaire moyenne :	13
II.2.3. La masse volumique :	13

II.2.4.	Le volume massique :.....	14
II.2.5.	La densité relative du gaz :.....	14
II.2.6.	Le pouvoir calorifique :.....	14
II.2.7.	Le pouvoir calorifique inférieure :	14
II.2.8.	Le pouvoir calorifique supérieure :	15
II.2.9.	La viscosité dynamique :.....	15
II.2.10.	La viscosité cinématique :	15
II.2.11.	L'indice de WOBBE :	15
II.2.12.	Le rapport de chaleur spécifique :	16
II.2.13.	Le coefficient de joule Thomson :.....	16
II.2.14.	La constante du gaz réel :	16
II.2.15.	Le Facteur de compressibilité Z :	17
II.3.	Calcul hydraulique :.....	20
II.3.1.	Principe de conservation des quantités de mouvement :	20
II.3.2.	Principe de conservation de la masse :	20
II.3.3.	Équation de continuité :.....	21
II.3.4.	L'équation d'état d'un gaz réel :	21
II.3.5.	Écoulement stationnaire :	21
II.4.	Répartition de la pression le long d'une conduite :.....	25
II.4.1.	La pression moyenne :.....	25
II.4.2.	Calcul du régime d'écoulement :	26
II.5.	Calcul thermique :	27
II.5.1.	Le coefficient global d'échange de chaleur (K) :.....	27
II.5.2.	Répartition de la température du gaz le long d'un gazoduc Sans considération de l'effet joule Thomson :	28
II.5.3.	Répartition de la température du gaz le long d'un gazoduc Avec considération de l'effet joule Thomson :	29
II.5.4.	La température moyenne :.....	30

II.5.5.	Influence de la température du sol :	30
II.6.	Organigramme de calcul.....	32
II.7.	Calcul des propriétés chimiques du gaz :	34
II.8.	Les propriétés chimiques du gaz étudié :.....	35
II.8.1.	Les résultats de calcul des paramètres physico-chimiques obtenus on utilisant les données des deux tableaux précédent sont :	35
II.8.2.	Les courbes de pression et de températures	36
II.9.	Calcul thermo-hydraulique via le logiciel PIPEPHASE :	37
II.9.1.	Description du logiciel :.....	37
II.9.2.	Les phases d'exploitation du STC GR5 :.....	38

chapitre III: methode de calcul et d'analyse de stress

III.1.	Introduction :	46
III.2.	L'objectif principal d'une analyse de stress :	46
III.3.	Les différents modes de sollicitation d'un système de tuyauterie :.....	47
III.3.1.	Charges soutenues (charges primaires) :.....	48
III.3.2.	Charges thermiques ou charges d'extension (secondaires) :	48
III.3.4.	Les efforts dynamiques :.....	48
III.4.	Différent mode de défaillances d'un système de tuyauterie :.....	49
III.4.1.	La Rupture statique :.....	49
III.4.2.	La rupture de fluage :	49
III.4.3.	Rupture due à l'instabilité du système :	50
III.4.4.	Rupture due à la fatigue :	50
III.4.5.	Rupture provoquée par la corrosion :.....	50
III.5.	La prévention des différentes sollicitations :.....	50
III.5.1.	Cas des charges primaire :	51
III.5.2.	Cas des charges secondaire :.....	51

III.5.3.	Cas des charges occasionnelles :.....	51
III.5.4.	Cas des sollicitations dynamique :.....	51
III.7.	Classification des contraintes :	52
III.7.1.	Classification suivant le mode d'action :	52
III.7.1	Classification suivant le mode d'action	52
III.7.3.	Contrainte secondaire (notion de cycle thermique) :	53
III.7.4.	Contrainte de pointe :.....	53
III.7.5.	Classification suivant la durée du chargement :.....	54
III.7.6.	Conditions de fonctionnement nominal :.....	54
III.7.7.	Conditions accidentelles :	55
III.8.	L'objectif de l'installation des supports sur le système de tuyauterie :.....	55
III.9.	La limitation des contraintes sur le système de tuyauterie :.....	55
III.9.1.	Les liaisons rigides :.....	56
III.9.2.	Liaison contre le séisme :.....	56
III.9.3.	Les Liaisons élastiques :	56
III.9.4.	Liaison à réaction constante :.....	56
III.10.	Les différents types de supports :	57
III.10.1.	Les supports permettant de réaliser les liaisons rigides :	57
III.10.2.	Les butées auto-blocables :	57
III.10.3.	Les dispositifs à liquide (l'huile) :.....	58
III.10.4.	Les dispositifs mécaniques :.....	58
III.10.4.2.	Les Rouleaux.....	58
III.10.5.	Les supports permettant de réaliser les liaisons élastiques :	58
III.10.6.	Les supports permettant de réaliser les liaisons à réaction constante :	59
III.10.7.	Les compensateurs de dilatation :	59
III.11.	Répartition des contraintes	60
III.11.1.	Sollicitation de pression :	60

III.11.2.	Sollicitation de flexion :	60
III.11.3.	Sollicitation de torsion :	60
III.11.4.	Sollicitation de flexion et de torsion simultanée :	61
III.11.5.	Contrainte équivalente, critère élastique et plastique :	61
III.12.	Approche analytique d'Analyse de stress sur les poutres simples :	64
III.12.1.	Cas d'une poutre reposant sur une fondation élastique :	65
III.12.2.	Cas d'une force concentré appliqué sur une poutre de longueur infinie :	65
III.12.3.	Cas d'une force concentrée avec réaction répartie :	68
III.12.4.	Construction d'une rigidité finie d'une longueur limites :	70
III.13.	Analyse de stress d'un réseau de tuyauterie :	75
III.13.1.	Vérification des contraintes primaires :	75
III.13.2.	Vérification de la contrainte secondaire	77
III.13.3.	Verification de la somme des contraintes primaires plus secondaire...	77
III.13.4.	Verification des contraintes a chaud dans le domaine de fluage.....	78
III.13.5.	verification des contraintes dues a un mouvements unique non répété.....	78
III.14.	la methode analytique de calcul de stress.....	78
III.14.1	Le module de reaction horizontal du sol.....	80
III.14.2.	Contrainte transversal de la paroi due a la flexion.....	80
III.14.3.	Contraintes globale.....	82
III.15.	Description du logiciel CEASAR II.....	83
III.16.	Formule de calcul concidéé par logiciel CAESAR II.....	84
III.17.	Exemple de calcul permettant l'analyse analytique du stress d'un troncon.....	87
III.18.	l'analyse de stress sous logiciel CAESARII.....	90
III.18.1.	Scenario de simulation des combonaison des charges.....	90
III.18.2.	codes et normes suivi.....	90

III.18.3.	étape de réalisation du schéma sous CAESAR II.....	91
III.18.4.	représentation du schéma du système sous logiciel CAESAR II.....	92
III.18.5.	resultats de la simulation.....	92
CONCLUSION.....		93

chapitre IV: Etude de stress du gazoduc GR5 sous caesar II

IV.1.	Introduction :.....	94
IV.2.	Calcul et analyse de stress sur le poste de sectionnement N°02 :.....	94
IV.2.1.	Le rôle d'un poste de sectionnement :	94
IV.2.2.	Schéma du post de sectionnement N°02 :.....	95
IV.2.3.	Conditions de site :.....	96
IV.2.4.	Scenarios de simulation :	96
IV.2.5.	Codes, normes et standards suivi :.....	96
IV.2.6.	Axes de coordonnées :	97
IV.2.7.	Représentation du poste de sectionnement sous le logiciel CAESARII :...	97
IV.2.8.	Contraintes maximales calculées :.....	98
IV.2.1.	Analyse des contraintes :	98
IV.2.2.	Résultat de Simulation pour différents cas de chargements :	99
IV.3.	Calcul et analyse de stress sur le poste de coupure N°02 :	100
IV.3.1.	Rôle principale d'un Poste de coupure :	100
IV.3.2.	Codes, normes et standards :.....	100
IV.3.3.	Conditions de site :.....	100
IV.3.4.	Scenarios de simulation pour les différents cas de chargement :.....	100
IV.3.5.	Schéma du poste de Coupure N°02 :	101
IV.3.6.	Représentation du poste de coupure N°02 sous logiciel CAESAR II	102
IV.3.7.	Contraintes maximales calculées	102
IV.3.8.	Analyses des contraintes :.....	103

IV.3.9.	Résultat de la simulation pour les différents cas de chargement du PCN°02 :	103
	Le résultat des Forces et moments :	104
IV.3.10.	Interprétation du résultat :	104
IV.4.	Vérification des brides :	105
IV.4.1.	Généralités sur les brides :	105
IV.4.2.	Calcul de la pression équivalente sur la bride la plus contrainte :	107
	Conclusion.....	107

Liste des figures

Numéro	Intitulé	Page
Figure (I. 1)	le tracé du STC GR5	5
Figure (I. 2)	Profil Altimétrique du STC GR5	6
Figure (I. 3)	STC GR5 en phase I	7
Figure (I, 4)	le STC GR5 en phase II	7
Figure (II. 1)	Détermination du facteur de compressibilité	18
Figure (II. 2)	la distribution de pression le long du STC GR5	36
Figure (II. 3)	La distribution de température le long du STC GR5	36
Figure (III.1)	poutre reposant sur une fondation	65
Figure (III. 2)	force concentré sur une poutre de longue infinie	66
Figure (III. 3)	une force concentrée avec réaction repartie	68
Figure (III. 4)	poutre d'une rigidité finie d'une longueur limites	70
Figure (IV.1)	schéma de PSN°2	95
Figure (IV.2)	schéma de PCN°2	101
Figure (IV.3)	Schéma d'un joint	106

Liste des tableaux

Numéro	Intitulé	Page
Tableau (I. 1)	longueurs, diamètres et épaisseurs pour chaque zone	6
Tableau (I. 2)	caractéristiques de l'acier	6
Tableau (I. 3)	les debits de fonctionnemnt	8
Tableau (I.4)	Localisation des postes de sectionnements	9
Tableau (I. 5)	localisation des postes de coupures	10
Tableau (I. 6)	points kilométriques et diametres des point d'injection	10
Tableau (I. 7)	données d'exploitation des deux stations de compression	11
Tableau (II. 1)	la composition du Gaz des différents champs	34
Tableau (II. 2)	les propriétés chimiques du gaz	35
Tableau (II. 3)	les résultats de calcul sous EXEL	35
Tableau (IV-1)	Les contraintes maximales pour chaque cas de chargement	98
Tableau (IV-2)	Les contraintes maximales pour chaque cas de chargement	98

Liste des tableaux

Tableau (IV-3)	Les déplacements obtenus lors des essais hydrostatiques sur PS	99
Tableau (IV-4)	Les forces et les moments obtenus lors des essais hydrostatiques sur PS	99
Tableau (IV-5)	Les contraintes maximales pour chaque cas de chargement	102
Tableau (IV-6)	Les contraintes maximales pour chaque cas de chargement	103
Tableau (IV-7)	Les déplacements obtenus lors des essais hydrostatiques sur PC	103
Tableau (IV-8)	Les forces et les moments obtenus lors des essais hydrostatiques sur PC	104

ABREVIATIONS

Alphabet latin :

A_s : Surface de tube

a_1 : Coefficient de transmission de chaleur à la paroi interne de la conduite par convection

a_2 : Coefficient de transmission de chaleur à la paroi externe de la conduite vers le sol par conduction

a : coefficient de CHOUKOV

a : surépaisseur(m)

C_p, C_v : Le rapport des chaleurs spécifiques à pression et volume constant

C : la vitesse du son dans le gaz (m/s)

D_{int} : Diamètre intérieure (m)

D_{ext} : Diamètre extérieure (m)

D : Rigidité cylindrique

D_m : Diamètre moyen

D_j : Le coefficient de Joule Thomson ($\frac{^{\circ}C}{bar}$)

E : Module d'élasticité longitudinal

e : L'épaisseur (m)

e_0 : L'épaisseur nominale (m)

e_{min} : L'épaisseur minimale (m)

e_n : L'épaisseur normalise (m)

f : Contrainte transversale due à la pression

F_a : Force de l'ancrage

f_f : Force axial

F : Contrainte admissible

I : Le moment d'inertie

i : Facteur d'intensification de contraint

H : Hauteur (m)

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

G : Diamètre affectif du joint (mm)

Q : Efforts tranchants

Q_s : La charge d'un tube

K : Le coefficient global d'échange de chaleur

K : Coefficient de ressort

K : Coefficient de la fondation(N/cm^3)

K_e : Rugosité

L_f : Longueur de frottement

L : Longueur (m)

M : La masse molaire moyenne $kg/kmol$

M : Débit massique kg/s

M_f : Moments de flexion

M_t : Moment de torsion

M_{fr} : Moment de flexion résultant

M_{FI} : Moment idéal de flexion

M_r : Moment résultant	R_e : Rayon extérieure(m)
M_{RB} : Moment résultant dû aux charges occasionnelles	R : La constante des gaz réel $\text{kJ}/\text{Kmol K}$
M_{RA} : Moment résultant dû aux charges permanentes	S : Section d'écoulement (m^2)
M_{RC} : Moment résultant au contraintes secondaires	S_s : Surface de la charge supérieure (m^2)
M_{RD} : Moment résultant engendré par un mouvement non répété	S_i : Surface de la charge inférieure (m^2)
M_i : Moment au point i	T : Température (K)
M_0 : Moment initial	T_i : Température initial (bar)
N_{tot} : Nombre total du mol	T_f : Température final (K)
P : Pression (bar)	T_a : Température ambiante (K)
P_i : Pression initial (bar)	T_x : Température au point x (K)
P_f : Pression final (bar)	T_c : Température critique (K)
P_x : Pression au point x (bar)	T_{pc} : Température pseudo critique (K)
p_c : Pression critique (bar)	T_{pr} : Température pseudo réduite (K)
P_{pc} : Pression pseudo critique (bar)	T_{moy} : Température moyenne (K)
P_{pr} : Pression pseudo réduit (bar)	T_{sr} : Température du sol réduite (K)
P_{moy} : Pression moyenne (bar)	V : la vitesse du fluide (m/s)
P_0 : La charge totale	V : Distance de la fibre neutre à la fibre la Plus éloignée
P : charge concentré	V : Volume (m^3)
P_t : Le poids du tube	w : vitesse d'écoulement (m/s)
P_f : Le poids du fluide	w : L'indice de Wobbe
q : Charge répartie	w_p : Point du tube
R_e : le nombre de Reynolds	Y : Fraction molaire
R : Résistance thermique $\text{kJ}/\text{kg k}$	Y : Déformation

Z: Le facteur de compressibilité

Z_{mc} : Le coefficient de compressibilité calculé

Z_m : Le coefficient de compressibilité estimé

Z : coefficient de joint longitudinal soudé

Alphabet grec

λ : Le coefficient de frottement

λ_m : Le coefficient de frottement moyen

σ : Contrainte

σ_{lp} : Contrainte longitudinale

σ_{tp} : Contrainte transversale

σ_{rp} : Contrainte radiale

σ_f : Contrainte normale

σ_l : Contrainte longitudinale de pression et de flexion

σ_t : Contrainte transversale de pression,

σ_c : Contrainte de compression

σ_{eq} : Contrainte équivalente

ρ : La masse volumique kg/m^3

ν : La viscosité cinématique (CSt) ou (m^2/s)

ν : Coefficient de poisson

ε : Allongement

θ : Le volume massique m^3/kg

Δ : La densité relative du gaz

ϕ : Angle de frottement interne du sol

μ : Coefficient (sol/tube)

δ : L'angle de rotation

τ : Contrainte de cisaillement

γ : Poids volumique.

θ : L'angle du tube.

δ : Epaisseur de la couche de transmission de chaleur

ε : La rugosité relative de la paroi

μ : La viscosité dynamique (Pa. s)

Autres :

GN : Gaz Naturel

ASME : American Society of Mechanical Engineers

ANSI : American National Standard Institute

STC : Système Transport par Canalisation

CNDG : Centre National Dispatching Gaz

TD : Terminal Départ

TA : Terminal Arrivée

SC : Station de Compression

HRM : HASSI R'MEL

PC : Poste de coupure

PS : Poste de sectionnement

PMS : Pression Maximal de Service

HYD : Hydraulique

OPE : Opérationnel

EXP : Expansion

Indice:

Δt : Écart de température

Δt : La variation du temps

ΔL : La variation de la longueur

Δ : Dilatation totale

PCS : Le pouvoir calorifique supérieur
(KJ/m³(N))

API : American petroleum international

CND : Contrôle Non Destructif

CO : l'oxyde de Carbone

SUS : Soutenue

OCC : Occasionnel

FAT : Fatigue

PCI : Le pouvoir calorifique inférieur
(KJ/m³(N))

CO : l'oxyde de Carbone

تلخيص

نضرا للمشاكل التي يواجهها قطاع نقل محروقات و المتمثلة في عدم قابلية نضام (الأنابيب و محطات ضغط) علي تحمل تأثيرا لحرارة و ضغط الخارجي بإضافة إلي الأحداث الخارجية (مثل الرياح) مما قد يتسبب في مشاكل عويصة من ناحية الإنتاج و تكاليف التصليح

لذلك قد تطرقني في بحثي هذا إلي تحليل و حساب الضغط و الجهد المطبق علي نضام النقل و التحقق من أن قيود الموجودة علي مستوي هذه الأخيرة تكون ضمنى مجال القيم المسموحة بها علي مستوي الانضمة الدولية لحماية العتاد و ذلك باستخدام برنامج CAESAR II

وجبي عليني في هذا سياق استخراج توزيع الحرارة و ضغط وذلك باستخدام برنامج EXCEL و تأكيد النتيجة عن طريق نضام PIPEPHASE بهدف إيجاد كل من الحرارة و ضغط علي مستوي طول الأنبوب

تكمن أهمية هذه الدراسة في تحقيق توازن الانضمة من ناحية الضغوطات التي تسببها كل من ظروف الخارجية محيطة بها

Résumé :

L'analyse de stress et le calcul de flexibilité sur le logiciel CAESARII a pour but d'évaluer les réponses structurale et les contraintes qui s'établissent dans les systèmes de tuyauteries suivant les codes et norme internationaux.

Une étude thermo-hydraulique a été réalisée sous Excel ensuite, confirmé sous logiciel PIPEPHASE afin de déterminer la variation de pression et de température le long de la ligne GR5, dans le but d'extraire les paramètres nécessaire à l'étude de stress.

le calcul de stress sous CAESARII a été appliqué sur le poste de sectionnement N°02 et le poste de coupure N°02 se situant sur la ligne GR5 afin de vérifier que les contraintes engendré n'ont pas atteint la limite admissible et que le dimensionnement et le choix des supports sont conforme au code et norme internationaux.

Abstract :

Stress analyses and flexibility control with the software Caesar II aim to evaluate structural response and piping system restraint while respecting international codes and standards.

A thermo-hydraulic study has been conducted with Excel then confirmed with PIPEPHASE to determine the pressure and the temperature variation along line GR5.

In this study, CESSAR software stress calculation has been applied on valve station number 2 and cutoff station number 2 of line GR5 in order to check that restraints generated has not been reached acceptable limits given by international standards.

Piping Component dimensioning and good choice of anchors can assure a sufficient flexibility that will absorb excessive stress.

Introduction

Le gaz naturel est longtemps resté un produit de second plan, parent pauvre du pétrole dont il accompagnait l'extraction. Au début de la production pétrolière, on le considérait même comme un produit nuisible, source d'éruption de puits et d'accidents. On s'en débarrassait en le brûlant à la torche. Il a donc dû, pour se développer, justifier de son intérêt économique, de ses qualités environnementales et de ses facilités d'utilisation, pour devenir le principal combustible utilisé.

Actuellement, Le gaz naturel est considéré l'énergie fossile la plus respectueuse de l'environnement, dont la valorisation est la plus récente dans l'histoire industrielle, celle dont les réserves sont abondantes et pour laquelle il existe de nombreuses technologies pouvant encore élargir le champ de sa production et de son acheminement.

De nos jours, il couvre une grande partie de la consommation énergétique dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Il occupe une place de plus en plus importante dans la satisfaction des besoins en énergie.

La mise à disposition du gaz, nécessite la construction de réseaux de gazoducs permettant d'acheminer le gaz depuis les zones de production jusqu'aux centres de consommation.

Les distances qui doivent être parcourues atteignent parfois plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres. Et les volumes qu'il peut transporter requièrent que les conduites aient des tailles de plus en plus importantes.

L'exploitation du gaz naturel s'est fortement développée en raison, d'une part, de la découverte des gisements importants, et d'autre part, des propriétés physique et chimiques du gaz et de sa composition (constitué essentiellement du méthane). Donc sa combustion est facile à réguler, elle ne génère pas d'oxyde de soufre et, produit par unité d'énergie, parmi tous les combustibles fossiles, la plus faible quantité de CO₂.

Il en résulte en général un combustible plus économique que les autres de même usage (sa combustion ne donne pas de résidus et n'encrasse pas les appareils d'utilisations, qui ont souvent un rendement thermique meilleur que ceux dont on se sert pour brûler d'autres

Combustibles). Par ailleurs, le gaz naturel est aussi une excellente matière première industrielle, notamment dans le domaine de la pétrochimie.

Problématique :

La forte demande et la consommation de gaz, comme combustible, ou comme matière première pour l'industrie pétrochimique, implique la construction et l'exploitation de réseaux de conduites pour le transporter depuis les gisements aux centres de consommation.

Les prévisions de production en relation avec l'ouverture du secteur des hydrocarbures aux compagnies internationales, la découverte de nouveaux gisements et l'optimisation des capacités de production des gisements existants, ont fait augmenter la production globale du Gaz Naturel de manière significative. Cette tendance sous-entend impérativement d'envisager une expansion de la chaîne gazière qui va assurer à moindre coût l'évacuation des quantités prévues de Gaz Naturel.

La prévoyance de production du gaz en Algérie ont fut apparaitre qu'il y'a une augmentation de la production du gaz naturel dans la région sud-ouest de HASSI R'MEL qui est due à la mise en production de nouveaux gisements.

Pour transférer ces nouvelles quantités jusqu'au CNDG / HASSI R' MEL, le STC GR5 a été mis en disposition afin de collecter la production du Gaz Naturel entre reggane et HASSI R'MEL. Une expansion est en cours de réalisation (STC GR7 qui est considéré comme looping du GR5 en phase II) afin de prendre en charge les volumes additionnels issus des gisements en développement.

L'objet de l'étude :

L'objectif principal de notre étude est le calcul de stress dans le système de tuyauterie GR5 sur le logiciel **CAESAR II**, afin de décider la mise en place des supports et des dispositifs de retenue du pipe pour éliminer les déplacements et rotations dus aux différentes charges d'exploitation et à la variation de température qui provoque la dilatation de l'acier.

Une analyse thermo-hydraulique est effectuée en premier lieu en utilisant le logiciel **PIPEPHASE**, dans le but d'avoir la distribution de la température et de la pression le long de la ligne, ainsi extraire les valeurs de ces deux paramètres dans les points sur lesquelles l'analyse de stress sera effectuée (poste de sectionnement et poste de coupure

Chapitre I

Description du Gazoduc GR5

I.1. Description du système de transport par canalisation GR5 :

Le Système de transport par canalisation (STC) GR5 est composé principalement d'un pipeline de 765 km en 48'' et d'un tronçon de cinq(05) kilomètres en 56''.

Ce gazoduc permet de collecter et acheminer les quantités de gaz naturel provenant du sud-ouest de HASSI R'MEL Depuis le terminal de départ (TD) qui se situe à RAGGANE jusqu'au centre national de dispatching gaz (CNDG).

Le STC GR5 est désigné avec une capacité de $8.52 \times 10^9 \text{Sm}^3/\text{an}$, et exploité en plusieurs phases qui dépendent des puits injecteurs sur la ligne au court du temps.

Une expansion de la ligne sur 545 km de long environ (GR7 qui est considéré un looping de GR5), et une station de compression à proximité de KHRECHBA sont en cours de réalisation.

Ce pipeline contient essentiellement les installations si après :

- Un terminal départ (TD) a REGGANE
- Un terminal arrivé (TA) a HASSI R'MEL
- Deux (02) stations de compressions
- Sept(07) postes de coupures
- Vingt-huit (28) postes de sectionnements
- Cinq (05) points d'injections
- Des postes de purges
- Un système de protection cathodique
- Un système SCADA / Telecom

I.2. Situation géographiques du STC GR5 :

Le STC GR5 prend origine du gisement situé à REGGANE (ADRAR) jusqu'à HASSI R'MEL (LAGHOUAT) en passant par la localité de KHRECHBA, wilaya de GHARDAIA, ce gazoduc longera le GR3 jusqu'au terminal arrivé situé à HASSI R'MEL sur une distance totale de 765 km.

Les deux extrémités du gazoduc GR5 sont illustrées sur la carte ci-dessous :

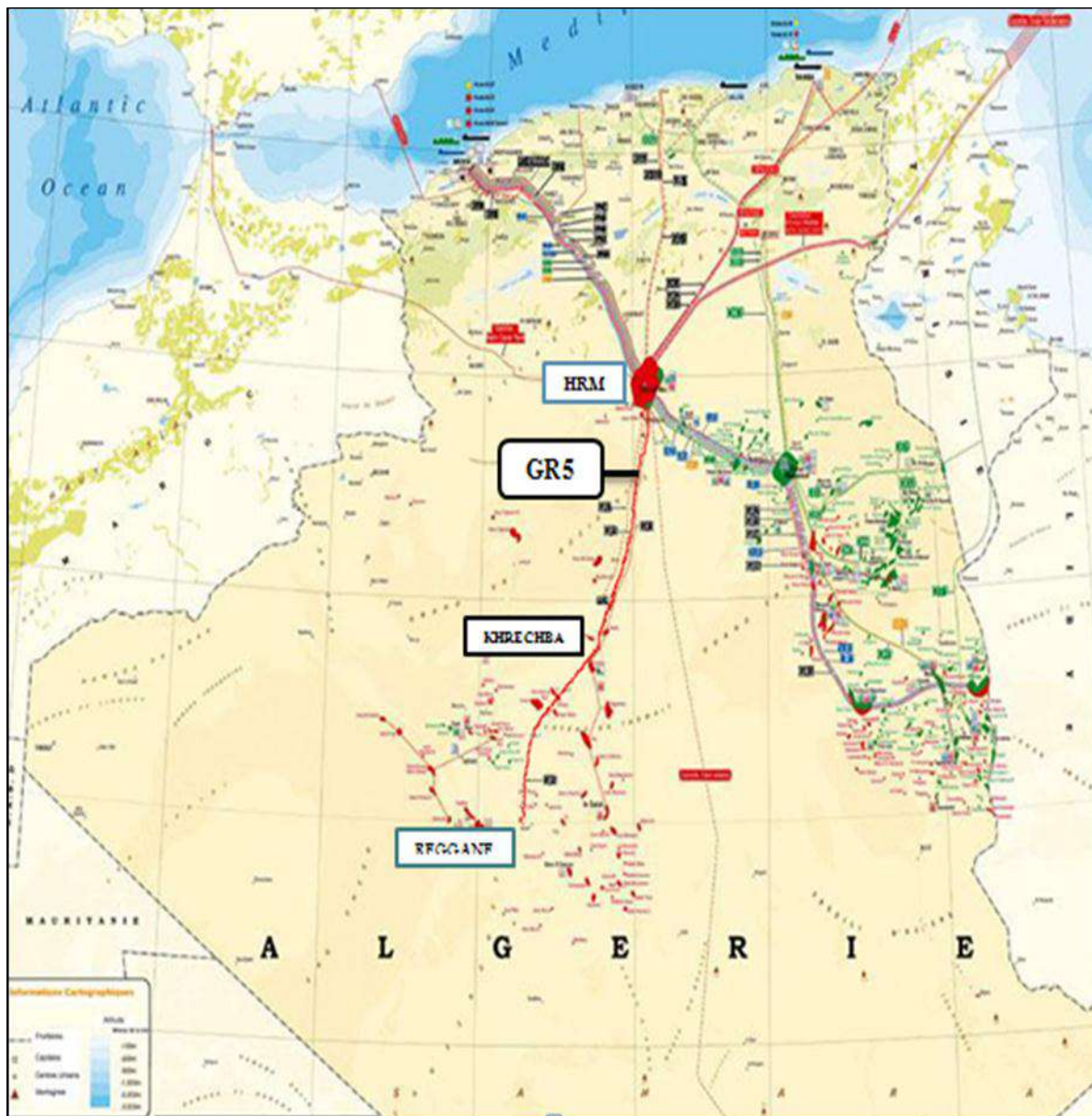


Figure I : 1-le tracé du STC GR5

I.3. Profil altimétrique du STC GR5 :

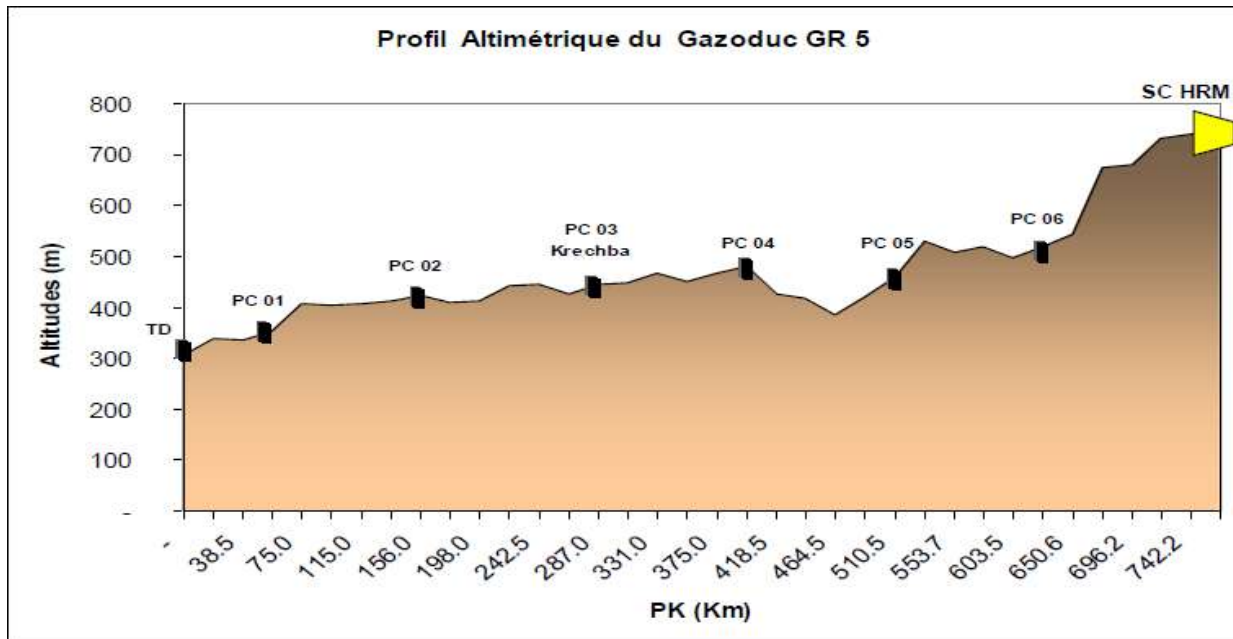


Figure I-2 : Profil Altimétrique du STC GR5

I.4. Caractéristiques du STC GR5 :

I.4.1. Les longueurs et diamètres nominales :

Tronçon	Diamètre	zones	Épaisseurs (mm)	Longueurs (m)	Longueurs total (m)
REGGANE-HRM	48''	Ia	22.22	62270.00	765000.00
		II	14.30	49410.00	
		III	12.95	653500.00	
HRM-CNDG	56''	Ia	25.40	5000.00	5000.00

Tableau I-1: longueurs, diamètres et épaisseurs pour chaque zone

I.4.2. Les caractéristiques de l'acier de construction du STC GR5 :

Nuances de l'acier (API 5L)	X70
Conductivité thermique de l'acier	27 kcal/h/m/°C
La rugosité du tube (mm)	0.015

Tableau I-2: caractéristiques de l'acier

I.4.3. Schéma Descriptif du STC-GR5 en phase I :

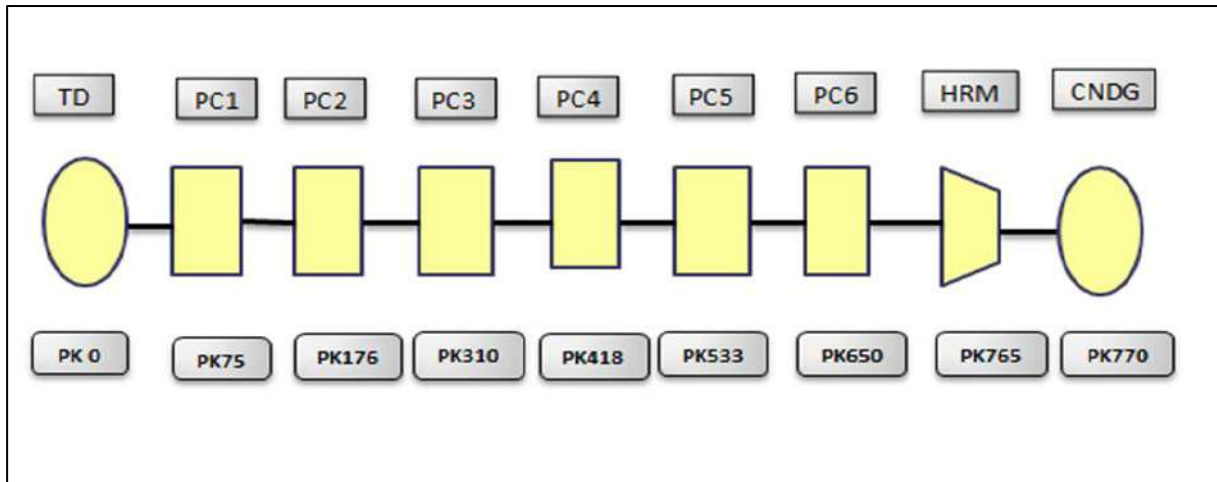


Figure I-3: STC GR5 en phase I

I.4.4. Schéma Descriptif du STC-GR5 en phase II :

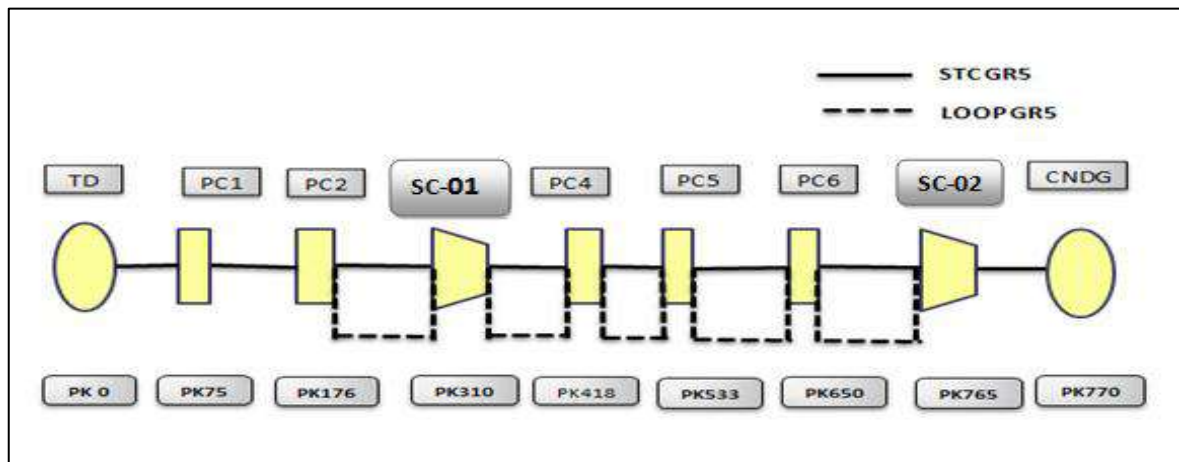


Figure I: 4 le STC GR5 en phase II

I.4.5. Le facteur de marche :

Le nombre de jours prévu pour l’exploitation de la conduite est de 330 jours, et le reste des jours de l’année est réserve pour la maintenance de la ligne .

I.4.6. Le débit horaire tout au long des tronçons :

Tronçon	Débit $10^6 \text{ Sm}^3/\text{h}$
PK0-PC01	1.6
PC01-PC02	2.4
PC02-PC03 (SC KHRECHBA)	2.6
PC03 (SC KHRECHBA)-PC04	3.05
PC04-PC05	3.2
PC05-PC06	3.26
PC06-PC07 (SC HRM)	3.42

Tableau I-3: les debits de fonctionnemnt.**I.4.7. Les Pressions de services :**

Pression minimal le long de la canalisation : 45 bars

Pression minimal de départ au niveau de REGGANE : 70 bars

Pression maximal d'arrivé au niveau des stations : 46 bars

Pression maximal de service (PMS) : 71.5 bars

I.4.8. La localisation Géographique des postes de sectionnements :

Le gazoduc GR5 est équipé de 28 postes de sectionnements répartis le long de la canalisation conformément au « règlement Algérien de sécurité de transport de gaz combustibles », à une distance maximum de 20 Km pour la zone II et la zone III, et 10 km pour la zone L^a. Ses postes sont installés afin de limiter les pertes de fluide en cas de rupture des sections de canalisation.

ouvrage	PK	altitude	région
Ps N°01	20	337.3	ADRAR
Ps N°02	39+500	335	
Ps N°03	58	352	
Ps N°04	95	405	
Ps N°05	115	406	
Ps N°06	135	413	
Ps N°07	156	424	
Ps N°08	198	411	
Ps N°09	220	443	
Ps N°10	242+500	444	
Ps N°11	264+500	426	
Ps N°12	287	444	
Ps N°13	331	466	
Ps N°14	353	451	
Ps N°15	375	467	
Ps N°16	397	480	
Ps N°17	441+500	418	
Ps N°18	464+500	384	
Ps N°19	487+500	421	
Ps N°20	510+500	460	GHARDAIA
Ps N°21	533+700	509	
Ps N°22	580	518	
Ps N°23	603+500	496	
Ps N°24	626+800	520	
Ps N°25	673+200	675	
Ps N°26	696+200	680	
Ps N°27	719+20	731	LAGHOUAT

Tableau I-4: Localisation des postes de sectionnements

I.4.9. La localisation géographique des postes de coupure :

Sept postes de coupures sont prévus le long de la ligne pour permettre une exploitation et une maintenance optimales du gazoduc.

La conception des postes de coupures doit permettre le lancement et la réception des racleurs.

Station /poste De coupure	nom	PK	Altitude (m)	localisation
TD-REGGANE	REGGANE	0	305	ADRAR
PC N°1	/	75	406	
PC N°2	/	176	176	
PC N°3	KHRECHBA	310	310	GHARDAIA
PC N°4	HASSI EL GARA	418	425	
PC N°5	EL GOLIA	533	529	
PC N°6	MANSOURAH	650	544	
PC N°7	HASSIR'MEL	764+840	750	LAGHOUAT
TA HASSI R'MEL	CNDG	769+500	750	

Tableau I-5: localisation des postes de coupures

I.4.10. Caractéristiques des Points d'Injections de gaz :

Gisement	Point D'injection	Diamètres (pouce)
AHNET	TD	20
REGGANE-NORD,		20
M'SARI AKABLI		14
TIDIKELT-SUD,		12
TIDIKELT-NORD		14
AKABLI		24
TOUAT	PS N°4	24
REGGAN DJBEL HIRANE		14
TIMIMOUNE	PS N°9	12
ZARAF	PC N°3	14
HASSI-MOUINA		14
HASSI BA HAMOU		12
BECHAR,	PC N°7	12

Tableau I-6: points kilométriques et diamètres des point d'injection

I.5. Les stations de compression :

Le long du STC GR5, il se trouve deux (02) stations de compression qui se composent principalement de :

- Filtres séparateurs à cyclones
- Turbocompresseurs
- Aéroréfrigérants du gaz procédés
- Un système de comptage
- Un système de télésurveillance
- Un système de protection cathodique

I.5.1. Caractéristiques d'exploitation des deux stations de compressions en phase II :

Les informations sont données à l'entrée et à la sortie des compresseurs, pour les Conditions d'été dont La température du sol est de 25°C, et celles des entrées du gaz au GR5 sont prises égales à 50°C (Température opératoire).

La température de sortie maximum des stations de compression est égale à 50°C. Cela implique la mise en place d'aéro-réfrigérant pour l'utilisation dans le cas de nécessité.

Pk des SC (km)	Débit (Sm ³ /h)	Pression entrée SC (bars)	Pression au refoulement du compresseur (bars)	Température D'aspiration (°C)	Température de refoulement (°C)	Pression de Sortie SC (bars)	Puissance sur arbres (MW)
310	2 529.5	45.3	70.5	36.2	70.2	70.0	38.2
765	2 727.0	46.6	71.8	26.9	59.6	71.0	38.4

Tableau I-7: données d'exploitation des deux stations de compression

Chapitre II

Étude Thermo-Hydraulique

II.1. Introduction :

Les propriétés du gaz naturel(GN) influencent son flux et son écoulement à travers un pipeline.

Le gaz naturel traité dans notre étude est considéré réel et ces propriétés sont une première étape importante pour l'analyse hydraulique du gaz que nous allons explorer et discuter dans ce chapitre.

Le but d'un calcul hydraulique sur un tronçon de gazoduc entre deux points kilométriques tout en connaissant le diamètre de la conduite et le débit à transporter est, de déterminer variation de la pression et température le long du tronçon considéré.

Les deux paramètres P (Pression) et T (Température) sont importants, c'est sur lesquelles se base la surveillance de la ligne d'une part, et d'autre part s'assurer que le produit possède la pression minimale qui assure son acheminement vers le point considéré (pression de refoulement) tout en surveillant le seuil de températures pour préserver les caractéristiques de l'acier, et la PMS (Pression Maximal de Service) pour éviter l'éclatement de la conduite.

Pour faire le calcul hydraulique d'un tronçon de gazoduc, il faut disposer des données suivantes :

- Débit volumique ou massique du gaz.
- La composition du gaz.
- Densité de gaz
- Longueur du tronçon.
- Diamètre de la conduite.
- Épaisseur de la paroi de la conduite.
- Rugosité équivalente ou moyenne de la paroi interne de la conduite
- La chaleur spécifique
- La viscosité cinématique ou dynamique.

II.2. Les propriétés physico-chimiques du gaz naturel :

Le gaz naturel contient principalement le méthane avec des quantités abondantes et des concentrations faibles des autres hydrocarbures : éthane, propane, butane et d'autres hydrocarbures plus lourds.

Ci-après des propriétés physico-chimiques du GN :

II.2.1. Fraction molaire :

La fraction molaire Y_i d'un composant (i) est égal au rapport du nombre de moles N_i de ce composant sur le nombre total de moles N_{tot} du mélange, c'est donc une grandeur sans dimension.

$$Y_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i}{\sum_i N_i}$$

II.2.2. La masse molaire moyenne :

La masse molaire M_i est la masse d'une mole d'une substance (un corps simple, un composé chimique). Elle s'exprime en gramme par mole g/mol .

$$M_m = \sum_{i=1}^n Y_i M_i$$

II.2.3. La masse volumique :

La masse volumique, aussi appelée densité volumique, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

$$\rho = \frac{M_m}{V_m}$$

II.2.4. Le volume massique :

Le volume massique d'un objet, ou volume spécifique, est le quotient de son volume par sa masse.

$$\theta = \frac{1}{\rho}$$

II.2.5. La densité relative du gaz :

La densité relative d'un corps est le rapport de sa masse volumique par rapport à la masse volumique d'un corps pris comme référence.

Dans le cas des liquides et des solides, le corps pris comme référence est L'eau pure à 4°C, mais Pour la vapeur et les substances gazeuse, le corps de référence est L'air à la même température et sous la même pression.

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{air}}} = \frac{M_{\text{gaz}}}{M_{\text{air}}}$$

II.2.6. Le pouvoir calorifique :

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagé par une combustion unitaire complète d'un combustible, lorsque ce dernier contient de l'hydrogène il y a formation de l'eau. Il existe deux considérations du pouvoir calorifique :

II.2.7. Le pouvoir calorifique inférieure :

Il est obtenu en supposant L'eau à l'état vapeur dans le produit de combustion.

$$(\text{PCI})_m = \frac{\sum Y_i \cdot (\text{PCI})_i}{Z}$$

II.2.8. Le pouvoir calorifique supérieure :

Dans ce cas, on tient compte de la chaleur de condensation de L'eau

$$(PCS)_m = \frac{\sum Y_i \cdot (PCS)_i}{Z}$$

II.2.9. La viscosité dynamique :

Appelée aussi la viscosité absolue, elle traduit les interactions moléculaires au sein du fluide en mouvement. À basse pression, la viscosité d'un mélange de gaz peut être estimée à partir de la viscosité des corps pure qui le compose par la relation de (HERMING ET ZIPPER).

$$\mu = \frac{\sum (\mu_i Y_i \sqrt{M_i})}{\sum (Y_i \sqrt{M_i})}$$

II.2.10. La viscosité cinématique :

La viscosité cinématique est le quotient de la viscosité dynamique par rapport à la masse volumique du fluide. Elle représente la capacité de rétention des particules du fluide et quantifie sa capacité à s'épancher.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

II.2.11. L'indice de WOBBE :

C'est l'un des paramètres qui caractérise la qualité de combustion d'un gaz dans un bruleur,

Sa valeur conditionne l'acceptation d'un gaz naturel dans un réseau de consommation.

Dans le cas où l'indice de WOBBE est très élevée la combustion produira l'oxyde de Carbone (CO) rendant la combustion du gaz non hygiénique.

$$W = \frac{PCS}{\sqrt{\rho_{\text{gaz}}}}$$

II.2.12. Le rapport de chaleur spécifique :

C'est la chaleur nécessaire pour faire varier la température, d'une unité de la matière (Solide, liquide ou gaz) d'un degré (Celsius, Kelvin) à volume constant ou à pression constante.

$$C_{pi} = \sum_{i=1}^n Y_i C_{pi}$$

II.2.13. Le coefficient de joule Thomson :

C'est la vitesse de changement de température par rapport à la pression pour une enthalpie constante.

$$D_j = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$$

II.2.14. La constante du gaz réel :

Elle est déterminée empiriquement en tant que constante de proportionnalité de l'équation des gaz parfait Elle établit le lien entre les variables d'état (T, P, V, n) .

$$\bar{R} = \frac{R}{M_m}$$

$$\text{avec } R = 8314 \text{ }^j/\text{Kmol K}$$

II.2.15. Le Facteur de compressibilité Z :

Le facteur de compressibilité caractérise la déviation du comportement du gaz réel par rapport au gaz parfait, l'expression de ce facteur est :

$$Z = \frac{PM_m}{\rho RT}$$

Le facteur Z dépend de la pression, de la température et de la masse molaire moyenne du gaz et des constituants présents dans le gaz.

Sa valeur est déterminée soit par calcul en utilisant des Abaques (méthode graphique), soit en utilisant des Corrélations empiriques ou par équation d'état si la composition du gaz est connue ou sa densité, la majorité de ces méthodes proposées nécessite la connaissance de la composition du gaz afin de calculer les deux paramètres P_{pr} (La pression pseudo réduite) et T_{pr} (la température pseudo réduite).

II.2.15.1. Détermination du facteur Z par des Abaque :

Les abaques les plus utilisés sont ceux établis expérimentalement par STANDING et KATZ en 1941.

La pression pseudo critique P_{pc} :

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i P_{ci}$$

La pression pseudo réduite P_{pr} :

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$$

La température pseudo critique T_{pc} :

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i T_{ci}$$

La température pseudo réduite T_{pr} :

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$$

Remarque : Les formules mentionnées précédemment utilisées par la méthode de STANDING et KATZ sont valables que pour les gaz naturel riche en méthane et ne sont pas appliquées pour le teneur élevée en gaz acide (H_2S, CO_2)

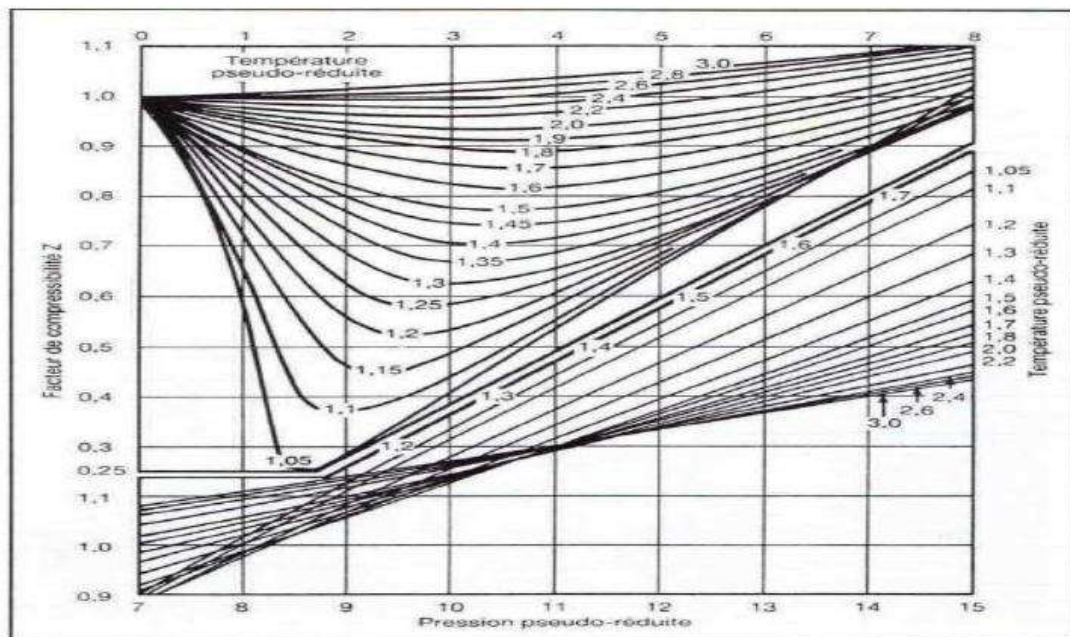


Figure II-1: Détermination du facteur de compressibilité

II.2.15.2. Détermination du facteur Z par corrélations :

Plusieurs corrélations permettant de calculer le facteur de compressibilité Z sont disponibles dans la littérature technique.

La corrélation de S.Robertson :

Elle est très rapide à programmer et explicite, donc son utilisation est facile,

$$Z = 1 + a(x - b)(1 - \exp(-c))$$

Avec

$$x = \frac{P_r}{T_r^2}, a = 0.1219T_r^{0.638}, b = T_r - 7.76 + \frac{14.75}{T_r}, c = 0.3x + 0.411x^2$$

Cette corrélation donne des valeurs du facteur de compressibilité Z, qui présente une erreur relative moyenne de 0.7% par rapport aux abaques de STANDING et KATZ, dans l'intervalle $1.2 \leq T_r \leq 2.8$ et $0 \leq P_r \leq 30$

L'équation d'état de REDLICH_KWONG :

Elle décrit correctement la phase gazeuse

$$(V - b) \left[P + \frac{a}{T^{0.5}V(V + b)} \right] = RT$$

Tel que :

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^{2.5}}{P_c} \quad \text{et} \quad b = 0.08664 \frac{RT_c}{P_c}$$

En remplaçant le volume spécifique V par $\frac{ZRT}{P}$ on obtient :

$$z^3 + z^2 + (A - B - B^2)z - AB = 0$$

Tel que

$$A = \frac{aP}{R^2 T^{2.5}} \quad \text{et} \quad B = \frac{bP}{RT}$$

II.3. Calcul hydraulique :

D'une manière générale, la résolution des problèmes de la mécanique des fluides s'effectue toujours à partir des mêmes principes fondamentaux de conservation dans les gazoducs, le calcul hydraulique se base sur le système d'équation suivant obtenu en supposant que :

- L'écoulement est unidimensionnel et isotherme
- Les pressions et les vitesses suivant la section sont constantes

II.3.1. Principe de conservation des quantités de mouvement :

C'est un principe mécanique qui découle directement de la 3^{ème} loi de Newton, il permet d'établir des relations entre les causes qui produisent les forces.

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \lambda \frac{\rho w^2}{2D} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial x} = - \frac{\partial p}{\partial x}$$

II.3.2. Principe de conservation de la masse :

L'équation de continuité est résultante du principe de conservation de masse. Pour un écoulement permanent, la masse du fluide traversant toutes les sections droites par unité de temps est la même.

$$M = \int \rho w ds$$

Elle se réduit à :

$$M = \rho w ds = \text{cst}$$

II.3.3. Équation de continuité :

L'équation de continuité est obtenue après développement du principe de conservation de masse :

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

II.3.4. L'équation d'état d'un gaz réel :

L'équation d'état est représentée à l'aide d'une expression mathématique :

$$(P, V, T) = 0$$

L'équation d'état des gaz réel s'écrit :

$$P = \rho zRT$$

II.3.5. Écoulement stationnaire :

Dans un écoulement stationnaire, les paramètres sont invariables par rapport au temps. Ce qui permet de simplifier les équations du système précédent :

On va modifier la première équation par la multiplication par ρ^2

$$\left(\frac{dP}{\rho} + \frac{dV^2}{2} + gdZ + \lambda \frac{V^2}{2} \frac{dx}{D} = 0 \right) * \rho^2$$

On obtient

$$\rho dP + \rho^2 gdZ + \lambda \rho^2 \frac{V^2}{2} \frac{dx}{D_{int}} = 0$$

On néglige le terme : $\frac{dV^2}{2}$ car : $\frac{dV^2}{2} \ll \ll \frac{dP}{\rho}$

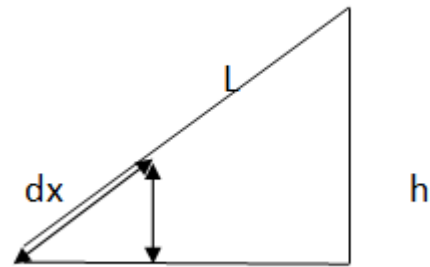
Et d'autre part on a :

$$M = \rho VS \Rightarrow \rho V = \frac{M}{S} \Rightarrow \rho^2 V^2 = \frac{M^2}{S^2} \quad \text{et} \quad \rho = \frac{P}{ZR_g T}$$

$$\frac{PdP}{ZR_g T} + g \frac{P^2}{(ZR_g T)^2} dZ + \lambda \frac{M^2}{2S^2} \frac{dx}{D_{int}} = 0$$

On simplifie par $ZR_g T$

$$PdP + g \frac{P^2}{ZRT} dZ + \lambda \frac{M^2}{2S^2} ZR_g T \frac{dx}{D_{int}} = 0$$



Par la suite :

On remplace dZ par $\frac{h}{L} dx$

D'autre part :

$$d(P^2) = 2PdP$$

Donc on trouve :

$$\frac{1}{2} d(P^2) + g \frac{P^2}{ZRT} \frac{h}{L} dx + \lambda \frac{M^2}{2S^2} ZR_g T \frac{dx}{D_{int}} = 0$$

On multiplie par 2 :

$$d(P^2) + 2g \frac{P^2}{ZRT} \frac{h}{L} dx + \lambda \frac{M^2}{S^2} ZR_g T \frac{dx}{D_{int}} = 0$$

On va poser :

$$a = \frac{2gh}{ZRT} \quad \text{et} \quad b = \frac{\lambda M^2 ZR_g T L}{S^2 D_{int}}$$

$$d(P^2) + \left(\frac{2g}{ZRT} \frac{hP^2}{L} + \lambda \frac{M^2 ZR_g T}{S^2 D_{int}} \right) dx = 0$$

D'autre part on trouve :

$$\frac{dP^2}{L \left(\frac{2gh}{ZRTL} \right) P^2 + \frac{\lambda M^2 Z R_g T L}{S^2 D_{int}}} = - \frac{dx}{L}$$

Alors :

$$\frac{dP^2}{[aP^2 + b]} = - \frac{dx}{L}$$

On fait un changement de variable :

$$y_1 = P_1^2 \quad \text{et} \quad y_2 = P_2^2$$

Donc on aura :

$$\frac{dy}{ay + b} = - \frac{dx}{L}$$

Afin d'éviter de tomber dans les erreurs on prend :

$$a = \frac{2gh}{Z_m R T_m} \quad \text{et} \quad b = \frac{M^2 Z_m R_g T_m \lambda_m L}{S^2 D_{int}}$$

On obtient :

$$\frac{1}{a} \ln \frac{ay_2 + b}{ay_1 + b} = - \frac{L}{L} \Rightarrow \ln \frac{ay_2 + b}{ay_1 + b} = -a$$

Alors

$$e^{\ln \frac{ay_2 + b}{ay_1 + b}} = e^{-a} \quad \Rightarrow \quad \frac{ay_2 + b}{ay_1 + b} = e^{-a}$$

$$y_2 + \frac{b}{a} = y_1 e^{-a} + \frac{b}{a} e^{-a}$$

Comme on a posé $y_1 = P_1^2$ et $y_2 = P_2^2$

$$P_2^2 + \frac{b}{a} = P_1^2 e^{-a} + \frac{b}{a} e^{-a}$$

$$P_2^2 = P_1^2 e^{-a} + \frac{b}{a} (e^{-a} - 1)$$

$$P_2 = \sqrt{P_1^2 e^{-a} + \frac{b}{a} (e^{-a} - 1)}$$

Cette formule donne la perte de charge dans une conduite incline a pente constante $\frac{H}{L} = \text{cte}$

Si on remplace a et b on obtient l'expression suivante :

$$P_2 = \sqrt{P_1^2 e^{-\frac{2gh}{ZRT}} + \frac{M^2 Z_m R_g T_m \lambda_m L (e^{-a} - 1)}{S^2 D_{\text{int}} a}}$$

D'où la formule de perte de charge pour une conduite horizontale est la suivante :

$$P_2 = \sqrt{P_1^2 - \frac{M^2 Z_m R_g T_m \lambda_m L}{S^2 D_{\text{int}}}}$$

La forme générale :

$$P_f = \sqrt{P_i^2 - \frac{M^2 Z_m R_g T_m \lambda_m L}{S^2 D_{\text{int}}}} \dots \dots \dots (1)$$

II.4. Répartition de la pression le long d'une conduite :

D'après la formule (1) on trouve :

$$M = A_0 \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L}} \quad \text{et} \quad A_0 = S \sqrt{\frac{D}{Z_m R_g T_m \lambda_m}}$$

On a :

$$M = A_0 \sqrt{\frac{P_1^2 - P_x^2}{x}} = A_0 \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{L}}$$

On trouve

$$\frac{P_1^2 - P_x^2}{x} = \frac{P_1^2 - P_2^2}{L} = \frac{P_x^2 - P_2^2}{L - x}$$

Alors :

$$P_x^2 = P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2) \Rightarrow P_x = \sqrt{P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2)} \dots \dots \dots (2)$$

La formule (2) indique que La pression diminue en fonction de la longueur

II.4.1. La pression moyenne :

La pression moyenne c'est une pression qui s'établit dans le gazoduc lorsque on ferme les extrémités de la conduite.

$$P_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} P_x dx$$

$$P_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} \sqrt{P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2)}$$

On a :

$$P_x^2 = P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2) \Rightarrow dP_x^2 = d\left(P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2)\right)$$

$$2P_x dP_x = -\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{L} dx$$

Dont

$$dx = -\frac{dP_x^2 L}{(P_1^2 - P_2^2)}$$

Alors :

$$P_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} P_x \left(-\frac{dP_x^2 L}{(P_1^2 - P_2^2)} \right)$$

On obtient :

$$P_m = \frac{2}{3} \left(\frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2} \right)$$

II.4.2. Calcul du régime d'écoulement :

II.4.2.1. Le nombre de REYNOLDS :

$$Re = \frac{wD_{int}}{v} = \frac{4Q}{\pi D_{int} v}$$

II.4.2.2. Le coefficient de friction :

L'écoulement du gaz dans un gazoduc s'effectue en régime turbulent, le plus souvent en zone quadratique, parfois en zone mixte.

Le coefficient de friction ou coefficient de perte de charge λ est généralement relié au nombre de Reynolds Re et à la rugosité relative de la paroi ε est égal (ε/D)

Le calcul du coefficient de friction peut se faire par l'intermédiaire de plusieurs formules, l'une des plus simples est :

$$\lambda = 0.067 \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 K_e}{D_{int}} \right)^{0.2}$$

La formule de COLEBROOK implicite :

La formule de COLEBROOK, considérée comme la plus précise, dans cette formule λ est implicite et la perte de charge se calcule de manière itérative

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{K_e}{3.71 D_{int}} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right)$$

La formule d'ADAMOV :

$$\lambda = 0.01 \left(\frac{2.14 \cdot 10^6}{Re} + 30400 \frac{K_e}{D} \right)^{0.2}$$

La formule de PANHANDLE :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{0.014 \cdot Re^{-0.039}}{\left(\frac{2K_e}{D} \right)}$$

II.5. Calcul thermique :

La température du gaz varie le long de la canalisation, s'échauffe lorsqu'il est comprimé dans la station de compression ou dans les points d'injection le long de la ligne, puis sa température baisse à cause de la variation de la température ambiante, de la température du sol et de l'effet de Joule Thomson.

II.5.1. Le coefficient global d'échange de chaleur (K) :

Le coefficient global d'échange de chaleur K peut se définir comme le flux de chaleur qui traverse une surface unitaire quand le gradient de température est égal à l'unité, elle dépend de :

- La masse de l'humidité de la conductivité du sol
- La nature de matériau et profondeur de pose de la canalisation
- La nature de matériau du revêtement et sa conductivité
- Régime d'écoulement établi dans le gazoduc

$$K = \frac{1}{\sum \text{Résistances}} \Rightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + R + \frac{1}{a_2}}$$

$$R = \sum_{i=1} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

II.5.2. Répartition de la température du gaz le long d'un gazoduc Sans considération de l'effet joule Thomson :

L'équation du bilan d'énergie thermique est la suivante :

$$-McpDT = K\pi D_{\text{ext}} (T - T_a) dx$$

$$-\frac{dT}{T - T_a} = \frac{K\pi D_{\text{ext}}}{Mcp} dx$$

$$a = \frac{K\pi D_{\text{ext}}}{MC_p}$$

a : coefficient de CHOUKOV

Après intégration de l'équation suivante

$$\int_{T_i}^{T_x} \frac{dT}{T - T_a} = \int_0^x -a dx$$

On obtient :

$$\ln \frac{T_x - T_a}{T_i - T_a} = -a x$$

Et en fin on obtient la formule de CHOUKOV :

$$T_x = T_a + (T_i - T_a)e^{-a x}$$

II.5.3. Répartition de la température du gaz le long d'un gazoduc Avec considération de l'effet joule Thomson :

L'équation du bilan d'énergie thermique est donnée ci-après :

$$-McpDT = K\pi D_{ext} (T - T_a)dx + MDjcp dx$$

$$Dj: \text{coefficient de joul Thomson } \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{bar}} \right]$$

$$\begin{aligned} -dT - Dj dx &= \frac{K\pi D_{ext}}{Mcp} (T - T_a)dx \\ &= a (T - T_a)dx \end{aligned}$$

Par la suite :

$$-dT = [a(T - T_a) + Dj] dx$$

$$\frac{-dT}{a(T - T_a) + Dj} = -dx$$

$$\frac{-dT}{(T - T_a) + \frac{Dj}{a}} = -a dx$$

Après intégration on obtient :

$$T_x = T_a - \frac{Dj}{a} + \left(T_i - T_a + \frac{Dj}{a} \right) e^{-ax}$$

Dans le cas où $Dj = 0$ on revient à la forme de CHOUKOV

II.5.4. La température moyenne :

La température moyenne est la température qui s'établit lorsqu'on ferme les deux extrémités de la conduite.

$$T_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} T_x dx$$

Après intégration on obtient :

$$T_m = T_a + \frac{(T_i - T_a)}{aL} (1 - e^{-aL})$$

II.5.5. Influence de la température du sol :**II.5.5.1. La température du sol réduite :**

$$T_{sr} = T_s - D_j \frac{(P_i^2 - P_f^2)}{2aLP_{moy}}$$

II.5.5.2. La Température final :

$$T_f = T_{sr} + (T_i - T_{sr})e^{-aL}$$

II.5.5.3. La température moyenne :

$$T_{moy} = T_{sr} + \frac{(T_i - T_f)}{aL}$$

A prés la détermination de la température et la pression moyenne on déduit les quatres (04) paramètres suivants qui sont valable pour les conditions motionné si dessus :

$$0 < P < 160 \text{ bar} \quad - 50 < T < 100^{\circ}\text{C} \quad 0.66 < \Delta < 0.68$$

II.5.5.4. Facteur de compressibilité moyen :

$$Z_m = 1 - 2 \cdot 10^6 \frac{\Delta^{1.5} P_{\text{moy}}}{T_{\text{moy}}^{3.5}}$$

II.5.5.5. La Chaleur spécifique :

$$C_p = \left(48.13 + \frac{4,58 \cdot 10^{11} P_{\text{moy}}}{T_{\text{moy}}^5} \right) T_{\text{moy}}^{0.665}$$

II.5.5.6. Coefficient de joule Thomson :

$$D_j = \frac{5650}{T_{\text{moy}}^{2.13}} \sqrt{224 - P_{\text{moy}}}$$

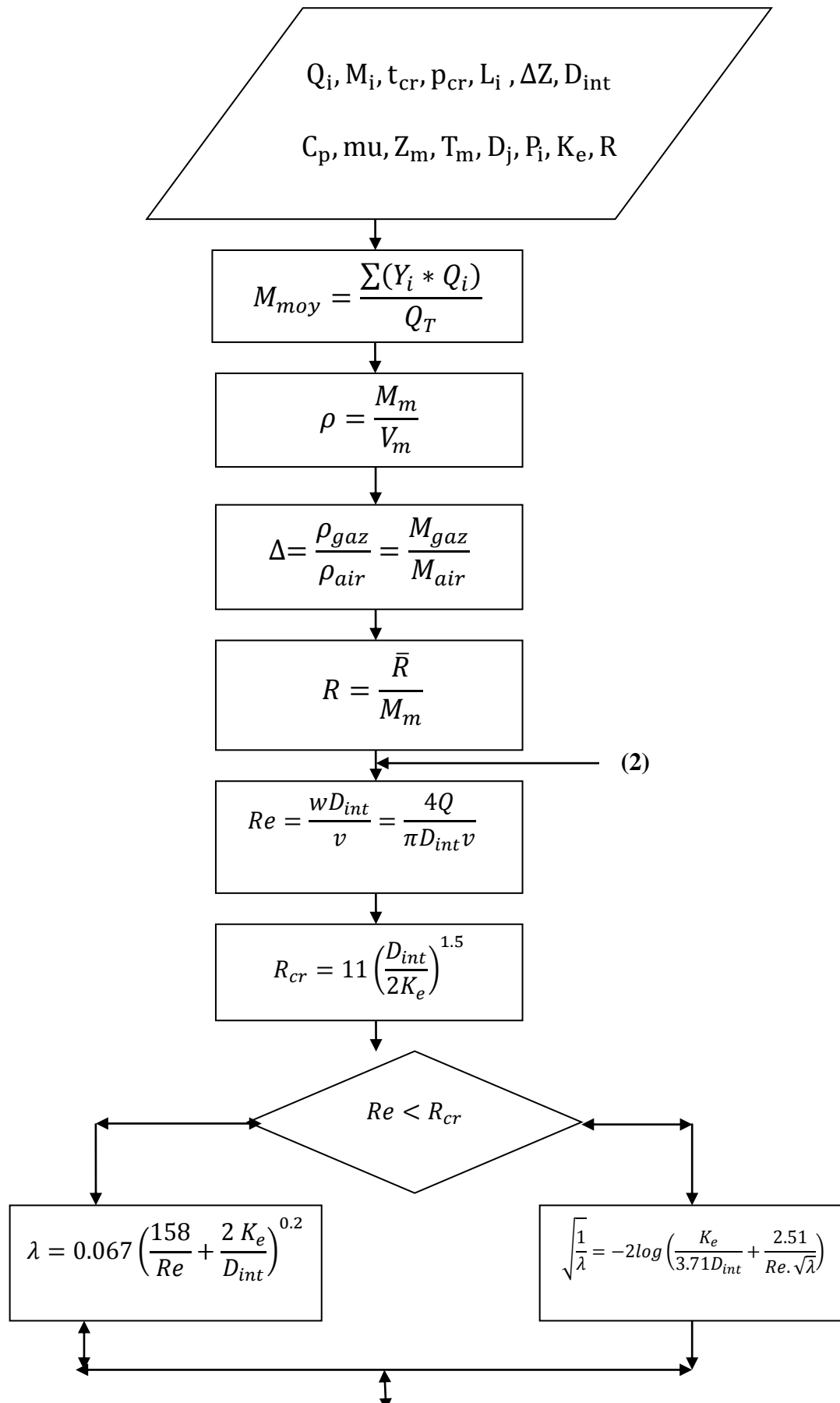
II.5.5.7. La viscosité dynamique :

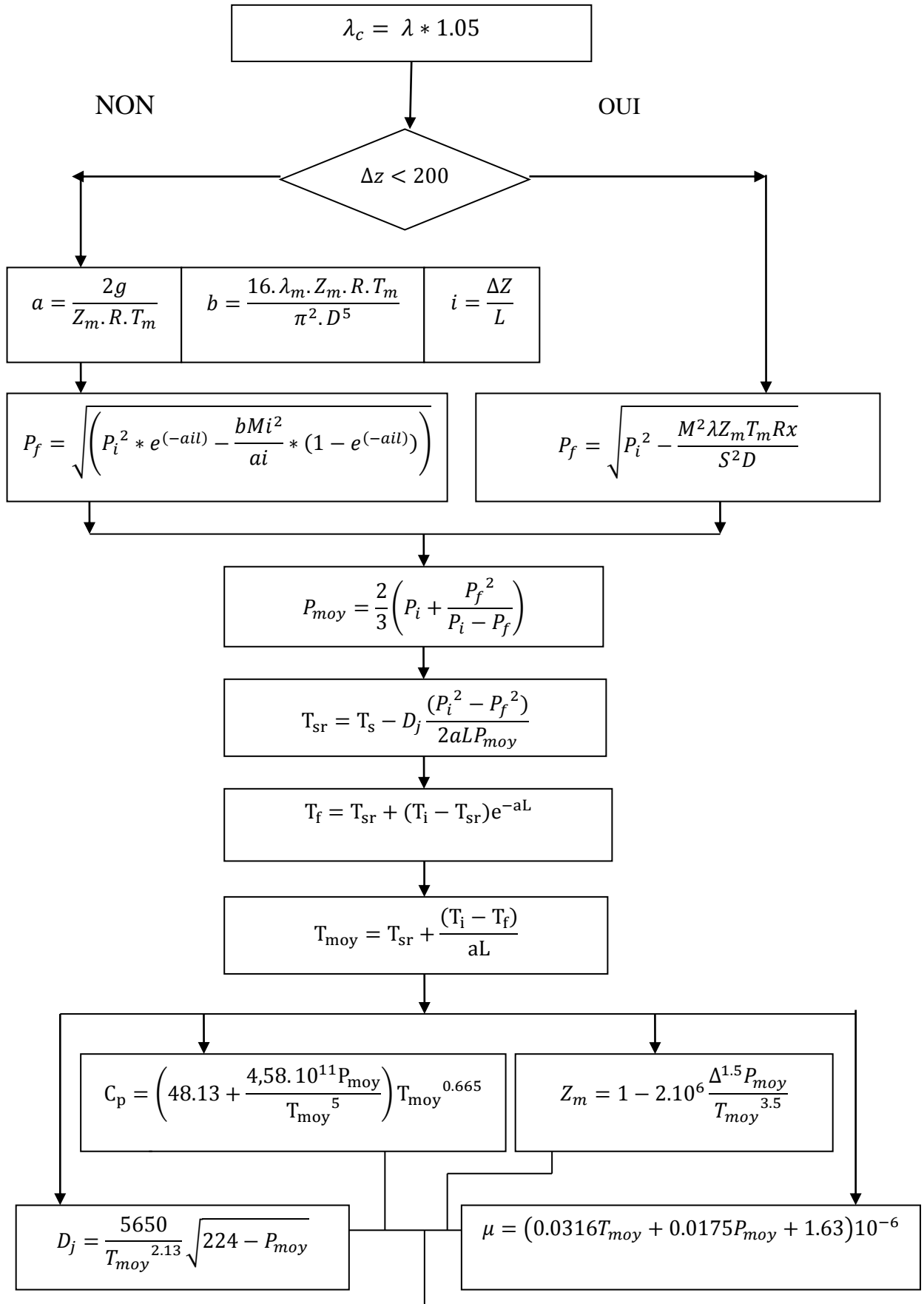
$$\mu = (0.0316 T_{\text{moy}} + 0.0175 P_{\text{moy}} + 1.63) 10^{-6}$$

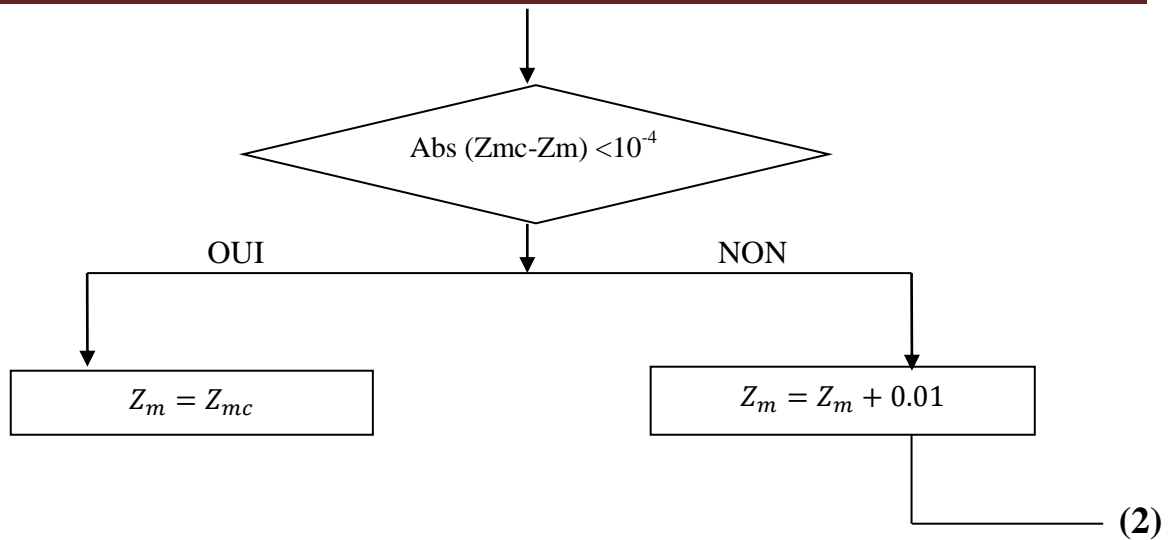
En utilisant la méthode des approximations successives, il faut introduire des approches du coefficient de compressibilité moyen, de la température moyenne et du coefficient de Joule Thompson puis en refaire les calculs jusqu'à satisfaire la condition suivant :

$$|Z_{\text{mc}} - Z_m| \leq 10^{-3}$$

II.6. Organigramme de calcul







II.7. Calcul des propriétés chimiques du gaz :

Dans le tableau ci-dessous indique la composition du gaz provenant des différents champs injectant dans le STC GR5

les champs	TOUAT	TIMIM-OUN	RAGGANE NORD	HASSI MOUINA	HBH	AHNET	MSARI AKABLI	ZERFAFA	RAGGANE DJ HIRANE
les débits	547	196	351	144	225	516	229	311	244
azote	0,03	2,07	0,38	0,261	3,08	2,935	1,4151	1,4151	1,4151
Gaz-carbonique	2	1,57	1,74	2	0,03	1	1,6873	1,68732	1,6873
méthane	90,02	87,58	96,06	95,49	88,18	90,09	91,056	91,0566	91,056
éthane	3,85	6,76	1,57	1,97	5,87	5,6	4,2829	4,28297	4,2829
Propane	1,05	1,38	0,2	0,22	1,77	1,005	0,9416	0,94165	0,9416
I_butane	0,14	0,19	0,02	0,02	0,27	0,505	0,2248	0,22488	0,2248
N_butane	0,2	0,21	0,02	0,02	0,47	0,505	0,2661	0,26618	0,2661
I_pentane	0,08	0,1	0,01	0,01	0,11	0,02	0,0574	0,05745	0,0574
N_pentane	0,05	0,03	0	0	0,12	0,02	0,0544	0,054496	0,0544
Hexane et plus	0,09	0,09	0	0	0,09	0	0,09	0,09	0,09

Tableau II-1 : la composition du Gaz des différents champs

II.8. Les propriétés chimiques du gaz étudié :

Les fractions	Mi	T _{Cr} °c	P _{Cr} bar
1,415125733	28,0134	-147,2	32,8
1,39542931	44,01	31,1	71,6
91,05668519	16,043	-82,5	44,9
3,425936801	30,07	32,1	47,3
0,941657403	44,097	98,6	41,2
0,224886306	58,123	133,5	36,2
0,266189995	58,123	152,5	35,3
0,053718189	72,15	187,7	32,2
0,040996661	72,15	197,2	32,4
0,057068404	86,1777	234,8	28,9

Tableau II-2 : les propriétés chimiques du gaz**II.8.1. Les résultats de calcul des paramètres physico-chimiques obtenus on****II.8.2. Utilisant les données des deux tableaux précédent sont :**

la masse molaire kg/kmol K	la masse volumique kg/m ³	volumé massique m ³ /kg	la densité relative
17,46714442	0,737010313	1,356833117	0,603095189

Tableau II-3 : les résultats de calcul sous EXEL

II.8.3. Les courbes de pression et de températures

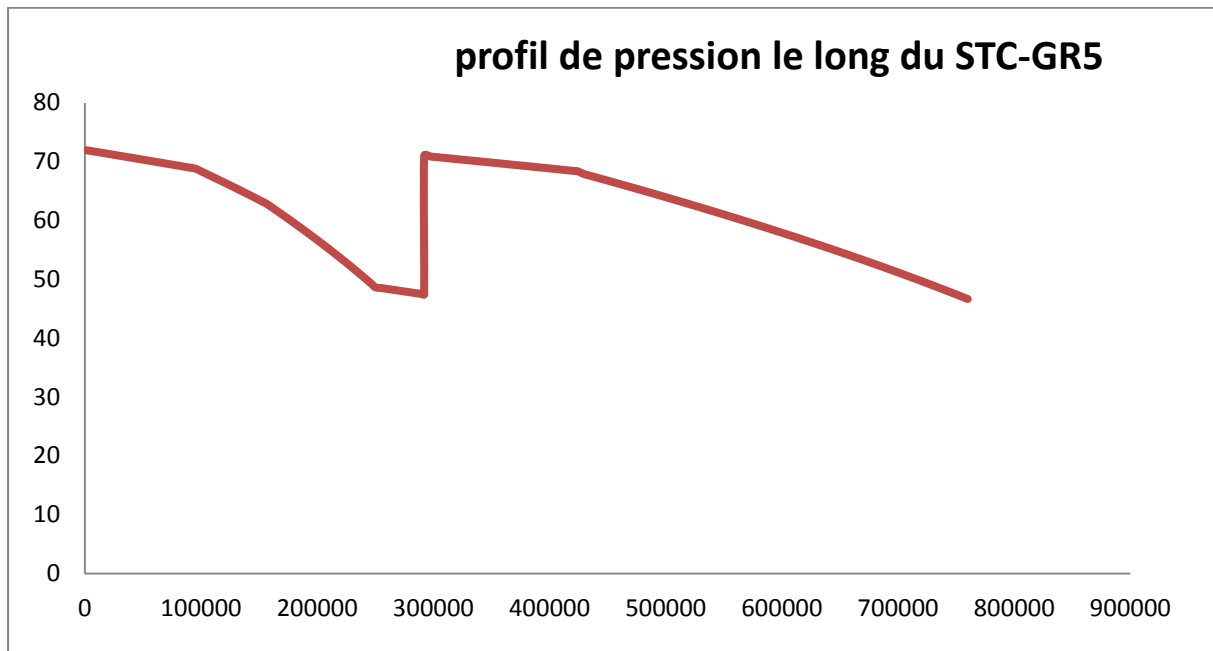


Figure II-2 : la distribution de la pression le long du STC-GR5

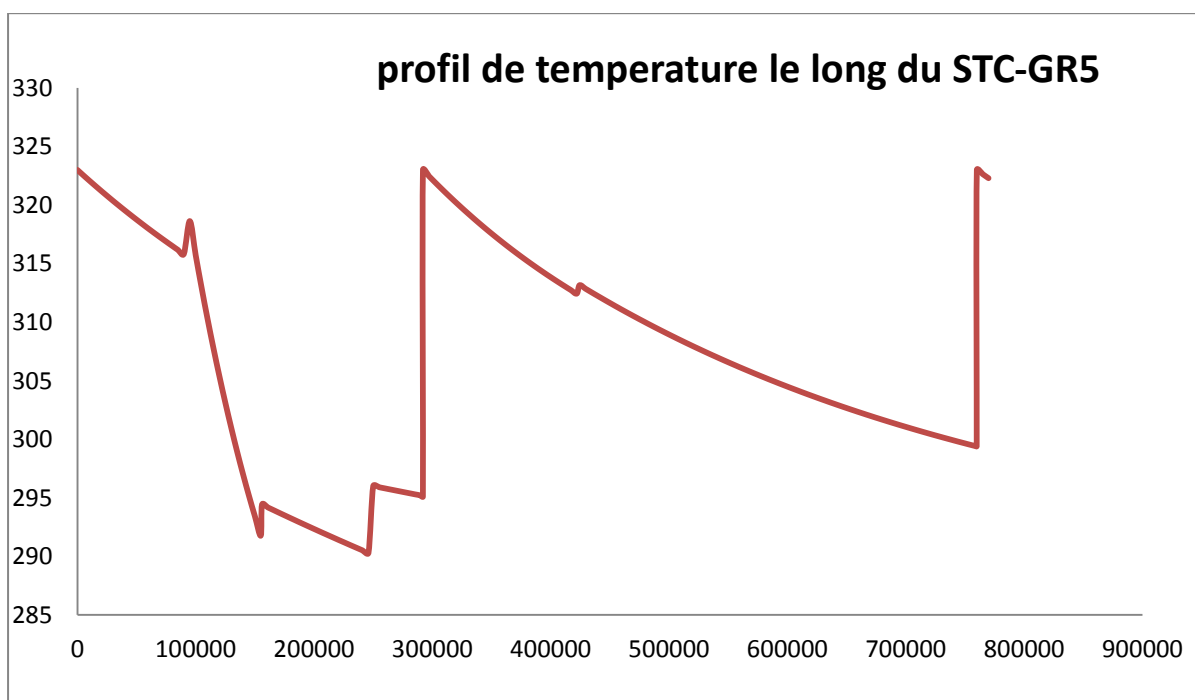


Figure II-3 : la distribution de la température long du STC-GR5

II.9. Calcul thermo-hydraulique via le logiciel PIPEPHASE :**II.9.1. Description du logiciel :**

PIPEPHASE est un programme de simulation d'écoulement des fluides à l'état stationnaire et en multi phase. Il est mes la pression, la température et permet une modélisation rigoureuse des débits dans les réseaux de regroupement et les systèmes de pipelines de pétrole et de gaz.

PIPEPHASE offre la puissance et la flexibilité de la modélisation, il couvre une gamme complète de fluides rencontrés dans l'industrie pétrolière incluent le liquide, le gaz, La vapeur et les mélanges multi phase de gaz et de liquide.

Ces Principaux avantages consistent :

- L'Amélioration des performances des lignes de débit
- L'Amélioration de la conception des pipe-lines et des installations

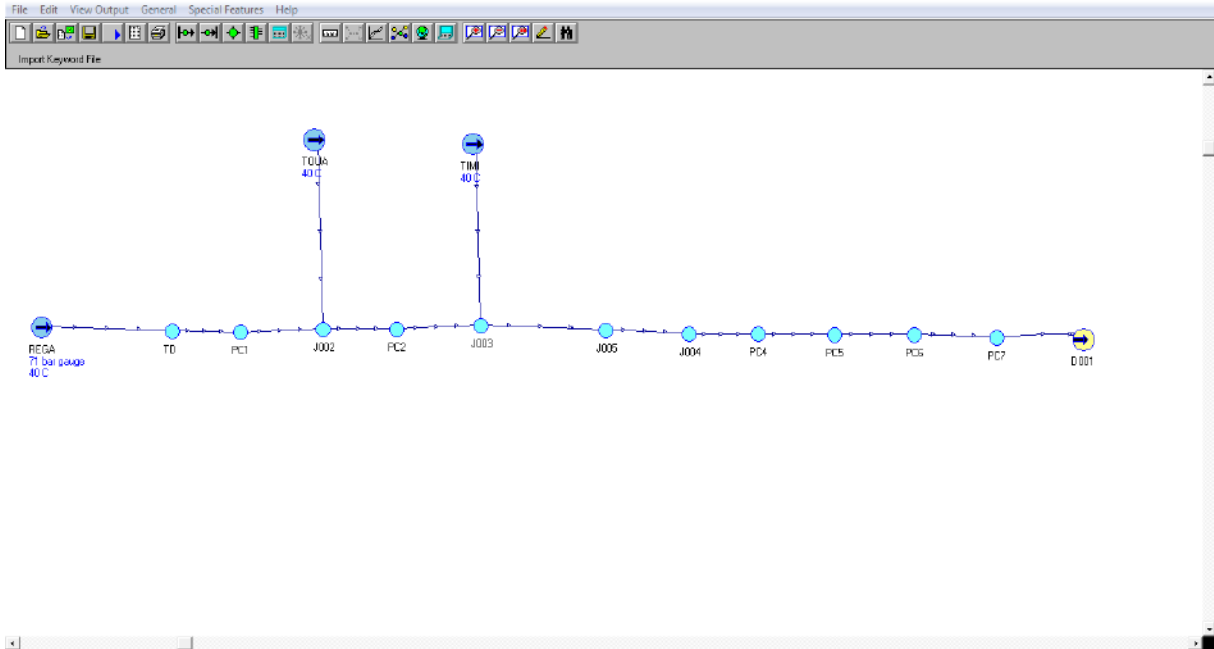
Ces Principales fonctionnalités dans le domaine de transport des hydrocarbures sont :

- Dimensionnement des lignes et des stations
- Analyse de transfert thermique pour les pipe-lines
- distribution de gaz naturel
- Études de planification et de gestion des équipements

II.9.2. Les phases d'exploitation du STC GR5 :

Phase N°1 :

Le STC GR5 en phase initial commence à acheminer le gaz de trois (03) champs :



Run Simulation and View Results

Run Configuration: Type: Network, Action: Run Simulation, Link: <All Links>

View / Generate Reports: Report: Output File, View, Print, RAS, EXCEL, TRAS

Run Status for file: FINALPHASE1

```

-----
ITERATION NUMBER    0. 0
MAX PRESSURE IMBALANCE =                -2.3202 BAR AT NODE J003

ITERATION NUMBER    1. 0
MAX PRESSURE IMBALANCE =                0.0000 BAR AT NODE J003

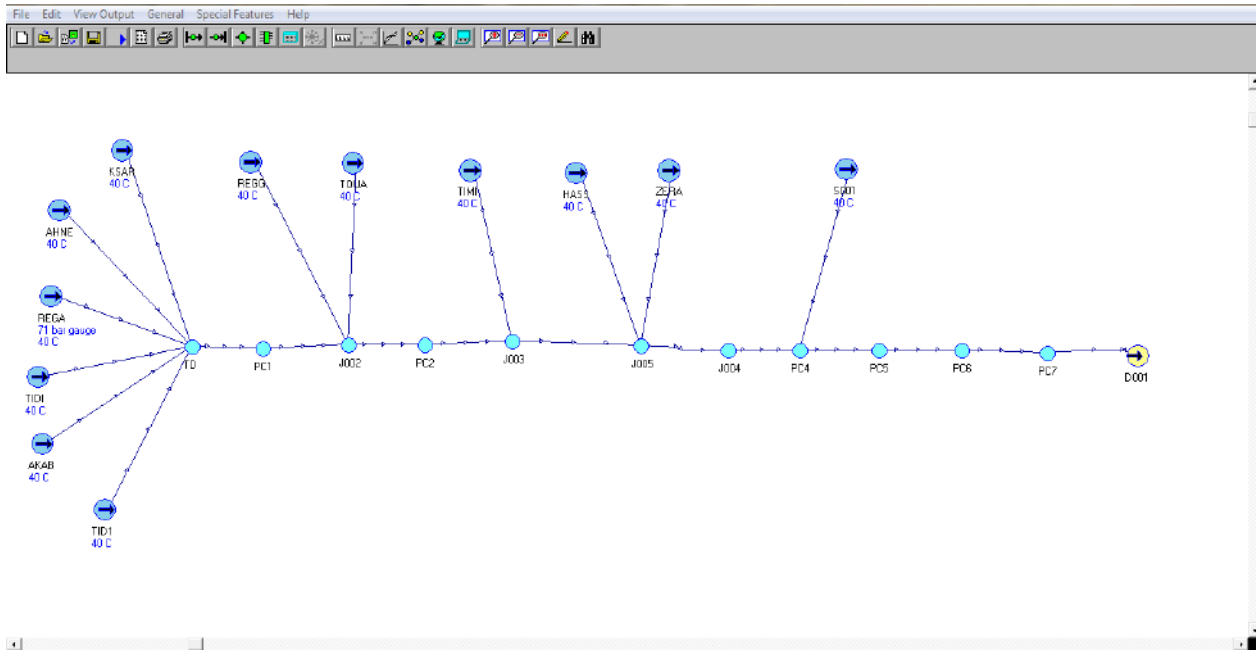
*** BASE CASE SOLVED ***
*** NETWORK SIMULATION SOLVED ***

CALCULATION STARTED  18:05:40 06/21/17
CALCULATION FINISHED 18:05:40 06/21/17
CALCULATION RUN TIME  0 HR  0 MIN  0 SEC

NETWORK SIMULATION SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Close Help

Phase N°2 : les nouveaux gisements découverts vont être connecté au STC GR5 :



Run Simulation and View Results

Run Configuration

Type: Network [Check] Action: Run Simulation [Run] Link: <All Links> [Stop]

View / Generate Reports

Report: Output File [View] [Print] [RAS] [EXCEL] [TPAS]

Run Status for File: FINALPHASE1

```

ITERATION NUMBER 19.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -349.5355 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 19.1
MAX PRESSURE IMBALANCE = -178.7975 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 20.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -17.6182 BAR AT NODE J005

*** BASE CASE NOT SOLVED ***

*** NETWORK SIMULATION NOT SOLVED ***

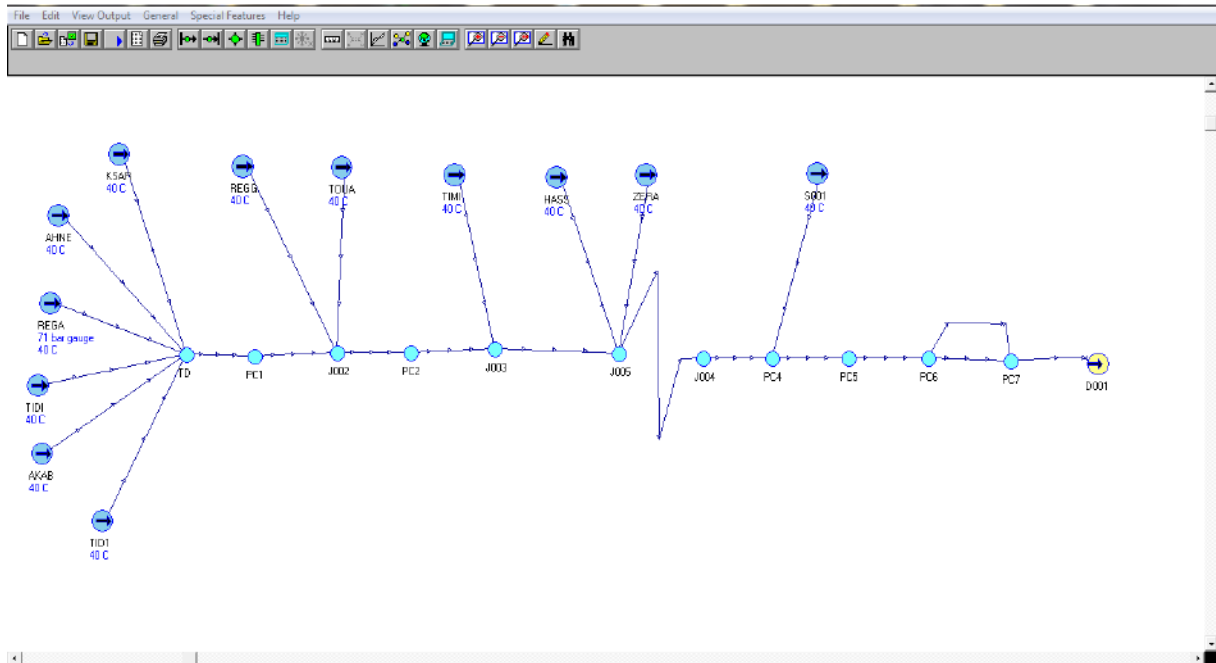
CALCULATION STARTED 15:38:15 06/04/17
CALCULATION FINISHED 15:38:18 06/04/17
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 2 SEC

NETWORK SIMULATION NOT SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Close Help

Étape 1 : l'ajout d'un looping entre PC06-PC07 et une station de compression :

Après la connexion des nouveaux gisements au STC-GR5, il devient insuffisant pour acheminer les quantités additionné pour cette raison nous procédant à une autre configuration



Run Simulation and View Results

Run Configuration
 Type: Network [Check]
 Action: Run Simulation [Run]
 Link: <All Links> [Stop]
 Nodes and Links to Exclude: []

View / Generate Reports
 Report: Output File [View] [Print]
 [RAS] [EXCEL]
 [TRAS]

Run Status for File: FINALPHASE1

```

ITERATION NUMBER 19.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -349.5355 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 19.1
MAX PRESSURE IMBALANCE = -178.7975 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 20.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -17.6182 BAR AT NODE J005

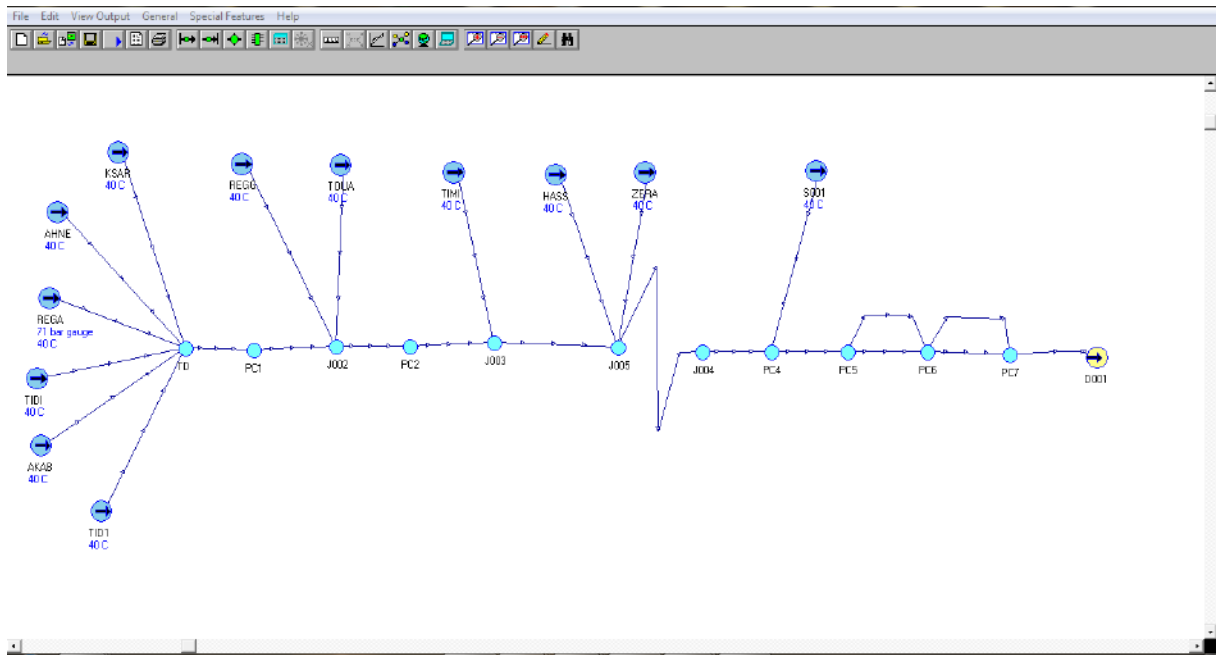
*** BASE CASE NOT SOLVED ***
*** NETWORK SIMULATION NOT SOLVED ***

CALCULATION STARTED 14:40:56 06/04/17
CALCULATION FINISHED 14:41:01 06/04/17
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 4 SEC

NETWORK SIMULATION NOT SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Close Help

Étape N°2 : l'ajout d'un looping entre PC05-PC07 :



Run Simulation and View Results

Run Configuration: Type: Network, Action: Run Simulation, Link: <All Links>

View / Generate Reports: Report: Output File, View, Print, RAS, EXCEL, TRAS

Run Status for File: FINALPHASE1

```

ITERATION NUMBER 19.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -349.5355 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 19.1
MAX PRESSURE IMBALANCE = -178.7975 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 20.0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -17.6182 BAR AT NODE J005

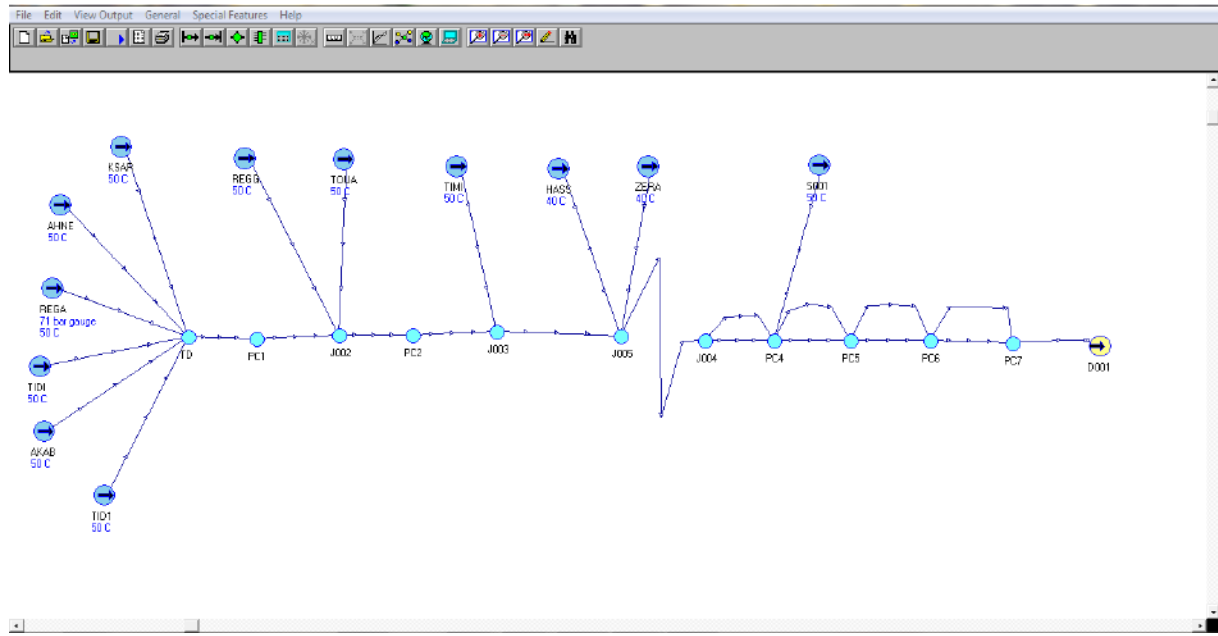
*** BASE CASE NOT SOLVED ***

*** NETWORK SIMULATION NOT SOLVED

CALCULATION STARTED 14:40:56 06/04/17
CALCULATION FINISHED 14:41:01 06/04/17
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 4 SEC

NETWORK SIMULATION NOT SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Étape N° 3 : l'ajout d'un looping entre PC03-PC07



Run Simulation and View Results

Run Configuration: Type: Network, Action: Run Simulation, Link: <All Links>

View / Generate Reports: Report: Output File, View, Print, RAS, EXCEL, TRAS

```

Run Status for File: FINALPHASE1
ITERATION NUMBER 19.3
MAX PRESSURE IMBALANCE -5.0537 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 20.0
MAX PRESSURE IMBALANCE -10.5523 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 20.1
MAX PRESSURE IMBALANCE -4.9731 BAR AT NODE J005

*** BASE CASE NOT SOLVED ***
*** NETWORK SIMULATION NOT SOLVED ***

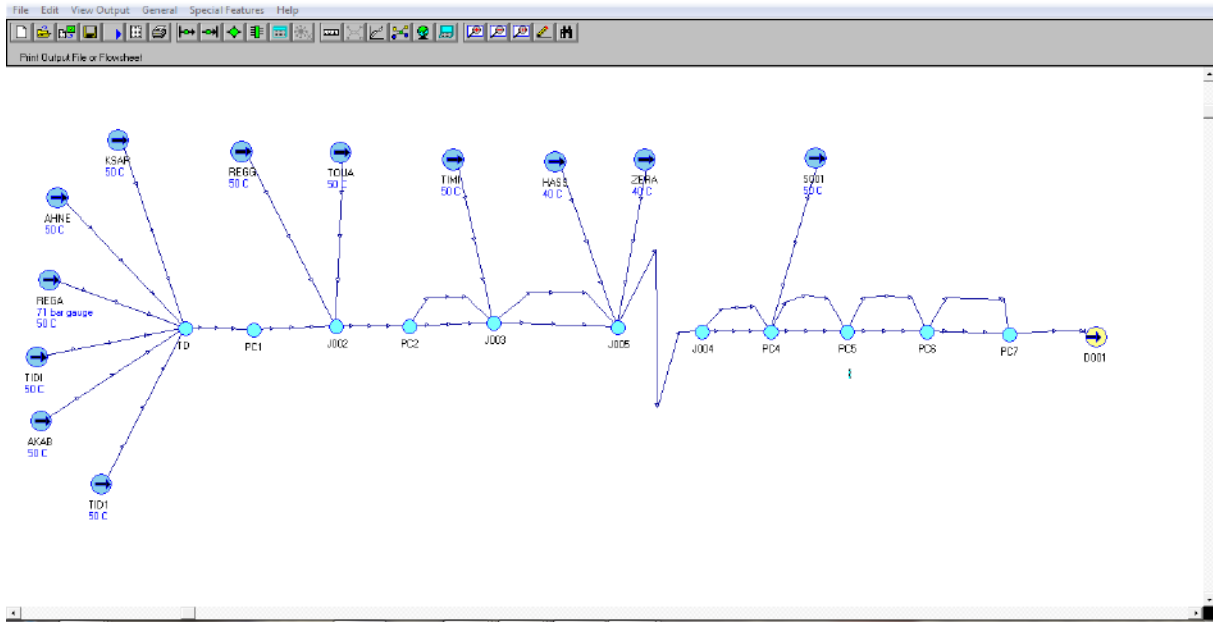
CALCULATION STARTED 17:56:20 06/21/17
CALCULATION FINISHED 17:56:26 06/21/17
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 6 SEC

NETWORK SIMULATION NOT SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Étape N°4 : l'ajout d'un looping entre PC02-PC07 :

Le STC GR5 avec une expansion entre PC-02 et le PC-07, et une station de compression

Devient suffisant pour transporter les quantités de gaz provenant des 13 champs



Les résultats de la simulation de l'Étape N°6 :

Run Simulation and View Results

Run Configuration:
 Type: Network [Check]
 Action: Run Simulation [Run]
 Link: <All Links> [Stop]
 Nodes and Links to Exclude: []

View / Generate Reports:
 Report: Output File [View] [Print]
 [RAS] [EXCEL]
 [TRAS]

Run Status for File: FINALPHASE1

```

ITERATION NUMBER 0. 0
MAX PRESSURE IMBALANCE = -12.8209 BAR AT NODE J003

ITERATION NUMBER 1. 0
MAX PRESSURE IMBALANCE = 0.5340 BAR AT NODE J005

ITERATION NUMBER 2. 0
MAX PRESSURE IMBALANCE = 0.0001 BAR AT NODE J005

*** BASE CASE SOLVED ***

*** NETWORK SIMULATION SOLVED ***

CALCULATION STARTED 17:51:25 06/21/17
CALCULATION FINISHED 17:51:26 06/21/17
CALCULATION RUN TIME 0 HR 0 MIN 1 SEC

NETWORK SIMULATION SOLVED
>>> Reading results back into database.
>>> Execution has completed.
    
```

Close Help

FINALPHASE1.beg

Link	Std. Flowrates			Node	Inlet		Node	Outlet	
	Oil CMHR	Water CMHR	Gas MMCMHR		Pres. BARG	Temp. C		Pres. BARG	Temp. C
L001	0.000	0.000	0.31500	REGA	71.00	50.	TD	71.00	50.
L002	0.000	0.000	0.51600	AHNE	71.00	50.	TD	71.00	50.
L003	0.000	0.000	0.54700	TOUA	65.10	50.	J002	65.10	48.
L004	0.000	0.000	0.13900	TIDI	71.14	50.	TD	71.00	50.
L005	0.000	0.000	1.58300	PC5	57.52	51.	PC6	48.58	48.
L006	0.000	0.000	0.12600	TIMI	50.98	50.	J003	50.98	46.
L007	0.000	0.000	0.13600	AKAB	71.00	50.	TD	71.00	50.
L008	0.000	0.000	1.58300	PC4	65.50	54.	PC5	57.52	51.
L009	0.000	0.000	0.24400	REGG	65.58	50.	J002	65.10	48.
L010	0.000	0.000	2.94100	J005	45.13	44.	J004	71.00	60.
L011	0.000	0.000	2.36000	J002	65.10	48.	PC2	52.98	47.
L012	0.000	0.000	1.24300	J003	50.98	46.	J005	45.13	44.
L013	0.000	0.000	1.56900	PC1	66.27	48.	J002	65.10	48.
L014	0.000	0.000	0.22500	S001	65.50	50.	PC4	65.50	54.
L015	0.000	0.000	1.56900	TD	71.00	50.	PC1	66.27	48.
L016	0.000	0.000	0.31100	ZERA	45.13	40.	J005	45.13	44.
L017	0.000	0.000	1.47050	J004	71.00	60.	PC4	65.50	54.
L018	0.000	0.000	1.58300	PC4	65.50	54.	PC5	57.52	51.
L019	0.000	0.000	1.24300	J003	50.98	46.	J005	45.13	44.
L020	0.000	0.000	1.47050	J004	71.00	60.	PC4	65.50	54.
L021	0.000	0.000	1.58300	PC5	57.52	51.	PC6	48.58	48.
L022	0.000	0.000	3.16600	PC7	47.04	48.	D001	47.04	48.
L023	0.000	0.000	1.58300	PC6	48.58	48.	PC7	47.04	48.
L024	0.000	0.000	1.18000	PC2	52.98	47.	J003	50.98	46.
L025	0.000	0.000	1.58300	PC6	48.58	48.	PC7	47.04	48.
L026	0.000	0.000	0.14400	HASS	45.39	40.	J005	45.13	44.
L027	0.000	0.000	1.18000	PC2	52.98	47.	J003	50.98	46.
L038	0.000	0.000	0.22900	KSAR	71.00	50.	TD	71.00	50.
L039	0.000	0.000	0.23400	TID1	71.00	50.	TD	71.00	50.

NODE SUMMARY

Node	Pressure	Temp.	Oil	Gas	WGR	CGR	Gas
------	----------	-------	-----	-----	-----	-----	-----

Interprétation des résultats :

le STC GR5 en phase I est suffisant pour acheminer les quantités de gaz provenant des trois gisements (TOUAT, TIMIMOUNE ET REGGANE) jusqu'à la station de HASSI-R'MEL avec une pression de 48bars.

Cependant, pour la phase II suite à l'exploitation de nouveau gisement découvert, le STC GR5 devient insuffisant pour acheminé ces quantités additionnels ainsi que la pression des gisements n'est plus suffisante Puisque il y'a plus de perte de charge provoqué.

Pour cela, une station intermédiaire au PK310 et un dédoublement de la conduite à partir du PC-02 jusqu'au PC-07 sur une longueur de 560 km sont nécessaires pour assurer l'arrivée du gaz jusqu'à la station de HRM avec une pression de 47 bars.

Chaque sommet du graphique du profil de pression représente soit un terminal départ, une station de compression ou un point d'injection.

Chaque pic sur le profil de température représente soit une injection ou une compression.

Conclusion :

L'acheminement des quantités de gaz provenant des nouveaux gisements découverts au sud-ouest de HASSI-R'MEL jusqu'au CNDG nécessite une exploitation optimale du STC GR5.

L'étude thermo-hydraulique faite dans ce chapitre en premier lieu sous EXCEL, ensuite confirmée avec le logiciel PIPEPHASE a abouti au même résultat.

L'exploitation optimale du STC GR5 en phase II est avec deux stations de compression, la première se situe au PK310 ET l'autre à HASSI R'MEL au PK765.

Dans ce chapitre on a pu tirer les valeurs de pression et de température sur les ouvrages concentrés (TD, TA, PS, PC) que nous allons utiliser dans le chapitre 04 Pour effectuer une étude de stress sur ces ouvrages.

Chapitre III

Méthodes de calcul et d'analyse de stress

III.1. Introduction :

Les tuyauteries sont des parties importantes de toutes les unités de traitement ou d'énergie. Elles constituent le moyen le plus efficace et le plus courant de transporter des fluides d'un point à autres sous une pression et à une température donné.

Le système de transport par canalisation se compose d'un grand nombre d'éléments, la défaillance d'un seul composant a le potentiel de causer de graves problèmes de sécurité

On doit donc pouvoir assurer un service satisfaisant durant toute la période de fonctionnement prévue.

Une tuyauterie forme une structure tridimensionnelle dans l'espace qui, durant sa vie, se trouve soumise à un certain nombre d'actions qui engendrent des contraintes nuisibles ; celles-ci peuvent être introduites à l'origine, par la fabrication et le montage, ou bien apparaître à la suite de diverses circonstances, résultant des poussées et de moments excessifs dans la tuyauterie pendant les Essais, en fonctionnement ou ,à la mise à l'arrêt.

Afin de s'assurer que le système de tuyauterie fonctionne avec un minimum possible de dégâts et d'Impact sur l'environnement tout en étant économique, une Analyse de stress est recommandée.

III.2. L'objectif principal d'une analyse de stress :

L'analyse de stress représente une composante essentielle dans la conception d'un système de tuyauteries à travers laquelle des paramètres tels que la sécurité des canalisations, celle des composants connexes des équipements connectés ainsi que les déviations des conduites sont importants.

L'objectif principal de cette analyse est de vérifier la conformité des composants du système, de prévenir une défaillance prématurée tout en veillant à ce que les contraintes de tuyauterie soient conservées dans les limites admissibles ainsi de dimensionner les supports permettant d'éviter une flexibilité excessive et assurer une souplesse suffisante pour absorber les expansions thermiques, cette analyse est nécessaire pour concevoir le système de tuyauterie sans surcharger ses composants et les équipements connectés .

En général, le but de l'analyse de stress des canalisations peut être résumé en deux grandes catégories :

- **Assurer l'intégrité structurelle** : cela implique le calcul des contraintes dans le tuyau en raison de toute la conception de charges. Les procédures nécessaires sont prises pour maintenir le stress dans le code limite permis. Ce contrôle de contrainte selon les codes est dans le but d'assurer que les ruptures ou les fissures ne se produiront pas dans la tuyauterie.

- **Maintenir l'opérabilité du système** : une tuyauterie peut être très forte, mais le système peut ne pas être utilisable en raison de problèmes dans l'équipement de raccordement. Fuite de bride, contrainte élevée, aussi la charge excessive de tuyauterie sur l'équipement rotatif est certains de ces problèmes. Le travail requis pour maintenir l'opérabilité du système est généralement beaucoup plus nécessaire pour assurer l'intégrité structurelle.

L'analyse de stress s'effectue en utilisant des outils informatiques reconnus, conforme aux exigences des codes de conception internationaux, tels que ASME B31.8 (**Gas Transmission and Distribution Piping System.**) Que nous allons utiliser dans ce chapitre.

L'étude de stress se divise en plusieurs branches parmi lesquelles nous trouvons :

- Analyse de stress statique
- Analyse stress dynamique telle qu'une
- Analyse hydraulique transitoire
- Analyse sismique
- Étude des coups de bélier et des surpressions
- Études de la résistance des matériaux et calcul de la série de brides

Dans le rapport d'une étude de stress, toutes les informations nécessaires au concepteur de tuyauterie sont clairement indiquées tels que, modifications du cheminement ou du concept optimisé pour le supportage, les efforts calculés et admissibles sur les tubulures d'équipement, les charges sur supports et le choix et les dimensions des supports à ressort et des joints de dilatation.

III.3. Les différents modes de sollicitation d'un système de tuyauterie :

Les systèmes de tuyauterie sont sollicités par différentes charges, classés en trois types de chargement de base, à savoir les charges soutenues, thermiques et occasionnelles.

III.3.1. Charges soutenues (charges primaires) :

Elle se compose principalement de la pression interne, le poids propre du tube, le poids du calorifugeage, le poids des accessoires et appareils, le Poids du fluide véhiculé.

Si une charge du type primaire se produit, la situation est totalement différente dans l'analyse de limite, car toute charge qui dépasse celle nécessaire pour produire une plastification générale dans une section quelconque aura pour résultat la ruine de la structure.

III.3.2. Charges thermiques ou charges d'extension (secondaires) :

Elle se réfère à l'expansion ou la contraction thermique de la tuyauterie lorsque le système passe d'un état thermique à un autre état thermique.

Dans le cas où le tuyau est "restreint" dans les directions qu'il souhaite se déformer, des contraintes de déformation thermique libre génèrent des contraintes thermiques cycliques et lorsqu'elles dépassent la plage de contrainte thermique admissible spécifiée par les codes internationaux de tuyauterie, le système est susceptible de se faillir par fatigue.

III.3.3. Charges occasionnelles :

Ce type de charge est subit par la tuyauterie suite à des événements occasionnels comme le tremblement de terre et le vent si la tuyauterie est située à l'extérieur.

III.3.4. Les efforts dynamiques :

De nombreuses tuyauteries sont soumises à des efforts dynamiques qui peuvent apparaître dans une tuyauterie durant leur fonctionnement ou à des mouvements périodiques appelés vibrations, les causes sont multiples et l'on peut citer :

- Les vibrations libres où le système est excité par une impulsion extérieure.
- Les vibrations forcées où le système oscille sous l'action d'une force extérieure périodique.
- Les efforts dans les coudes dus à la vitesse du fluide qui se produit lorsqu'il circule à grande vitesse dans une canalisation, les coudes sont soumis à une force centrifuge dont la valeur est

$$F_c = \left(2 S \gamma \frac{V^2}{g} \right) * \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)$$

- Les échappements de soupapes : Les tuyauteries de gaz sont munies de soupapes pour éviter les effets de surpression dans la conduite, celles-ci exercent, lors de leur fonctionnement, une force brutale sur la tuyauterie.

III.4. Différent mode de défaillances d'un système de tuyauterie :

Les pipelines sont le plus souvent construits à partir des tubes d'acier soudés bout à bout ou bridés. À force de leur utilisation et les différentes sollicitations auquel ils sont soumis durant l'exploitation, ils peuvent faillir selon différents mode et mécanisme cité ci-après :

III.4.1. La Rupture statique :

En général la rupture statique est divisée en deux catégories (rupture ductile et rupture fragile) :

III.4.1.1. La rupture ductile :

L'endommagement du système est dû à des Déformations excessives provoquées par des charges intensives qui lui sont appliquées, il fait apparaitre des déformations plastiques généralisées qui causent des taux d'élongation ou de contraction considérables.

III.4.1.2. La rupture fragile (rupture brutale) :

Elle se présente dans le cas où le matériau ne produit pas des déformations plastiques. C'est un type particulièrement dangereux, car un léger impact se traduit directement par un stress très élevé provoquant des dommages non prévisibles tels que l'éclatement soudain du système de tuyauterie.

III.4.2. La rupture de fluage :

Dans les environnements à haute température, si un système de tuyauterie est soumis à une charge constante, il subit des déformations continue et irréversible.

En premier lieu, le métal s'allonge plastiquement et finit par se rompre même si la charge auquel il est soumis provoque un stress beaucoup plus faible que celui provoqué par la charge de rupture du matériau.

Les essais de fluage sont effectués sous une charge constante à température constante, avec des durées de 10^3 à $30 \cdot 10^3$ h. Le passage du domaine élastique à celui de fluage se fait dans une zone de températures qui dépend de la nature de l'acier et qui pratiquement se situe :

- de 400 à 450 °C pour les aciers au carbone ;
- de 450 à 500 °C pour les aciers faiblement alliés ;
- de 550 à 600 °C pour les aciers austénitiques

III.4.3. Rupture due à l'instabilité du système :

Le système de tuyauterie peut faillir à cause des défauts d'instabilités provoquées par la pression externe. Les deux genres d'instabilités les plus rencontrés sont :

- l'instabilité élastique qui se présente le plus souvent sous forme de flambage
- L'Instabilité plastique qui apparaît dès que le chargement dépasse la plage correspondant à la déformation excessive, et ne peut plus augmenter.

III.4.4. Rupture due à la fatigue :

Le système peut se ruiner sous contrainte inférieure à la valeur de la charge de Rupture du matériau. Pour les tuyauteries, il s'agit de la fatigue oligocyclique ou fatigue plastique à un petit nombre de cycles. Un matériau, soumis à des contraintes qui provoquent des déformations plastiques alternées de traction et compression, risque la fissuration puis la rupture par fatigue.

Aussi, les contraintes dues aux gradients ou aux variations brusques de températures à travers la section transversale du tuyau due à un écoulement stratifié ou au soufflage du fluide à basse température sont considérées significatives, sont une cause de la rupture par fatigue.

III.4.5. Rupture provoquée par la corrosion :

La corrosion est un phénomène qui dépend essentiellement du métal, des traitements thermiques et de surface et l'action des sollicitations dues au contact avec le fluide.

L'intensification du stress dans les petites fosses corrodées réduit considérablement la résistance du système de tuyauterie jusqu'à atteindre une certaine limite où le matériau devient instable, incapable de résister à la pression de conception.

III.5. La prévention des différentes sollicitations :

Le système de la tuyauterie doit être flexible, alors pour assurer la flexibilité et le bon fonctionnement du système, on procède à :

III.5.1. Cas des charges primaire :

Ajouter des supports verticaux pour porter le poids mort et supportes verticalement le système et éviter les effondrements.

III.5.2. Cas des charges secondaire :

- Introduire des coudes dans le système qui sont généralement modélisées comme des ancrages dans l'analyse du stress et considéré comme des compensations, ce qui augmentera la flexibilité de la tuyauterie.
- Ajouter des boucles d'expansion ou chaque boucle sera composés de quatre coudes pour absorber la croissance ou les contractions thermiques.
- Mettre des joints de dilatation (les joints antidérapants).
- Introduire des ancrages intermédiaires qui limitent le mouvement des tuyaux dans les trois directions de translation et de rotation dans des endroits appropriés, de sorte que la déformation thermique est absorbée par les régions ou il y'a des boucles d'expansion.

III.5.3. Cas des charges occasionnelles :

La protection de la tuyauterie du vent qui souffle en plan horizontal est assurée par l'attachement des supports latéraux aux systèmes de tuyauterie. Aussi pendant un séisme, la terre peut également se déplacer verticalement, Donc pour protéger la tuyauterie de l'ensemble de ces mouvements horizontal et vertical, des supports de repos sont réalisés comme des contraintes verticales et latérales.

III.5.4. Cas des sollicitations dynamique :

Dans le cas ou des vibrations sont constatées en service, on peut évaluer le risque de dégradation par les lois de la résistance des matériaux qui Relient la déformation à la notion de contrainte. Ensuite on se prémunit par Le truchement de supports antivibratoires (amortisseurs, ressorts en opposition) judicieusement placés aux nœuds les plus importants.

III.6. Les zones d'apparition de contraintes :

Les concentrations de contraintes qui existent dans une tuyauterie, du fait de discontinuités géométriques, sont extrêmement importantes, notamment vis-à-vis des sollicitations cycliques. Il est donc important de connaître les zones où apparaissent ces concentrations et de pouvoir les évaluer.

On peut classer les discontinuités de structure en :

- Discontinuité structurale étendue de forme, ou de matériau affectant la distribution de contrainte ou de déformation à travers toute l'épaisseur de la paroi telle que les piquages, les réductions et les coudes.
- Discontinuité structurale locale affectant la distribution des contraintes ou déformations dans une partie relativement petite de l'épaisseur de la paroi et provocante de ce fait, des efforts nettement localisés, Exemple des soudures à pénétration partielle.

III.7. Classification des contraintes :

Les contraintes calculées ne sont pas nécessairement des contraintes réelles (telles que celles qui pourraient être mesurées par une jauge de contrainte, pour exemple), mais plutôt des contraintes «code» dont la décomposition est :

III.7.1. Classification suivant le mode d'action :**III.7.2. Contraintes primaires :**

C'est une contrainte due à une force permanente et qui n'est pas susceptible de s'atténuer par relaxation. Les contraintes dues au poids ou à la pression sont de ce type. Ce sont les plus dangereuses et elles doivent être limitées à une valeur qui est une fraction de la limite d'élasticité car Une contrainte de ce type si elle dépasse la limite d'élasticité la conséquence sera la défaillance de la structure.

Les contraintes primaires se décomposent en :

- Contrainte primaire générale de membrane : elles sont uniformément distribuée dans toute la section et dont la distribution n'est pas modifiée par l'apparition de déformation plastique.

- Contrainte primaire de flexion : c'est la partie des contraintes primaires variable dans l'épaisseur et dans la section.
- Contrainte primaire locale de membrane : c'est celle qui existe au voisinage d'une discontinuité de forme et qui est susceptible de s'amortir à la suite d'une déformation plastique.

III.7.3. Contrainte secondaire (notion de cycle thermique) :

On appelle contrainte secondaire toute contrainte normale ou de cisaillement résultant du bridage ou de l'auto-bridage d'une structure. Ou celle provenant de la dilatation ou la contraction thermique d'un réseau.

Les conditions créant la contrainte peuvent être compensées par des déformations plastiques locales ou de faibles distorsions.

Ces contraintes sont associées à des effets de flexion et de torsion, généralement localisés dans les points les plus sollicités, qui produisent des déformations plastiques locales qui ont pour résultat de limiter l'ensemble des charges. La ductilité de l'acier, qui caractérise la capacité de déformation plastique, est donc l'élément essentiel qui lui permet de résister aux contraintes thermiques et de les différencier des effets dus aux charges extérieures et intérieures soutenues tel que la pression et le poids.

III.7.4. Contrainte de pointe :

C'est le supplément de contrainte qui résulte de discontinuités de structure locales ou de contraintes thermiques locales et s'ajoute à la somme des contraintes primaires et secondaires.

La caractéristique de ces contraintes est de n'être nuisible que comme source de fissuration, de fatigue ou de rupture brutale, et de ne donner lieu à aucune déformation appréciable.

La classification de ces charges est correspond sensiblement à celle des codes américains (Notamment le code ASME) est représenté sur le tableau suivant :

Types de contrainte	Origine et localisation
Primaire	
-générale de membrane	Pression, tube droit, élément courbe, pièces de dérivation.
-de flexion	Poids et surcharges occasionnelles Toutes positions sauf endroits des concentrations
-locale de membrane	Poids et surcharges occasionnelles Tous les endroits des concentrations
secondaire	Thermique : dilatation, contraction, gradient de température. déplacement d'ancrage due à la température ou a des effets extérieurs
De pointe	Partie du gradient thermique radiale dans l'épaisseur Contrainte de surface

Tableau 1 : classifications des contraintes suivant le mode d'application de la charge

III.7.5. Classification suivant la durée du chargement :

Après avoir réparti les contraintes suivant le mode d'application de la charge (primaire, secondaire, de pointe), on procède à une seconde répartition suivant la durée du chargement et le critère de sécurité.

III.7.6. Conditions de fonctionnement nominal :

Elles correspondent aux caractéristiques de fonctionnement habituel et prévisible. On distingue dans ce poste, deux sous-groupes :

- les conditions de fonctionnement normal comprenant : la pression, le poids, la dilatation, correspondant au fonctionnement nominal de l'unité.
- les conditions de surcharges occasionnelles qui incluent : les effets climatiques, le fonctionnement des soupapes, le séisme nominal et les couples pression-température qui peuvent être atteints exceptionnellement.

III.7.7. Conditions accidentelles :

Elles correspondent à des incidents peu probables mais dont on ne peut cependant écarter l'hypothèse. Les critères d'acceptation de la tuyauterie sont dans ce cas limités à des valeurs qui ne garantissent que l'étanchéité et admettent la nécessité d'effectuer des réparations avant remise en marche de l'installation.

III.8. L'objectif de l'installation des supports sur le système de tuyauterie :

- La réalisation d'une tuyauterie capable de remplir un service défini pendant un temps déterminé, Il faut pour cela qu'un certain nombre de conditions soient satisfaites :
- limiter sur les structures les efforts dus à la pression lorsque ceux-ci ne sont pas équilibrés par des attaches.
- en aucun point, l'état de contraintes ne doit excéder une valeur limite au-delà de laquelle des troubles importants pourraient apparaître (déformations exagérées, fissures, pertes d'étanchéité) dont la résolution du problème est donnée par différents codes.
- assurer que la déformation ne doit pas être préjudiciable au fonctionnement normal de l'installation qui se résout en effectuant le calcul de la déformée de la ligne sous l'effet du poids et de la dilatation.
- de réduire la déformation de lignes rendues particulièrement flexibles par la présence de compensateurs.
- veiller à ce que les efforts exercés par la tuyauterie sur ses ancrages doivent être admissible(les limites admissible sont fournies par le constructeur).
- éviter les apparitions de contraintes importantes sur les membranes ondulées, dues au poids des éléments voisins.

III.9. La limitation des contraintes sur le système de tuyauterie :

Le bon fonctionnement de ligne de transport d'hydrocarbures pendant un temps déterminé malgré sa soumission à différents sollicitations est assuré par différents types de liaisons nécessaires de la tuyauterie avec les structures environnantes, ces liaisons se ramènent à quelques fonctions simples couvrant tous les cas rencontrés, quelle que soit la finalité (dilatation, séisme, poids) et qui sont :

III.9.1. Les liaisons rigides :

Les liaisons rigides se divisent en différents types de support selon la fonction qu'elles accomplissent :

III.9.1.1. Les Liaisons poids :

Utilisée dans la direction verticale, aux points de la tuyauterie qui ne subissent pas de déplacements verticaux sous l'effet de la dilatation ou de déplacements d'ancrages (points neutres).

III.9.1.2. Liaison de dilatation :

Elle peut être unie ou multidirectionnelle. Son cas d'utilisation a pour objectif :

- La modification des efforts exercés par la tuyauterie sur ses ancrages.
- La répartition des valeurs des contraintes le long de la tuyauterie pour soulager certains points très sollicités en surchargeant d'autres zones moins sollicités.
- Éliminer le flambage de tuyauteries très longues.

III.9.2. Liaison contre le séisme :

Ce type de liaison doit immobiliser des points de la tuyauterie du séisme subissent et non pas en services normaux surtout elle ne doit pas bloquer les déplacements dus à la dilatation.

III.9.3. Les Liaisons élastiques :

La liaison élastique est utilisée comme liaison-poids lorsque, la tuyauterie se déforme sous l'effet d'une dilatation thermique, il est nécessaire que les supports suivent le mouvement de la ligne afin d'éviter l'apparition de contraintes de bridage.

III.9.4. Liaison à réaction constante :

III.10. Les différents types de supports :

On distingue les différents types de support selon le type de liaison et la fonction qu'elles accomplissent :

III.10.1. Les supports permettant de réaliser les liaisons rigides :**III.10.1.1. Les Butées :**

C'est des dispositifs limitant ou annulant une ou plusieurs composantes de déplacement ou de la rotation de la tuyauterie. La butée est définie par la direction du mouvement interdit

Les butées les plus utilisées sont :

III.10.1.2. Butée statique :

Ce type est bien adapté dans le cas où les déplacements horizontaux de la tuyauterie sont importants mais sensible à toutes forces agissant perpendiculairement à l'axe des pendards tel que le vent, le séisme et les vibrations.

III.10.1.3. Butées multidirectionnelles :

Utilisé souvent pour contrôler la déformation de la tuyauterie, c'est une combinaison de patins guides soit dans une direction, soit dans deux directions en s'assurant que l'effort vertical de dilatation reste inférieur au poids, car dans le cas contraire, le soulèvement du patin risquent de provoquer le désengagement latéral du patin. Ces composantes de déplacements sont perpendiculaires à l'axe du mouvement autorisé (Le guide est défini par la direction du mouvement autorisé).

III.10.2. Les butées auto-blocables :

Ce sont des Liaisons rigides dynamiques, auto-freinant ou autobloquant, limitant dans une ou plusieurs directions le déplacement rapide de la tuyauterie sous l'effet d'efforts dynamiques, mais permettant dans ces directions les déplacements lents tels que ceux dus à la dilatation, ce type se devise en de deux types :

III.10.3. Les dispositifs à liquide (l'huile) :

Ce sont des dispositifs assez semblables à des amortisseurs hydrauliques classiques, Cependant dans ce cas, le blocage total est évité par l'existence d'un faible débit contrôlé entre les deux chambres.

III.10.4. Les dispositifs mécaniques :

Ces appareils mécaniques sont plus fiables que les appareils hydrauliques. Ils sont constitués par une vis centrale transformant le mouvement linéaire imposé par un mouvement de rotation mettant en mouvement, par inertie, des masselottes qui, dans leurs déplacements relatifs, serrent une spirale sur l'axe pour le bloquer.

III.10.4.1. Les Patins :

Ce Type de supports très utilisé en raffinerie, lorsque l'on dispose d'une structure sous-jacente, mais ses inconvénient majeurs est le risque de désengagement et les frottements.

III.10.4.2. Les Rouleaux :

Le frottement de roulement étant inférieur au frottement de glissement donc leur devrait conduire à une réduction des frottements.

III.10.4.3. Les Ancrages :

Un ancrage est un dispositif de retenue qui retient complètement le pipeline, ils peuvent être considérés comme des butées multidirectionnelles bloquant les six degrés de liberté d'un point d'une tuyauterie (trois translations et trois rotations).

Ce type de support permet d'isoler mécaniquement les différentes parties d'un réseau complexe et sa qualité d'une grande rigidité car il sera soumis aux efforts maximaux apparaissant dans la ligne.

Généralement, le pipeline doit avoir un bloc d'ancrage avant et après un changement de direction du souterrain à la surface afin d'éviter le stress sur la vanne due à déformation axiale d'un long pipeline.

III.10.5. Les supports permettant de réaliser les liaisons élastiques :

III.10.5.1. Supports à portance constante :

Dans le cas où le déplacement vertical de la tuyauterie est trop important, la variation de La portance devient appréciable et se traduit par un ensemble de stress déformant la tuyauterie et pouvant augmenter notablement les efforts aux ancrages .Ce type de Supports a

une réaction constante quelle que soit leur position et se divise en deux parties (Support à contrepoids et Support à ressort compensé)

Les supports à portance constante comportent :

- Un blocage qui facilite le montage et permet d'exécuter les épreuves hydrauliques sans déformation de la ligne. Ce blocage n'est retiré qu'au dernier moment avant le démarrage. Il devra être remis lors d'épreuves hydrauliques ultérieures (comme l'épreuve décennale), ou si une portion de tuyauterie est démontée.
- Une possibilité de réglage après montage, de l'ordre de 10 % environ de la charge nominale.
- Un curseur permettant de s'assurer que le support n'est pas en butée.

III.10.6. Les supports permettant de réaliser les liaisons à réaction constante :

III.10.6.1. Supports à portance constante :

Dans le cas où le déplacement vertical de la tuyauterie est trop important (> 25-30 mm), sa réaction reste constante quelle que soit la position.

Il existe deux types de supports à portance constante :

- **Support à ressort compensé :**

Utilisant des ressorts permettant d'obtenir une variation de portance beaucoup plus faible, dans un intervalle de course bien défini, sa consiste à contrebalancer la variation de réaction du ressort par une variation concomitante d'un bras de levier.

- **Support à contrepoids :** utilisant des câbles et des poulies.

III.10.7. Les compensateurs de dilatation :

Ce sont des dispositifs flexibles intercalés sur la tuyauterie qui permettent, pour certaines configurations particulières, notamment lorsque la flexibilité propre de la tuyauterie est insuffisante de compenser les dilatations ou contractions dues aux variations de température soit axialement, soit en rotation.

III.11. Répartition des contraintes

III.11.1. Sollicitation de pression :

La pression provoque, en considérant les tubes minces :

- Une contrainte longitudinale

$$\sigma_{lp} = \frac{P_i R_m}{2a}$$

- une contrainte transversale :

$$\sigma_{tp} = \frac{P_i R_m}{4a}$$

- une contrainte radiale :

$$\sigma_{rp} = -\frac{P_i}{2}$$

III.11.2. Sollicitation de flexion :

Les contraintes provoquées par La flexion sont :

III.11.2.1. Une contrainte normale σ_f :

C'est celle Dont la valeur est maximale aux fibres les plus éloignées de la section considérée pour devenir nulle à l'axe neutre de la section

III.11.2.2. Une contrainte de cisaillement τ :

C'est celle Dont la valeur est faible et dont la valeur maximale est atteinte là où la contrainte de flexion est nulle c'est-à-dire à l'axe neutre de la section, ce qui explique que cette contrainte est négligée dans les calculs de résistance.

La valeur de σ_f est donnée par la relation :

$$\sigma_f = \frac{V}{I} M_f = \frac{R_e}{I} M_f$$

III.11.3. Sollicitation de torsion :

La torsion provoque une contrainte de cisaillement τ qui est maximale sur la paroi extérieure et dont la valeur reste constante sur toute la circonférence.

Elle a pour valeur :

$$\tau = \frac{V}{I_0} M_t$$

Avec

$$I_0 = 2I$$

Soit

$$\tau = \frac{R_e}{2I} M_t$$

En générale, un tube se trouve soumis simultanément à l'action de trois moments : deux de flexion et un de torsion, on doit donc étudier un état de contraintes sous sollicitations composées.

III.11.4. Sollicitation de flexion et de torsion simultanée :

Dans le cas courant d'une sollicitation simultanée de flexion et de torsion, les efforts dans une section quelconque se réduisent à cinq composantes

- Un moment de torsion $M_t = M_y$
- Deux moments de flexion : M_x et M_z
- Deux efforts tranchants Q_x et Q_z

Les contraintes maximales de flexion se produisent aux extrémités du cylindre extérieur perpendiculaire au vecteur du moment de flexion résultant et valent :

$$\sigma_f = \frac{R_e}{I} M_{fr}$$

Avec

$$M_{fr} = \sqrt{(M_x^2 + M_z^2)}$$

À ces mêmes points, la contrainte de torsion vaut :

$$\tau = \frac{R_e}{2I} M_t$$

Nous nous trouvons donc en présence d'un état de contrainte composée qui se traite de façon classique en résistance des matériaux, à l'aide des différents critères de composition permettant de définir une contrainte équivalente de comparaison

III.11.5. Contrainte équivalente, critère élastique et plastique :

Les essais qui sont utilisés pour la détermination des valeurs de contraintes admissibles sont généralement les essais de traction instantanée unie axiale.

Ces essais permettent de déterminer les valeurs de la limite d'élasticité, de la charge de rupture et des allongements correspondants.

L'état de contrainte dans une tuyauterie est généralement complexe (bi ou tridimensionnel).

Il est de ce fait nécessaire d'avoir recours à la notion de contrainte équivalente de comparaison, dont l'effet équivaut au point de vue des dommages à l'état réel complexe Des contraintes dans le matériau. Une fois cette valeur de contrainte obtenue, on doit la vérifier par rapport à la contrainte admissible

III.11.5.1. Critère élastique pour les matériaux fragiles :

On utilise le critère de la contrainte normale maximale qui s'énonce ci-après :

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \text{ pour } \sigma_1 > 0$$

Si $\sigma_3 > \sigma_1$ on vérifie $\sigma_1 < F_t$ et $\sigma_3 < F_c$

Avec F_t : contrainte admissible en traction,

F_c : Contrainte admissible en compression

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Contraintes principales de pression, poids et dilatation, Ce qui pour l'état plan, donne les valeurs :

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left(\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \right) \leq F_t$$

$$\sigma_3 = \tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq F_c$$

Soit :
$$\sigma_1 = \frac{\text{moment idéal de flexion}}{I/V} \leq F_t$$

Où le moment idéal de flexion vaut :

$$M_{FI} = \frac{1}{2} M_F + \frac{1}{2} \sqrt{(M_F^2 + M_T^2)}$$

Pour l'état triple de tension (pression, poids, dilatation par exemple), on vérifie que :

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \sigma_l + \sigma_t + \sqrt{(\sigma_l - \sigma_t)^2 + 4\tau^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \sigma_l + \sigma_t - \sqrt{(\sigma_l - \sigma_t)^2 + 4\tau^2}$$

$$\sigma_3 = \sigma_t$$

Avec Sont inférieures aux valeurs de contrainte admissible F_t et F_c

III.11.5.2. Critères de plasticité des matériaux ductiles :

III.11.5.2.a. Critère de GUEST et TRESCA :

Appeler aussi critère de la contrainte de cisaillement maximal

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_E}{2}$$

Soit la contrainte admissible à la plastification est :

$$\sigma_c = \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_E$$

On service on a :

$$\sigma_c = \sigma_1 - \sigma_3 \leq f$$

Dans le cas d'une sollicitation simultanée de flexion et de torsion d'une section circulaire de tube, la contrainte dans les fibres les plus sollicitées, vaut

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$$

En remplaçant σ et τ par leur valeur :

$$\sigma = \frac{R_e}{I} \sqrt{M_{fr}^2 + M_t^2} \leq f$$

σ Aurait la même valeur sous l'action du moment résultant

$$M_r = \sqrt{M_{fr}^2 + M_t^2}$$

$$M_r = \sqrt{M_X^2 + M_Y^2 + M_Z^2}$$

III.11.5.2.b. Critère de VON MISES et HENCKY :

Appeler aussi critère de l'énergie de distorsion

$$\sigma_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_E$$

On service on a :

$$\sigma_c \leq f$$

Dans le cas d'une sollicitation simultanée de flexion et de torsion d'une section circulaire de tube, la contrainte dans les fibres les plus sollicitées, vaut

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma = \frac{R_e}{I} \sqrt{M_{fr}^2 + 0.75M_t^2} \leq f$$

Le moment résultant vaut :

$$M_r = \sqrt{M_{fr}^2 + 0.75 M_t^2}$$

Remarque : la théorie de cisaillement maximal (la plus utilisée dans le domaine des tuyauteries) est fréquemment prise comme une approximation conservatrice de la théorie de l'énergie de distorsion.

III.11.5.3. Addition des contraintes :

En règle générale, les codes de construction donnent des formulations qui consistent à additionner les contraintes relatives aux différents modes de sollicitations.

Cette façon de procéder a l'avantage de la simplicité. Si toutefois, on désire obtenir une formulation plus homogène, on compose directement l'ensemble des contraintes, suivant les critères précédents, ce qui fournit les résultats suivants :

III.11.5.3.a. La théorie de l'énergie de distorsion (VON MISES) :

$$\sigma_c = \sqrt{3\tau^2 + \sigma_l^2 + \sigma_t^2 - \sigma_l\sigma_t}$$

III.12. Approche analytique d'Analyse de stress sur les poutres simples :

Un système de tuyauterie est essentiellement un groupe de poutres reliées ensemble pour former la forme requise pour transporter des fluides d'un point à un autre, par conséquent, le comportement du faisceau est le comportement de base de l'analyse de contrainte du pipe.

III.12.1. Cas d'une poutre reposant sur une fondation élastique :

Dans le cas d'une poutre prismatique reposant toute sa longueur sur une fondation élastique, (cas d'une conduite enterré) de sorte que lorsque la poutre se déforme, l'intensité de la réaction en chaque section est uniformément répartie et proportionnelle à la déformation de cette section.

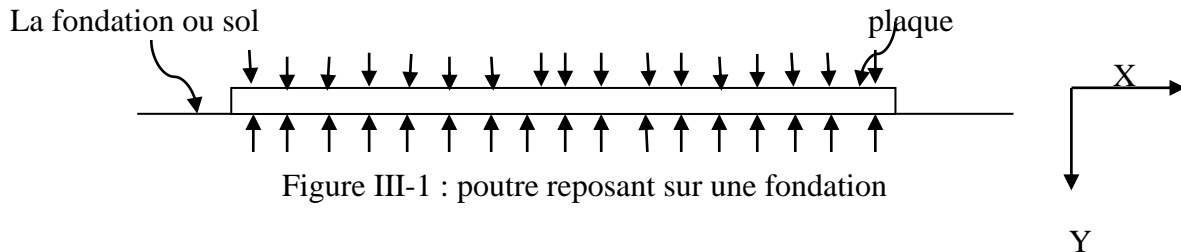


Figure III-1 : poutre reposant sur une fondation

Dans ce cas, on a la réaction du sol est répartie sur la fondation d'intensité égal à ky tel que $k = \text{const}$, appelée le module de la fondation, qui représente la réaction par unité de longueur lorsque $y = 1$ avec y est la valeur de la déformation (déplacement vertical)

L'équation différentielle de la déformé d'une poutre est :

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = q \dots \dots \dots (1.1)$$

E: Module d'élasticité longitudinal

I: Moment d'inertie de la section, de la poutre.

q: Charge répartie

De l'équation d'équilibre de la poutre de la figure 1, on a l'équation suivant :

$$q = -ky \dots \dots \dots (1.2)$$

De l'équation (1.1), et en tenant compte de l'équation (1.2) on a :

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = -ky \dots \dots \dots (1.3)$$

Ou bien :

$$\frac{d^4y}{dx^4} = -\frac{k}{EI} y$$

Après l'intégration de l'équation (III. 3) on obtient l'équation suivante :

$$y^4 + 4\beta y = 0 \quad \text{avec} \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

La solution générale de l'équation (1.1) est :

$$y = e^{\beta x}(A \cos(\beta x) + B \sin(\beta x)) + e^{-\beta x}(C \cos(\beta x) + D \sin(\beta x)) \dots \dots \dots (1.4)$$

Avec A, B, C, D sont des constantes d'intégration

III.12.2. Cas d'une force concentré appliqué sur une poutre de longueur infinie :

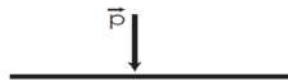


Figure III-2 : Force concentré sur une poutre de longueur infinie

L'origine des coordonnées est le point d'application de la force \vec{P} , dans notre cas, le système est symétrique .pour cela, il faut considérer seulement une seul partie de la charge, Considérant la partie droite :



Pour appliquer la solution générale (1.4) dans ce cas, il faut déterminer tout d'abord les constantes A, B, C, D.

Alors il est logique d'admettre que les déformations et la courbure sont nulles sur les points infinis. Cette condition ne sera remplie que si l'on donne aux constantes A, B de l'équation (1.4) une valeur nulle (A=B=0)

Ainsi, l'expression de la déformée de la partie droite de la poutre devient :

$$y = e^{-\beta x}(C \cos(\beta x) + D \sin(\beta x)) \dots \dots \dots (2.1)$$

Les constantes C et D doivent être déterminés à partir des conditions à l'origine(x = 0)

En ce point, la tangente à la déformation doit être horizontale, c'est-à-dire $\left(\frac{dy}{dx}\right)_{x=0} = 0$

De l'équation (2.5) on se trouve :

$$\frac{dy}{dx} = e^{-\beta x}((C \cos \beta x + D \sin \beta x - C \sin \beta x - D \cos \beta x))_{x=0} = 0$$

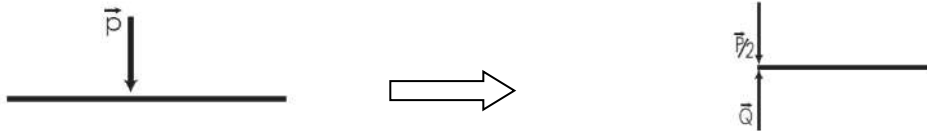
On déduit alors que :C = D

$$y = Ce^{-\beta x}(\cos(\beta x) + \sin(\beta x)) \dots \dots \dots (2.2)$$

Il nous reste à déterminer la valeur de la constante C à partir de la condition au point x= 0

.L'effort tranchant sur la partie droite de la poutre est égal à $\left(-\frac{P}{2}\right)$

Remarque : le signe moins résulte de la convention sur les signes des efforts tranchants



Donc $Q - \frac{P}{2} = 0$

On sait que $Q = \frac{dM}{dx} = -EI \left(\frac{d^3y}{dx^3} \right) \dots \dots \dots (2.3)$

De l'équation (2.2) et (2.3) et Pour $x = 0$ on a :

$$-\frac{P}{2} = -EI (4 \beta^3 C e^{-\beta x} \cos \beta x)_{x=0}$$

Donc on a $\frac{P}{2} = EI 4 \beta^3 C \quad C = \frac{P}{8 \beta^3 EI}$

Ainsi l'équation (2.2) prend la forme suivante :

$$y(x) = \frac{P}{8 \beta^3 EI} e^{-\beta x} (\cos(\beta x) + \sin(\beta x)) \dots \dots (2.4)$$

On a posé $\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{EI}} \Rightarrow \beta^4 = \frac{k}{EI}, \quad \beta^3 = \frac{\beta^4}{\beta} = \frac{k/EI}{\beta} = \frac{k}{\beta EI}$

D'où on obtient l'équation de la déformé $y(x)$:

$$y(x) = \frac{P\beta}{2k} e^{-\beta x} (\cos(\beta x) + \sin(\beta x)) \dots \dots \dots (2.5)$$

On peut aussi calculer le moment M_0 en utilisant l'équation suivante :

$$M_0(x) = -EI \frac{d^2y}{dx^2}$$

$$M_0(x) = -\frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\sin \beta x - \cos \beta x) \dots \dots (2.6)$$

III.12.3. Cas d'une force concentrée avec réaction répartie :

À travers la plaque, une charge extérieure est transmise au sol de la fondation tout en provoquant de son côté une réaction $Q(x)$, cette réaction est une force répartie même si à la surface de la plaque seulement une force concentrée est appliquée. Pour ce cas on utilise la méthode du coefficient de fondation.

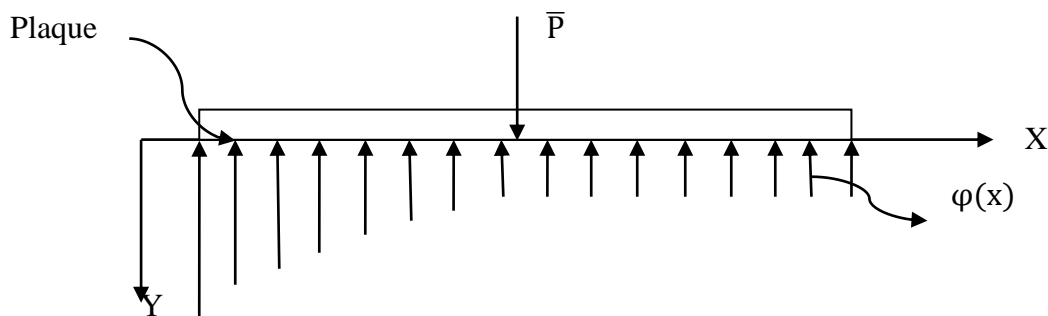


Figure III-3 : force concentré avec réaction répartie

La méthode du coefficient de fondation (k) est basée sur les hypothèses ci-après :

- La déformation y_s de la semelle est égale à la déformation de la surface de Fondation y_f , D'où on tire que $y_s(x) = y_f(x)$.
- L'équation de l'axe courbé de la construction peut être présentée sous la forme

$$D \frac{d^2y}{dx^2} = -M(x) \dots \dots \dots (3.1)$$

Ou $D = \frac{EI}{1-\mu^2}$: rigidité cylindrique

On prend en considération que :

$$\frac{\partial M}{\partial x} = Q \text{ et } \frac{\partial Q}{\partial x} = -q(x) \Rightarrow \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} = -q(x)$$

L'expression (2.1) peut être présentée sous la forme suivante :

$$D \frac{d^4y}{dx^4}(x) = q(x) = f(x) - \varphi(x) \dots \dots \dots (3.2)$$

Dans notre cas $q(x)$ sera égal à la différence entre la charge extérieure $f(x)$ et la réaction de la fondation $\varphi(x)$.

Les deux hypothèses posées sont insuffisant pour déterminer les grandeurs inconnues $y(x)$ et $\varphi(x)$.C'est pourquoi on prend encore une 3eme hypothèse

➤ Le tassement $y(x)$ est directement proportionnel aux forces $Q(x)$ qui agissent dans chaque section de la fondation et ne dépend pas des forces qui agissent dans les sections voisines, cette condition est sous forme :

$$\varphi(x) = bk y(x) \dots \dots \dots (3.3)$$

Ou :

b : La largeur de la plaque

k : Coefficient de proportionnalité (coefficient de fondation en N/cm^3)

De la condition (3), on a pour $b = 1$ et $y = 1$, la valeur de (k) est égal à la contrainte, qu'il faut appliquer à la fondation pour obtenir un tassement $Y=1$

En remplaçant dans la l'équation (3.2), $Q(x)$ par l'expression (3.3)

On obtient

$$\frac{d^4y}{dx^4} + 4\alpha y(x) = F(x) \dots \dots \dots (3.4)$$

Ou $\alpha = \sqrt[4]{\frac{kb}{4D}}$ et $F(x) = \frac{1}{D} f(x) \dots \dots \dots (3.5)$

Les contraintes de contact de la semelle de construction avec la surface de fondation dans beaucoup de cas peuvent être obtenues à partir de la résolution de l'équation homogène

$$\frac{d^4y}{dx^4} + 4\alpha^4 y(x) = 0 \dots \dots \dots (3.6)$$

L'intégrale générale de cette équation est sous forme :

$$y(x) = A_1 e^{\alpha x} \cos \alpha x + A_2 e^{\alpha x} \sin \alpha x + A_3 e^{-\alpha x} \cos \alpha x + A_4 e^{-\alpha x} \sin \alpha x \dots (2.7)$$

Ou bien

$$y(x) = A_1 Y_1 + A_2 Y_2 + A_3 Y_3 + A_4 Y_4 \dots (3.8)$$

Avec :

A_1, A_2, A_3, A_4 : des constantes d'intégrations

Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 : Les fonctions de KRILOV

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = \cos(\alpha x) \operatorname{ch}(\alpha x) \\ Y_2 = \frac{1}{2} (\sin \alpha x \operatorname{ch} \alpha x + \cos \alpha x \operatorname{sh} \alpha x) \\ Y_3 = \frac{1}{2} \sin \alpha x \operatorname{sh} \alpha x \\ Y_4 = \frac{1}{4} (\sin \alpha x \operatorname{ch} \alpha x - \cos \alpha x \operatorname{sh} \alpha x) \end{array} \right. \quad \text{Les équations (3.9)}$$

Les moments de flexion, les efforts tranchants et les réactions de la fondation sont déterminés par les expressions suivantes :

$$M(x) = -D \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$Q(x) = -D \frac{d^3 y}{dx^3}$$

$$\varphi(x) = bky(x)$$

III.12.4. Construction d'une rigidité fini d'une longueur limites :

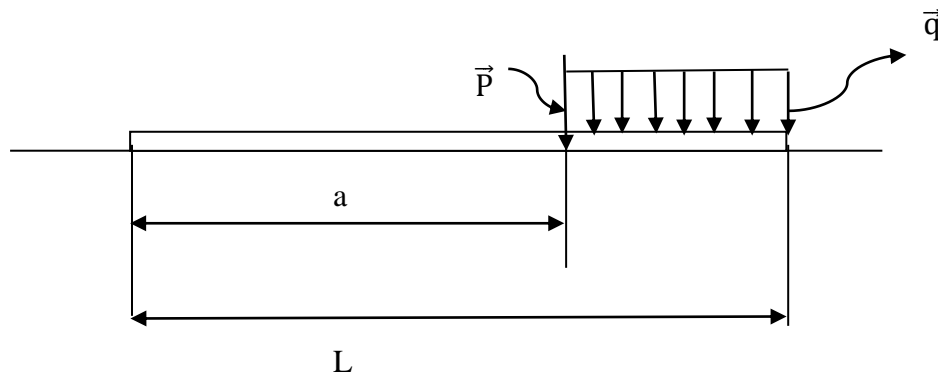


Figure III.4-poutre d'une rigidité fini d'une longueur limite

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = A_1 Y_1 + A_2 Y_2 + A_3 Y_3 + A_4 Y_4 \\ \delta(x) = \frac{dy}{dx} = A_1 Y_1' + A_2 Y_2' + A_3 Y_3' + A_4 Y_4' \\ -\frac{1}{D} M(x) = \frac{d^2 y}{dx^2} = A_1 Y_1'' + A_2 Y_2'' + A_3 Y_3'' + A_4 Y_4'' \\ -\frac{1}{D} Q(x) = \frac{d^3 y}{dx^3} = A_1 Y_1''' + A_2 Y_2''' + A_3 Y_3''' + A_4 Y_4''' \end{array} \right. \quad \text{Les équations (4.1)}$$

avec

$\delta(x)$: Angle de rotation de la section x

$M(x), Q(x)$: Moment de flexion et effort tranchant dans la section x

Concédérons d'abord le cas, lorsque 'il y a seulement la force concentré \vec{P} , qui est appliquée sur la semelle

En tenant compte de la formule (3.8) et pour $x = 0$, on obtient les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} y(0) = A_1 \text{ parce que } Y_2(0) = Y_3(0) = Y_4(0) = 0 \\ \delta(0) = \alpha A_2 \text{ parce que } Y_1'(0) = Y_3'(0) = Y_4'(0) = 0 \\ -\frac{1}{D} M(0) = \alpha^2 A_3 \text{ parce que } Y_1''(0) = Y_2''(0) = Y_4''(0) = 0 \\ -\frac{1}{D} Q(0) = \alpha^3 A_4 \text{ parce que } Y_1'''(0) = Y_2'''(0) = Y_3'''(0) = 0 \end{array} \right. \quad \text{Les équations (4.2)}$$

Vu qu'à l'extrémité de la semelle ($x = 0$), il n'y a pas de charge, alors

$$M(0) = Q(0) = 0$$

Et par conséquent $A_3 = A_4 = 0$

Ainsi les équations (4.1) en tenant compte des équations (4.2) et aussi du fait des équations de KRILOV

Y	Y'	Y''	Y'''	Y''''
Y ₁	-4αY ₄	-4α ² Y ₃	-4α ³ Y ₂	-4α ⁴ Y ₁
Y ₂	αY ₁	-4α ² Y ₄	-4α ³ Y ₃	-4α ⁴ Y ₂
Y ₃	αY ₂	α ² Y ₁	-4α ³ Y ₄	-4α ⁴ Y ₃
Y ₄	αY ₃	α ² Y ₂	α ³ Y ₁	-4α ⁴ Y ₄

On obtient

$$\left\{ \begin{array}{l} y(x) = y(0)Y_1 + \frac{1}{\alpha} \delta(0)Y_2 \\ \delta(x) = \frac{dy}{dx} = -4\alpha y(0)Y_4 + \delta(0)Y_1 \\ -\frac{1}{D} M(x) = -4\alpha^2 y(0)Y_3 - 4\alpha \delta(0)Y_4 \\ -\frac{1}{D} Q(x) = -4\alpha^3 y(0)Y_2 - 4\alpha^2 \delta(0)Y_3 \end{array} \right. \quad \text{Les équations (4.3)}$$

Écrivons la première des équations (4.3) sous la forme

$$y(x) = F_0(x) = y(0)Y_1 + \frac{1}{\alpha} \delta(0)Y_2 \dots (4.4)$$

Le sens de cette équation est que dans toute la partie (a) de la (figure III-4) les déplacements, les moments de flexion et les efforts tranchants se produisent sous l'influence de $y(0)$ et $\delta(0)$ qui sont considéré comme paramètres initiaux.

En considérant les déformations $y(x)$ dans les sections $x > 0$ et en tenant compte de l'influence de \vec{P} et q

Maintenant, on prend en considérations l'influence de la charge P , pour cela il est nécessaire d'ajouter $\phi(x)$ à l'équation (4.4)

$$y(x) = F_0 + \phi(x) \dots (4.5)$$

La fonction $\phi(x)$ doit satisfaire l'équation (3.6) ainsi qu'elle doit être nulle sur la partie (a) de (la figure III-4)

En plus dans la section $x = 0$ doit être satisfait la condition de continuité, de telles conditions satisfont la fonction

$$\phi(x) = \frac{P}{D\alpha^3} Y_4(x - a) \dots (4.6)$$

En tenant compte des équations (4.5) et (4.6), on obtient les équations ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta(x) = F_0'(x) + \phi'(x) \\ M(x) = -D[F_0''(x) + \phi''(x)] \\ Q(x) = -D[F_0'''(x) + \phi'''(x)] \end{array} \right. \text{Les équations (4.7)}$$

En utilisant les conditions aux frontières sur l'autre extrémité ($x = L$) on obtient les équations permettant de déterminer les paramètres initiaux $y(0)$ et $\delta(0)$.

Utilisant la figure(1), au point $x = L$, on a $M_L = Q_L = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_0''(L) + \phi''(L) = 0 \\ F_0'''(L) + \phi'''(L) = 0 \end{array} \right. \quad \text{Les équations (4.8)}$$

Remarque : dans la section, au point $x = L$, s'il y avait un moment M_1 et une force Q_1

$$\left\{ \begin{array}{l} F_0''(L) + \phi''(L) = \frac{M_1}{D} \\ F_0'''(L) + \phi'''(L) = \frac{Q_1}{D} \end{array} \right. \quad \text{Les équations (4.9)}$$

En se basant sur le système d'équations (4.8) et en tenant compte des données du tableau de KRILOV, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} y(0)Y_3(L) + \frac{1}{\alpha}\delta(0)Y_4(L) = \frac{1}{4\alpha^2}\phi''(L) \\ y(0)Y_2(L) + \frac{1}{\alpha}\delta(0)Y_3(L) = \frac{1}{4\alpha^3}\phi'''(L) \end{array} \right. \quad (4.10)$$

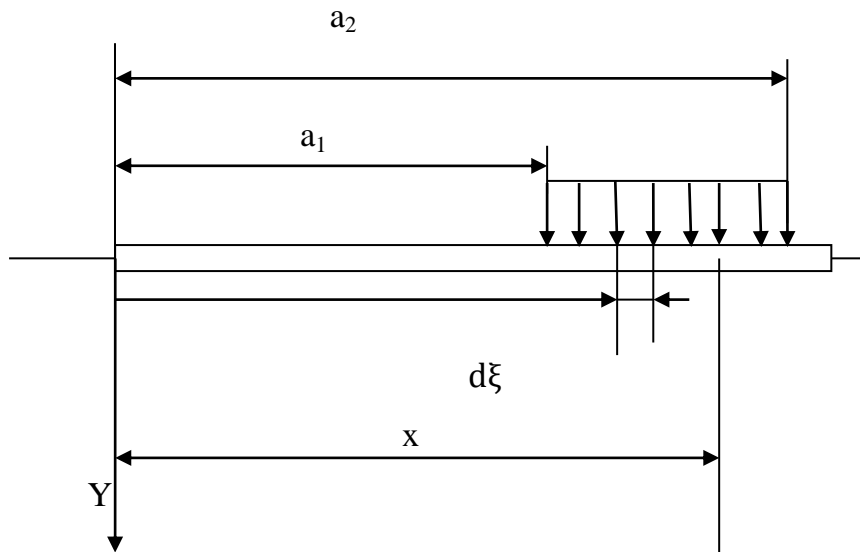
En résolvant le système (4.10), on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} y(0) = \frac{CY_3(1) - BY_4(1)}{Y_3^2(1) - Y_2(1)Y_4(1)} \\ \delta(0) = \alpha \frac{BY_3(1) - CY_2(1)}{Y_3^2(1) - Y_2(1)Y_4(1)} \end{array} \right. \quad (4.11)$$

Ou $B = \frac{1}{4\alpha^3} \phi'''(L)$ et $C = \frac{1}{4\alpha^2} \phi''(L)$

Ayant calculé $y(0)$ et $\delta(0)$, on les introduit dans l'équation (4.4) qui est valable pour $(x \leq a)$

Considérons maintenant l'influence de la charge uniformément répartie (q) dans les limites $a_1 \leq x \leq a_2$



Dans notre cas, il est nécessaire de trouver la fonction $\phi_q(x)$, qui tient compte de l'influence de q . On considère que la charge répartie est formé d'un ensemble des charges $q d\xi$.

On intègre l'équation (4.6) dans les limites de a_1 à a_2 pour $p = q d\xi$ et On obtient :

$$\phi_q(x) = \frac{q}{D\alpha^3} \int_{a_1}^{a_2} Y_4(x - \xi) d\xi = \frac{q}{k_0 b} [Y_1(x - a_2) - Y_1(x - a_1)] \dots \dots (4.12)$$

Finalement pour une force concentrées et une charge uniforme répartie dans les limites $[a_1, a_2]$ on a :

$$\phi(x) = \phi_p(x) + \phi_q(x) \dots \dots \dots (4.13)$$

L'expression de l'équation $\phi(x)$ obtenue est celle à introduire dans la partie droite du système d'équations (4.10)

Dans le cas de la figure(1), Pour $x = l$ on aura l'équation (4.12) sous la forme

$$\phi_q(x) = \frac{q}{k_0 b} [1 - Y_1(l - a_1)] \dots \dots \dots (4.14)$$

III.13. Analyse de stress d'un réseau de tuyauterie :

Un réseau de tuyauterie doit être conçu pour résister aux sollicitations engendrées par les chargements d'origine statique ou dynamique.

Le but principal de l'analyse de flexibilité est la vérification des forces et moments appliqués sur les ouvrages concentré. Pour ce faire, il est nécessaire de satisfaire les critères d'acceptation suivant :

- La contrainte calculé doit être inférieure a la contrainte admissible définie selon le code de calcul appliquée.
- Les efforts (forces et moments) doivent être inférieurs aux efforts admissibles appliqués aux équipements connexes.
- Les efforts (forces et moments) doivent être inférieurs aux efforts admissibles appliqués aux équipements de supportage

III.13.1. Vérification des contraintes primaires :

La contrainte σ_1 est engendrée par les charges permanentes due au moment résultant M_{RA} qui doit satisfaire l'équation suivante :

$$\sigma_1 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{0.75 \cdot i \cdot M_{RA} \cdot R_e}{I} < f$$

La contrainte σ_2 est engendrée par les charges occasionnelles ou exceptionnelles associées aux charges permanentes due au moment résultant ($M_{RA} + M_{RB}$)

$$\sigma_2 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{0.75 \cdot i \cdot (M_{RA} + M_{RB}) \cdot R_e}{I} < K_f$$

M_R : Le moment résultant Avec $M_R = (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)$

$K = 1$: Lorsque la durée d'application (DA) de la charge est supérieure à 10 % de toute période de service de 24 h.

$K = 1,15$: Lorsque $DA < 10\%$ de toute période de service de 24 h.

$K = 1,2$: Lorsque $DA < 1\%$ de toute période de service de 24 h.

$K = 1,3$: Pour les charges exceptionnelles très peu probables notamment les charges dues à la neige et au vent dont les valeurs sont égales ou supérieures à 1,75 fois les valeurs normales.

$K = 1,8$: Pour les charges correspondantes au séisme majoré de sécurité (SMS)

Méthode alternative de vérification des contraintes primaire :

Dans le cas des pièces concentré (courbes et dérivations), on utilise les facteurs d'intensification dans le plan i_0 et hors du plan de flexion i_i , l'expression du moment résultant devient :

$$M_{RA} = [(75I_i M_i)^2 + (0.75I_0 M_0)^2 + M_t^2]^2$$

Avec M_{RA} : le moment de torsion

$$M_{RB} = (M_i^2 + M_0^2)^{1/2}$$

Ainsi les critères d'admissibilité deviennent :

$$\sigma_1 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{M_{RA} \cdot R_e}{I} < f$$

$$\sigma_2 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{M_{RB} R_e}{I} < K_f$$

III.13.2. Vérification de la contrainte secondaire

La contrainte σ_3 , est engendrée par la dilatation thermique due au moment résultant M_{RC} qui doit satisfaire l'équation suivante :

$$\sigma_3 = \frac{iM_{RC}R_e}{I} \leq u f_a$$

Méthode alternative de vérification des contraintes secondaires :

$$\sigma_3 = \frac{\sqrt{((I_i M_i)^2 + (I_0 M_0)^2 + M_t^2 R_e)}}{I} \leq u f_a$$

Ou

$$f_a = 1.25 f_{froid} + 0.25 f_{chaud}$$

u : Coefficient de réduction en fonction du nombre de cycles

Lorsque la condition $\sigma_3 \leq u f_a$ n'est pas satisfaite, on vérifie la somme des contraintes primaires et secondaires

Vérification de la somme des contraintes primaires et secondaires σ_4 :

La contrainte σ_4 due aux moments M_{RA} et M_{RC} , doit satisfaire la condition

Ci-après :

$$\sigma_4 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{0.75 \cdot i \cdot M_{RA} \cdot R_e}{I} + \frac{i M_{RC} R_e}{I} \leq u(f_a + f)$$

III.13.3. Vérification de la somme des contraintes primaires plus secondaires :

La contrainte σ_4 due aux moments M_{RA} et M_{RC} , doit satisfaire

$$\sigma_4 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{0.75 \cdot i \cdot M_{RA} \cdot R_e}{I} + \frac{i M_{RC} R_e}{I} \leq u(f_a + f)$$

III.13.4. Vérification des contraintes à chaud dans le domaine du fluage :

Pour les tuyauteries en service à une température correspondante au domaine du fluage, la contrainte σ_5 est due à la pression intérieure P_i , au moment résultant M_{RA} engendré par le poids et part les autres charges permanentes, et au moment résultant M_{RC} engendré par la dilatation thermique et les charges variables, σ_5 doit satisfaire :

$$\sigma_5 = \frac{P_i D_m}{4e} + \frac{0.75 \cdot i \cdot M_{RA} \cdot R_e}{I} + \frac{i M_{RC} R_e}{3I} \leq f$$

III.13.5. Vérification des contraintes dues à un mouvement unique non répété :

Lorsque la contrainte à calculer est indépendante des caractéristiques de fluage, la contrainte σ_6 due au moment résultant M_{RD} engendré par un mouvement non répété doit satisfaire l'équation :

$$\sigma_6 = \frac{i M_{RD} R_e}{I} \leq \text{Min}(3f, 2R_e)$$

III.14. La méthode analytique de calcul de stress :

La charge par centimètre linéaire de tube est :

$$P = C \Delta D_e^2 + P_t + P_f + Q_s$$

Soit une charge au cm^2 de :

$$P_0 = \frac{P}{D_e}$$

Le module de résistance d'1 cm de tube est :

$$\frac{I}{V} = \frac{e^2}{6}$$

Avec e (cm) épaisseur du tube

Le poids du fluide est :

$$P_f = \frac{\pi(D_e - 2e_0)^2}{4} * \text{poids volumique}$$

Le poids du tube est :

$$P_t = \pi(D_m e_0) * \text{poids volumique}$$

La Surface de la charge supérieure :

$$S_s = L_x * L_y$$

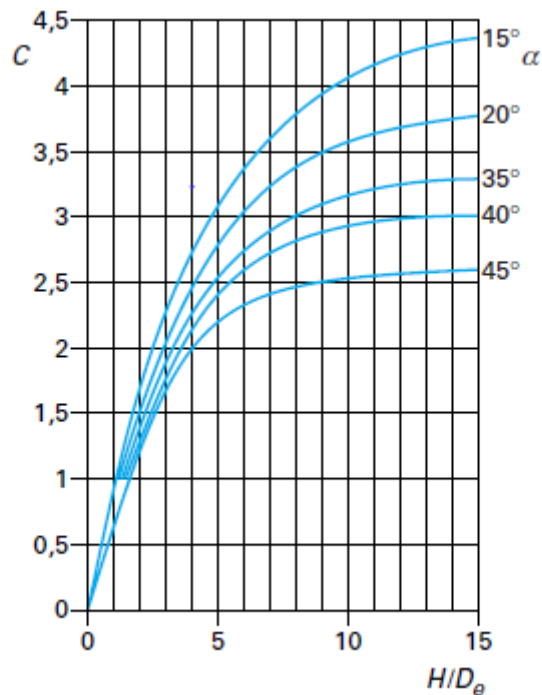
Surface de la charge inférieure :

$$S_i = [L_y(1.4 * H + L_x)] + [(1.4 * H * L_x) + (1.54 * H^2)]$$

La charge sur 1 cm de tube est :

$$Q_s = \left(D_e * N * \frac{S_s}{S_i} \right) \quad (daN/cm)$$

Le rapport $\frac{H}{D_e}$ est tiré de graphe ci-après :



La charge totale pour 1 cm de longueur de tube est :

$$P = c * \gamma * D_e + P_{\text{tube}} + P_{\text{fluide}} + Q_s$$

Soit la charge totale :

$$P_0 = \frac{P}{D_e} (daN/cm^2)$$

La pression critique est :

$$P_c = \frac{(E * e_{\text{min}}^3)}{(4 * R_e^3)}$$

III.14.1. Le module de réaction horizontal du sol est :

Pour les sols argileux :

$$F_1 = \frac{K_{s1}}{D_e}$$

K_{s1} : Argile compacté 50 à 100 daN/cm²

: Très compacte 100 à 200 daN/cm²

: Dure 300 daN/cm²

Donc Pour les sols sablonneux :

$$F_2 = \eta_h \frac{3H}{D_e}$$

Valeurs de η_h :

Sable sec ou humide, non tassé 0,22 daN/cm³

Moyennement tassé 0,68 daN/cm³

Bien tassé 1,8 daN/cm³

Sable noyé non tassé 0,13 daN/cm³

Moyennement tassé 0,45 daN/cm³

Bien tassé 1,1 daN/cm

Il est prudent d'envisager que la conduite rencontrera différents terrains. On pourra donc adopter les valeurs ci-dessous :

$$F = \frac{F_1 + F_2}{2}$$

Avec : $F_1 = \frac{75}{D_e}$ et $F_2 = 0.68 * \frac{3H}{D_e}$

III.14.2. Contrainte transversale de la paroi due à la flexion :**Cas du berceau à 60° :**

On pose :

$$L = P_c + P_i + 0.233 FR_e$$

Avec

F : Module du sol

Le moment de flexion a pour valeur :

À la génératrice supérieure :

$$M_f = 0.286 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.101P_i - 0.0021FR_e)}{L}$$

Sur l'axe horizontal :

$$M_f = -0.294 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.051P_i - 0.0226FR_e)}{L}$$

à la génératrice inférieure (moment maximal) :

$$M_f = -0.378 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.167P_i - 0.055FR_e)}{L}$$

Cas du berceau à 90°

On pose :

$$L = P_c + P_i + 0.233 FR_e$$

Avec

F : Module du sol

Le moment de flexion a pour valeur :

À la génératrice supérieure :

$$M_f = 0.274 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.051P_i - 0.0042FR_e)}{L}$$

Sur l'axe horizontal :

$$M_f = -0.280 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.029P_i - 0.0124FR_e)}{L}$$

À la génératrice inférieure (moment maximal) :

$$M_f = 0.314 P_0 R_e^2 \frac{(P_c + 0.083P_i - 0.334FR_e)}{L}$$

Cas du berceau à 120°

On pose :

$$L = P_c + P_i + 0.183FR_e$$

Avec

F : Module de la sole

Le moment de flexion a pour valeur :

À la génératrice supérieure :

$$M_f = 0.262 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.019 P_i - 0.0118 F R_e)}{L}$$

Sur l'axe horizontal :

$$M_f = -0.266 P_0 R_e^2 \frac{(P_c - 0.004 P_i - 0.0247 F R_e)}{L}$$

à la génératrice inférieure (moment maximal) :

$$M_f = 0.276 P_0 R_e^2 \frac{(P_c + 0.033 P_i - 0.0205 F R_e)}{L}$$

Dans tous les cas, la contrainte sera :

$$\sigma = \frac{M_f}{I/V}$$

Contrainte transversale due à la pression :

$$f = \frac{\frac{P D_e}{2 e_0} - \frac{P}{2}}{Z}$$

III.14.3. Contrainte globale :

Les deux contraintes précédentes étant transversales, nous les ajoutons pour avoir la contrainte globale :

$$\sigma_g = f + \sigma$$

La démarche analytique suivis pour la limitation des contraintes est basé sur l'utilisation des codes, mais Les principales difficultés de ce type de calcul résident dans l'interaction sol/tuyau et en particulier pour la détermination de la charge due aux remblais. Les charges extérieures agissant sur la conduite enterrée, relevant des théories insuffisamment précisées de la mécanique des sols .qui sont liées à des paramètres très nombreux et évolutifs dans le temps.

Pour une amélioration des résultats, des logiciels informatisés spécialisé pour ce type de tuyauterie et en particulier le logiciel **CAESAR II** qui a prouvé la qualité des résultats d'analyse.

III.15. Description du Logiciel CAESAR II :

CAESAR II est un logiciel de calcul et d'analyse de stress dans des conditions statiques et dynamiques des systèmes de n'importe quelle complexité de tuyauterie développé par INTERGRAPH pour satisfaire les besoins des compagnies impliquées dans la conception de tuyauteries industrielles.

C'est un logiciel Flexible et techniquement reconnu pour la qualité de ces résultats, Depuis son introduction en 1984 jusqu'à la sortie de sa dernière version CAESAR II en 2017, il est devenu le logiciel de flexibilité et d'analyse du stress le plus couramment utilisé au monde. Ce logiciel constitue la référence en matière d'analyse de contrainte et permet d'évaluer les réponses et les efforts structuraux des réseaux de tuyauterie ainsi de vérifier leur dimensionnement en conformité avec les principaux codes utilisés dans l'industrie.

CAESAR II permet de développer rapidement les modèles d'analyse, il indique aussi clairement les zones à problèmes et dispose également de modèles de contrainte à code de couleur et des déplacements animés pour les différents cas de charges. de plus César II est premier et le seul qui possède un lien bidirectionnel de l'industrie entre la conception de l'usine CAO et l'analyse technique. Ce lien vers CADWorx Plant permet le passage de données de conception et d'analyse entre ces paquets sans perte de données.

Les domaines d'application du logiciel CAESAR II sont :

- Conception d'installation, Tuyauterie et équipement
- Pétrochimie, Chimie et énergie
- Service de construction et architecture

Description du code ASME B31.8 :

L'ASME b 31.8 est le code le plus couramment utilisé pour la conception, l'exploitation, l'entretien et la réparation des pipelines de distribution et de transmission du gaz naturel. Ce code couvre également les aspects de sécurité de l'exploitation et de l'entretien de ces installations.

III.16. Formules de calcul considéré par logiciel CAESER II :

La première étape de l'analyse est le calcul de l'épaisseur minimale requise pour la tenue à la pression intérieure :

$$e_{\min} = \frac{P_i D_m}{2fZ} + a$$

a : surépaisseur (tolérance de fabrication et corrosion)

Z : coefficient de joint longitudinal soudé (efficacité) suivant contrôle CND.

- $Z = 0,7$ si pas de contrôle
- $Z = 0,85$ (si 10 % contrôle)
- $Z = 1$ (100 % contrôle)

Une bonne pratique consiste à considérer $e_{\min} > \frac{D_m}{100}$

La contrainte circonférentielle de pression :

$$\sigma_c = \frac{P_i * D_m}{2(e_n - a)}$$

Les allongements unitaires sont déduits de la loi de Hooke :

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_c - \nu \sigma_{lp}) = \frac{\sigma_c}{E} \left(1 - \frac{\nu}{2}\right)$$

$$\varepsilon_p = \frac{1}{E} (\sigma_{lp} - \nu \sigma_c) = \frac{\sigma_c}{E} (0,5 - \nu) = \frac{0,2 \sigma_c}{E}$$

Avec ν coefficient de contrainte latérale (coefficient dePoisson), $\nu = 0,3$ pour l'acier

Une conduite posée dans le sol voit intervenir le frottement sol/tube lorsqu'elle se trouve soumise à des déplacements, c'est le cas, en particulier, lorsque des variations de température surviennent entre la pose et le service

- À libre dilatation, l'augmentation de longueur de la conduite posée sur le sol est proportionnelle au changement de température Δt , au coefficient de dilatation α et à la longueur du tronçon L :

$$\Delta L = \alpha \Delta t L$$

Si en tient compte de la pression

$$\Delta L = \alpha \Delta t L + \left[\frac{0,2 \sigma_c L}{E} \right]$$

- À la dilatation ployé : la force de l'encrage est :

$$F_a = A_s E a \Delta t$$

En tenant compte de la pression intérieure, on a :

$$F_a = A_s (E a \Delta t + 0.2 \sigma_c)$$

La contrainte axiale (longitudinale) σ_l ne dépend que des caractéristiques du matériau

$$\sigma_l = -E a \Delta t$$

Et en tenant compte de la pression intérieure, on a :

$$\sigma_l = -E a \Delta t + \nu \sigma_c$$

La contrainte équivalente suivant le critère de TRESCA est :

$$\sigma_{eq} = 2 \tau_{max} = \sqrt{(\sigma_c - \sigma_l)^2 + 4\tau^2}$$

τ : Contrainte de cisaillement.

La conduite enterrée est entourée par le sol qui exerce sur elle une pression. Lorsque la conduite bouge dans le sol, des forces de frottement sont créées dont l'importance est déterminée par le coefficient μ (sol/tube).

Les valeurs de (μ) peuvent être considérées suivant la nature du sol :

- Pour la vase et l'argile $\mu=0.3$
- Pour le sable $\mu=0.4$
- Pour les graviers $\mu=0.5$

La force axiale de frottement par unité de longueur est :

$$f_f = \mu [(2\gamma D_m H) + w_p]$$

Avec :

H :Hauteur de couverture de la conduite enterrée (minimum 0,8 à 1 m).

La force opposée par le sol au déplacement est :

$$Q = \gamma(H + D_m)^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) D_m$$

La résistance du sol est :

$$U = \frac{1}{2} \gamma(H + D_m)^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

Le sol est assimilé à un ressort de constante :

$$K = \frac{U}{0.015(H + D_m)}$$

0,015 m⁻¹ : le coefficient de déformation ultime du sol

La longueur active (longueur de frottement) L_f est :

$$L_f = \frac{F_a - Q}{f_f}$$

Le déplacement final Y_1 :

$$y_1 = \frac{1}{2A_s E F_f} (F_a - Q)^2$$

Le déplacement Y_2 :

$$\beta = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{1/4} \quad \text{Et} \quad C = F_a + \frac{\beta A_s E F_f}{k} \text{ et } Q' = C - \sqrt{C^2 - F_a^2}$$

Donc Y_2 devient :

$$y_2 = \frac{Q' \beta}{k}$$

Détermination du moment de flexion :

$$M_f = \frac{Q'}{2\beta}$$

Calcul de la contrainte liée ou moment :

$$\sigma = \frac{M_f}{\frac{I}{v}}$$

III.17. Exemple de calcul permettant l'analyse analytique du stress d'un tronçon :

Soit une canalisation en acier placée dans le sable, a la sortie d'une station de compression de diamètre extérieur, $D_{ext} = 508$ mm, transportant du gaz à une pression intérieure $P_i = 83$ bar (8.3 MPA) associée à une température de 80 °C, la température de pose étant de 10 °C, donc une $\Delta t = 70$ °C.

- La limite d'élasticité du matériau $\sigma_E = 365$ MPA
- La contrainte admissible $f = 0.72 * 365 = 262.8$ MPA
- Le facteur d'efficacité des joints soudés est $Z = 1$.
- La hauteur de couverture $H = 1,2$ m.
- Le poids volumique du terrain est $\gamma = 1\ 800$ daN/m³.
- L'angle interne de frottement du sol est $\Phi = 30^\circ$.
- le module d'élasticité $E = 2 * 10^5$ MPa = $2 * 10^{10}$ daN/m
- Le poids du tube, fluide et revêtement $w_p = 303$ daN/m,
- le coefficient de frottement de l'acier sur le sable $\mu = 0,4$,
- le moment d'inertie de la section droite du tube $I = 46\ 323 * 10^{-8}$ m⁴
- le module d'inertie de la section droite du tube $\frac{I}{V} = 0,018\ 24$ m³
- le coefficient de dilatation de l'acier $\alpha = 1,2 * 10^{-5}$ °C⁻¹
- le coefficient de poisson de l'acier $\nu = 0,3$.

L'épaisseur minimale requise pour tenir à la pression intérieure :

$$e_{min} = \frac{P_i D_m}{2fZ} = \frac{3.8 * 508}{2 * 262.8 * 1} = 8.022 \text{ mm}$$

Nous choisissons une épaisseur normalisée $e_n = 8,74$ mm

La contrainte circonférentielle de pression est :

$$\sigma_c = \frac{P_i * D_m}{2(e_n - a)} = \frac{8.3 * 508}{2(8.74 - 0)} = 241.2 \text{ MPa}$$

La contrainte longitudinale de compression à dilatation bloquée vaut :

$$\sigma_l = -E \alpha \Delta t + \nu \sigma_c = -(2 * 10^5 * 1.2 * 10^{-5} * 70) + 0.3 * 241.2$$

$$\sigma_l = -95.64 \text{ MPa}$$

La contrainte équivalente suivant le critère de TRESCA vaut :

$$\sigma_{eq} = 2 \tau_{max} = \sqrt{(\sigma_c - \sigma_l)^2 + 4\tau^2}$$

Puisque $\tau = 0$

$$\sigma_{eq} = \sigma_c - \sigma_l = 241.2 + 95.64$$

$$\sigma_{eq} = 336.84 \text{ MPa}$$

σ_{eq} : Est à comparer à la valeur admissible de $0.9\sigma_E = 0.9 * 365 = 328,5 \text{ MPa}$, Cette valeur étant inacceptable, il convient d'augmenter l'épaisseur. Nous prendrons l'épaisseur normalisée immédiatement supérieure $e_n = 9,57 \text{ mm}$

Nous obtenons alors :

$$\sigma_c = 220.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_l = -101.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = 322.2 \text{ MPa}$$

La valeur de σ_{eq} est acceptable.

Nous pouvons alors calculer les grandeurs suivantes :

$$F_a = A_s (E a \Delta t + 0.2 \sigma_c)$$

$$F_a = \pi D_m e_n (E a \Delta t + 0.2 \sigma_c)$$

$$F_a = 3.1416 * 0.57 * [(0.2 * 220.3) + (2 * 10^5 * 1.2 * 10^{-5} * 70)]$$

$$F_a = 3238801 \text{ N}$$

Calcul de l'allongement unitaire (expansion thermique) :

$$\varepsilon_t = a \Delta t \varepsilon_t = 1.2 * 10^{-5} * 70 \varepsilon_t = 0.0008 \text{ m/m} \quad (0.84 \text{ mm/m})$$

$$\varepsilon_p = \frac{0.2 \sigma_c}{E} \varepsilon_p = \frac{0.2 * 220.3}{2.10^5} \varepsilon_p = 0.002 \text{ m/m} \quad (0.22 \text{ mm/m})$$

$$f_f = \mu [(2\gamma D_m H) + w_p] f_f = 0.4 [(2 * 1800 * 0.508 * 1.2) + 303]$$

$$f_f = 999 \text{ daN/m}$$

$$Q = \gamma(H + D_m)^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) D_m Q = \left[\frac{1800}{2} * (1.2 + 0.508)^2 * \tan 60^2 * 0.508 \right]$$

$$Q = 4001.3 \text{ daN}$$

$$L_f = \frac{F_a - Q}{f_f} L_f = \frac{323\,880 - 4001}{999} L_f = 320.2 \text{ m}$$

$$y_1 = \frac{1}{2A_s E F_f} (F_a - Q)^2 y_1 = \frac{1}{2 * 0.015\,273 * 2 * 10^{10} * 999} * (323\,880 - 4001)^2$$

$$y_1 = 0.1677 \text{ m} = 167.7 \text{ mm}$$

$$U = \frac{1}{2} \gamma(H + D_m)^2 \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) U = \frac{1}{2} * 1800 * (1.2 + 0.508)^2 * \tan 60^2$$

$$U = 7876.6 \text{ daN}$$

$$K = \frac{U}{0.015(H + D_m)} K = \frac{7876.6}{0.015 * (1.2 + 0.508)}$$

$$K = 307\,440 \text{ daN/m}$$

$$B = \left(\frac{k}{4EI} \right)^{1/4} \quad \beta = \left(\frac{307\,440}{4 * 2 * 10^{11} * 46323 * 10^{-8}} \right)^{1/4} \quad \beta = 0.3018$$

$$C = F_a + \frac{\beta A_s E F_f}{k} \quad C = 323\,880 + \frac{0 * 2 * .3018 * 0.015\,273 * 2 * 10^{10} * 999}{307\,440}$$

$$C = 623\,436 \text{ daN}$$

$$Q' = C - \sqrt{C^2 - F_a^2} Q' = 623\,436 - \sqrt{623\,436^2 + 323\,880^2} Q' = 90\,731 \text{ daN}$$

$$y_2 = \frac{Q' \beta}{k} y_2 = \frac{90\,731 * 0.3018}{307\,440} y_2 = 0.0891 \text{ m soit } 89.1 \text{ mm}$$

$$M_f = \frac{Q'}{2\beta} M_f = \frac{90\,731}{2 * 0.3018} M_f = 150\,317 \text{ daN}$$

$$\sigma = \frac{M_f}{\frac{I}{v}} \quad \sigma = \frac{150\,317}{0.001\,824} \quad \sigma = 824 \text{ MPa}$$

Les contraintes calculées sous l'effet des chargements thermiques n'associées à celui de la pression intérieure soit $\sigma_f = 824 \text{ MPa}$ sont inacceptables vis-à-vis du critère sur la contrainte totale qui doit être inférieure à $0,9\sigma_E$ soit $328,5 \text{ MPa}$.

III.18. L'analyse de stress sous logiciel CAESARII :**III.18.1. Scenarios de simulations des combinaisons de charges :**

Pour vérifier l'analyse de stress sur le pipeline on doit combiner plusieurs cas de charge comme suit :

Scénarios de base :

OPE : W+T1+P1 (Charge +Température +Pression)

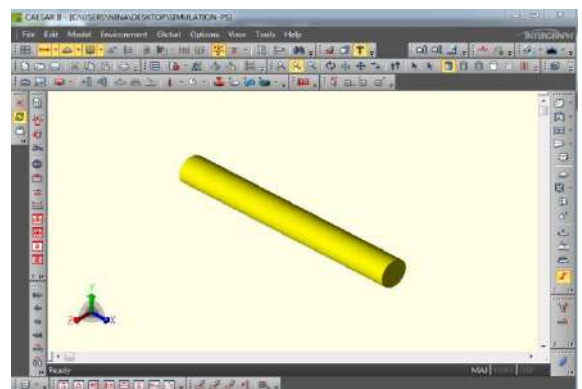
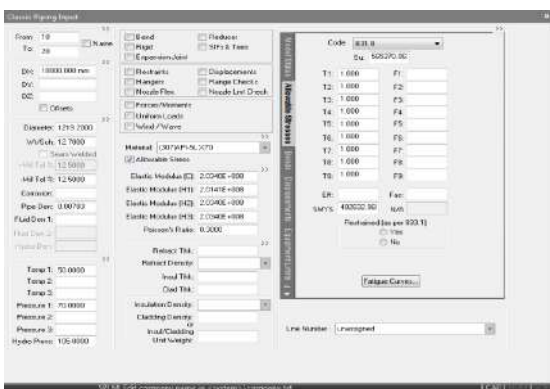
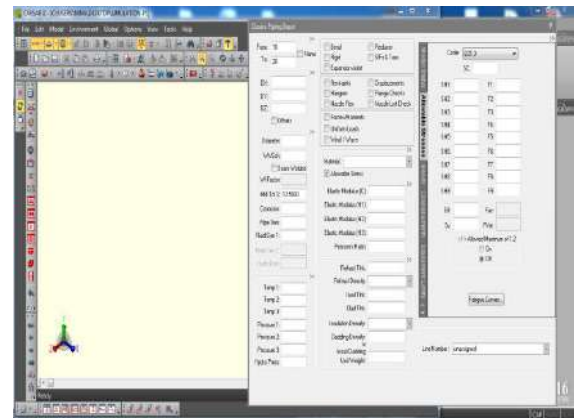
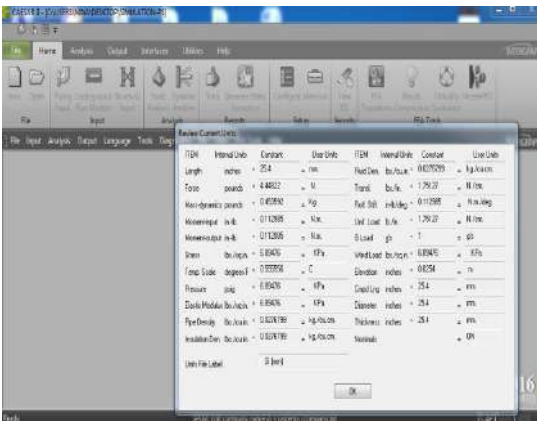
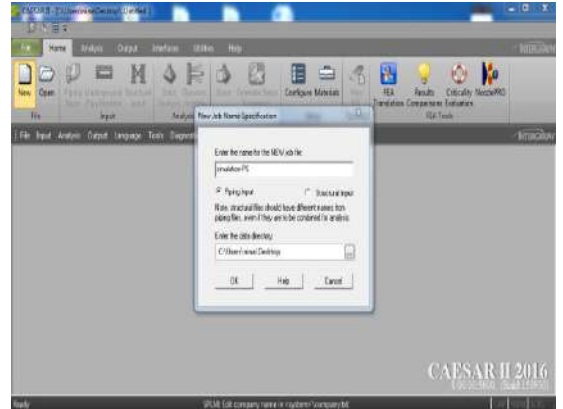
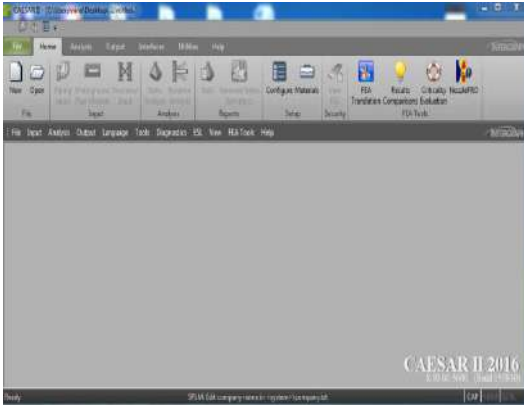
SUS : W+P1 (Charge +Pression)

EXP : T1 (Expansion thermique)

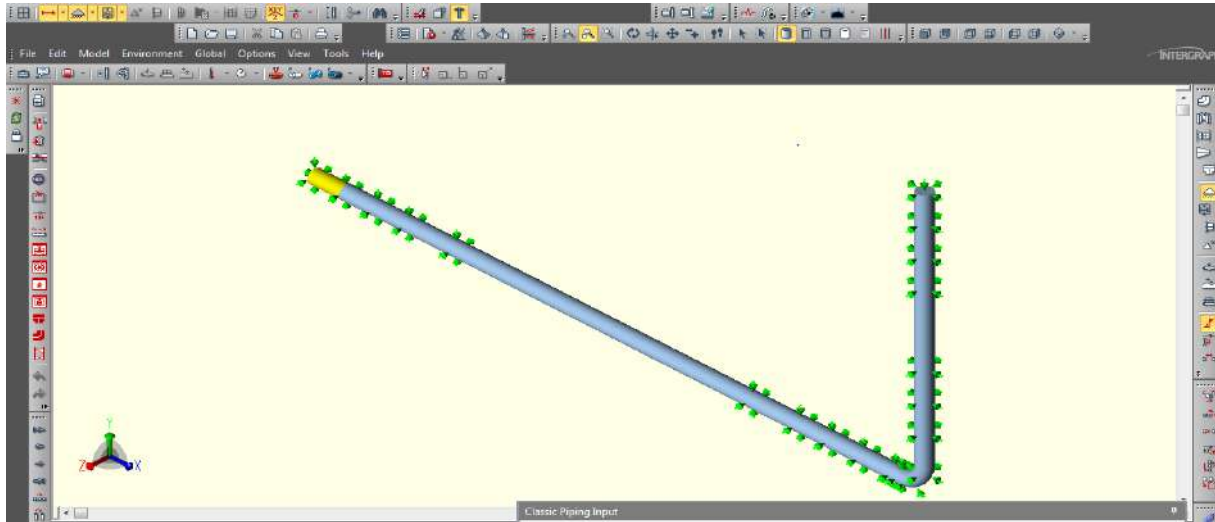
III.18.2. Codes et normes suivi :

- Règles de Sécurité pour les Canalisations de Transport de Gaz Combustibles-1991
- Règlement Algérien de sécurité des canalisations de transport de gaz
- ANSI/API 5L (Spécification for Line Pipe-2007)
- ASME B31.8 (Gas Transmission and Distribution Systems- 1995).

III.18.3. Étape de Réalisation du schéma sous CAESAR II :



III.18.4. Représentation du Schéma du système sur le logiciel CAESARII :



III.18.5. Résultat de la simulation :

III.18.5.1. Les contraintes maximales calculées sur le nœud le plus défavorable :

Scenario de chargement	nœud	Contraint calculé (KPa)	Contraint admissible (KPa)	Rapport des contraintes (KPa)	Observation
OPE	11	220292 ,8	434369 .7	50.7	OK
SUS	11	220292 ,8	434369 .7	50.7	ok
EXP	21	28436.5	/	7.8	ok

III.18.5.2. Analyse des contraintes :

Scenario de chargement	Nœud	Contrainte axiale	Contraint de cisaillement	Contrainte de torsion	Contrainte Circonférentiel le	Contraint Maximal (KPa)
OPE	11	65969.6		0	220292.6	224522.3
	21		20295.2			
SUS	11	66087.8		0	220292.6	224522.3
	21		0			
EXP	11				0	
	21		27193.6			28436.5
	22			0		
	31	3213.6				

III.18.5.3. La comparaison entre les résultats obtenue analytiquement et sous logiciel CAESARII :

Les résultats obtenus sous CAESARII sont plus fiables au tant qu'il a pris en considérations le type et les caractéristiques du sol, ainsi il combine entre différents types de sollicitations que subit la tuyauterie.

Conclusion :

Suite au résultat de l'analyse obtenue sous logiciel CAESARII, le rapport de contrainte dans le nœud soumis aux conditions les plus défavorables est inférieurs à l'unité, cela implique que le système n'est pas soumis à un stress dangereux, les charges sont acceptables et les supports supplémentaires ne sont pas exigés.

Chapitre IV

Etude du stress du Gazoduc GR5 sous CAESAR II

IV.1. Introduction :

Les gazoducs sont un moyen sûr, fiable et écologique pour transporter le gaz naturel sous haute pression ,leurs sécurité est une priorité absolue ,donc il faut s'assurer que la configuration du système de tuyauterie en projet est suffisamment flexibles avant de la mettre en exploitation pour éviter les dépassements de contraintes admissibles, durant les essais hydrostatiques et pendant l'exploitation, conformément aux codes et standards admis.

L'étude que nous allons faire dans ce chapitre a pour objectif principale le calcul et l'analyse de flexibilité sur les ouvrages concentrés existant le long du gazoduc GR5 (poste de sectionnement, poste de coupure) de manière à garantir un minimum de flexibilité ,et assurer un bon dimensionnement des structures supportrices de la tuyauterie.

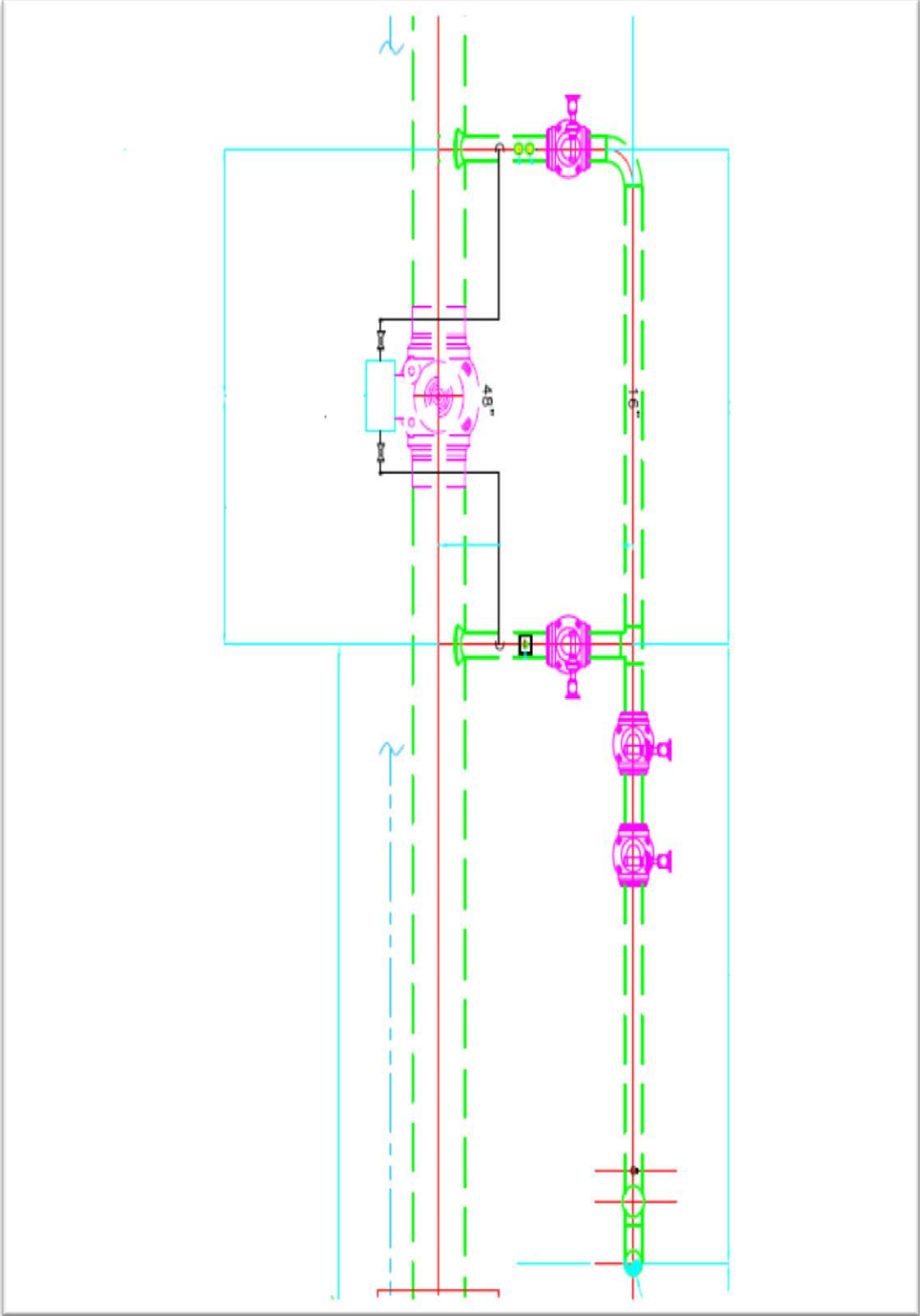
IV.2. Calcul et analyse de stress sur le poste de sectionnement N°02 :

IV.2.1. Le rôle d'un poste de sectionnement :

Le principal rôle d'un poste de sectionnement est d'interrompre la circulation du gaz naturel dans les canalisations par l'intermédiaire d'un robinet, et de permettre la décompression du gazoduc par un évent ou gas booster. Ce procédé innovant permet de limiter les rejets de méthane dans l'atmosphère.

Sur les lignes de transport d'hydrocarbures, la distance entre un poste de sectionnement et un autre est d'une vingtaine de kilomètres dans les zones désertique, et d'une dizaine de kilomètres dans les zones à forte densité de populations. Durant une opération de maintenance programmée, la fermeture de deux robinets de sectionnement successifs va entraîner la décompression du tronçon et va permettre aux exploitants d'effectuer les travaux en toute sécurité. En cas d'urgence sur la canalisation, la fermeture des robinets situés de part et d'autre du tronçon neutralisé va permettre de réduire la quantité de gaz naturel émise dans l'atmosphère.

IV.2.2. Schéma du post de sectionnement N°02 :



FigureIV-1 : schéma du PS N°02

IV.2.3. Conditions de site :

- Pression de service maximale : 71bars
- Vitesse maximale du vent : 180 km/h
- Zone sismique : I (faible)
- Température du gaz : 50°C
- Pression du gaz : 70 bars
- Température ambiante : 25°C

IV.2.4. Scenarios de simulation :**Scénarios de base :**

- OPE : W+T1+P1 (Charge +Température +Pression)
- HYD : WW+HP (Charge en eau+ Pression d'essai hydrostatique)
- SUS : W+P1 (Charge +Pression)
- EXP : T1 (Expansion thermique)

Scénarios additionnels :

- OPE-OCC : W+T1+P1+WIN1 (Charge +Température +Pression +Vent)

IV.2.5. Codes, normes et standards suivi :

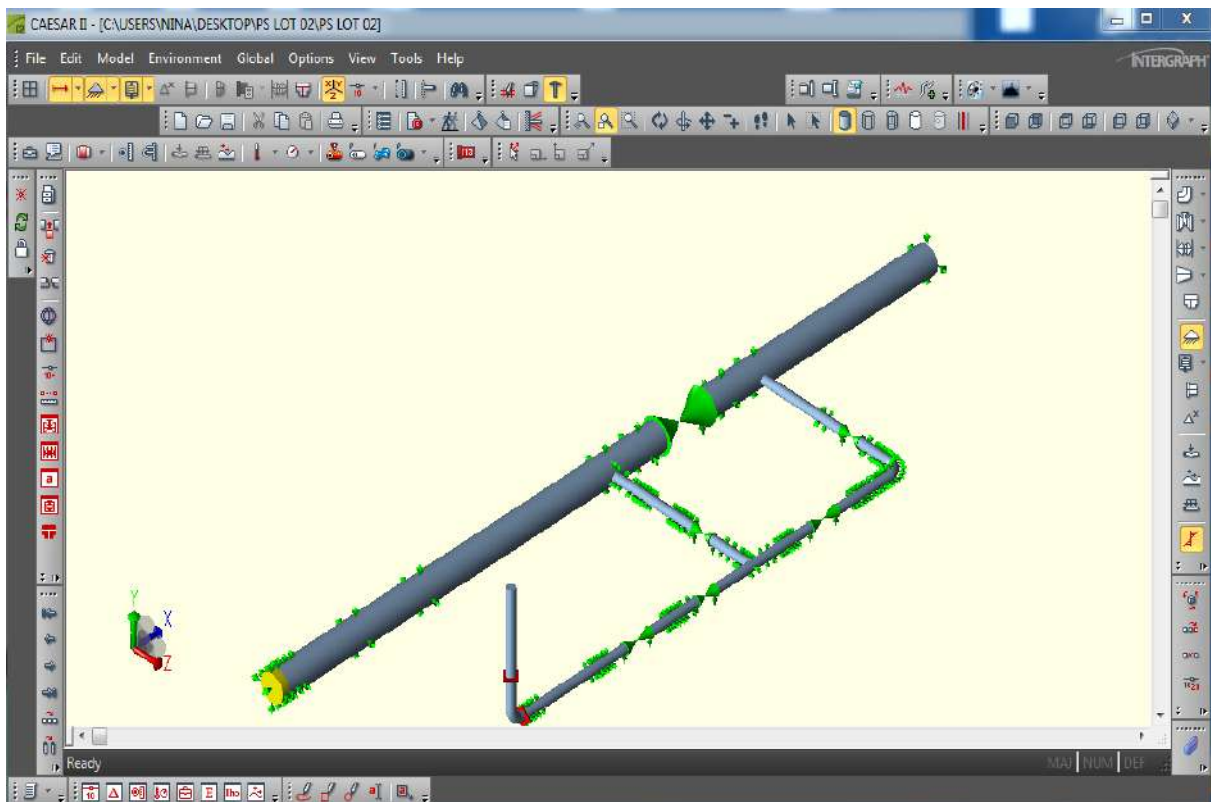
- Règles de Sécurité pour les Canalisations de Transport de Gaz Combustibles-1991
- Règlement algérien de sécurité des canalisations de transport de gaz
- ANSI/API 5L- Spécification for Line Pipe-2007
- ASME B31.8- Gas Transmission and Distribution Systems- 1995

IV.2.6. Axes de coordonnées :

Le système des axes API est pris en compte :

- Axe-X : Direction horizontale, perpendiculaire à la conduite principale
- Axe-Y : Direction verticale, perpendiculaire à la conduite principale
- Axe- Z : Direction de l'écoulement du gaz

IV.2.7. Représentation du poste de sectionnement sous le logiciel CAESARII :



IV.2.8. Contraintes maximales calculées :

Le tableau ci-après représente les nœuds où la contrainte maximale est obtenue pour les différents cas de chargements

Scenario de chargement	nœud	Contraint calculé	Contraint admissible	Rapport des contraintes	Observation
HYD	11	288071.3	485633.1	59.3	ok
OPE	11	128946.2	437069.7	29.5	ok
SUS	11	128946.2	437069.7	29.5	ok
EXP	196	25278.3	468420.8	5.4	ok
OPE(W+T1+P1+WIN)	11	128946.2	437069.7	29.5	ok

Tableau IV-1 : les contraintes maximales pour chaque cas de chargement

IV.2.1. Analyse des contraintes :

Scenario de chargement	Nœud	Stress axial (KPa)	Stress de cisaillement (KPa)	Contrainte de torsion (KPa)	Contrainte circulaire (KPa)	Contraint Maximal (KPa)
HYD	11	86421.4		0	288071.3	293418.9
	60		7741.1			
OPE	11	38683.3		0	128946.2	131339.9
	196		18956.5			
SUS	11	38683.3		0	128946.2	131339.9
	180		170.2			
EXP	196	16580.2	25278.2			26188.9
	202			0		
	11				0	
OPE(W+T1+P1+WIN)	11	38683.6		0	128946.2	131339.9
	196		18955.1			

Tableau IV-2 : les différentes contraintes maximales du système.

IV.2.2. Résultat de Simulation pour différents cas de chargements :**IV.2.2.1. Les déplacements :****Cas N°1 : essais hydrostatiques (HYD)**

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (deg)	RY (deg)	RZ (deg)
10	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
11	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
36	0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0012
40	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
50	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
60	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0017
69	0.000	-0.232	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0005
70	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	0.0045
90	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0008

Tableau IV-3 : les déplacements obtenus lors des essais hydrostatiques sur PS**IV.2.10.1. Les Forces et les moments :****Cas N°1 : essais hydrostatiques (HYD)**

Nœud	Force axial (N)	Force de cisaillement (N)	Moment de flexion N.m.	Moment de torsion N.m.	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N.m)	MY (N.m)	MZ (N.m)
10	0	603	0	0	0	-603	0	0	0	0
11	0	603	208	0	0	603	0	0	0	-208
35	0	2130	10572	-7	0	2130	0	-7	0	10572
40	0	118252	8443	-7	0	118252	0	-7	0	8443
50	0	118760	9075	7	0	118760	0	7	0	-9075
60	0	58685	84158	0	0	58685	0	0	0	84158
69	0	8998	74108	0	0	8998	0	0	0	-74108
70	0	40690	0	0	0	40690	0	0	0	0
90	0	6487	62	-124	0	6487	0	-62	0	-124
100	0	6514	75	124	0	6514	0	75	0	124

Tableau IV-4 : les forces et les moments obtenus lors des essais hydrostatiques sur PS

La suite des résultats de simulation pour les différents cas de chargements sur le PS N°02 sont dans l'ANNEXE

IV.3. Calcul et analyse de stress sur le poste de coupure N°02 :

IV.3.1. Rôle principale d'un Poste de coupure :

Tel qu'un poste de sectionnement, le poste de coupure permet d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou, de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite, de plus, il est muni d'une gare racleur départ et arrivé qui permettent l'introduction et la réception des pistons de nettoyages et des outils intelligents.

IV.3.2. Codes, normes et standards :

- Règles de Sécurité pour les Canalisations de Transport de Gaz Combustibles-1991 ;
- Règlement algérien de sécurité des canalisations de transport de gaz ;
- ANSI/API 5L- Spécification for Line Pipe-2007 ;
- ASME B31.8- Gas Transmission and Distribution Systems- 1995.

IV.3.3. Conditions de site :

- Pression de service maximale : 71bars
- Zone sismique : I (faible)
- Température du gaz : 50°C
- Pression du gaz : 70 bars
- Température ambiante : 25°C

IV.3.4. Scenarios de simulation pour les différents cas de chargement :

Les scénarios sont testés pour le cas le plus défavorable des conditions du PS :

Les scénarios de base :

- HYD : WW+HP (Charge en eau+ Pression d'essai hydrostatique) ;
- OPE : W+T1+P1 (Charge gaz +Température +Pression) ;
- SUS : W+P1 (Charge gaz +Pression) ;
- EXP : T1 (Expansion thermique);

Les scenarios additionnels

- OPE : W+T1+P1+WIN1 (Charge gaz +Température +Pression +Vent).

IV.3.5. Schéma du poste de Coupure N°02 :

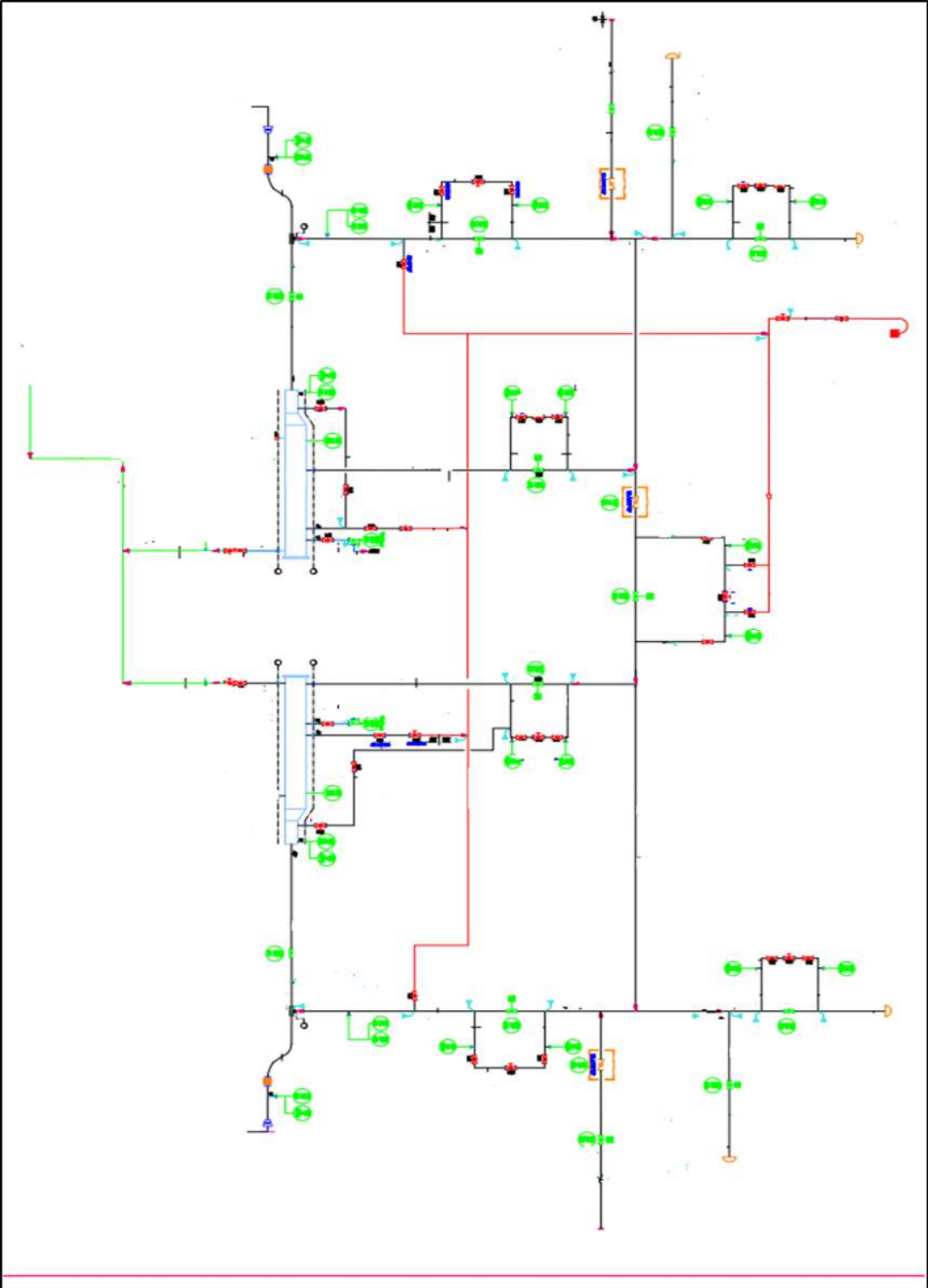
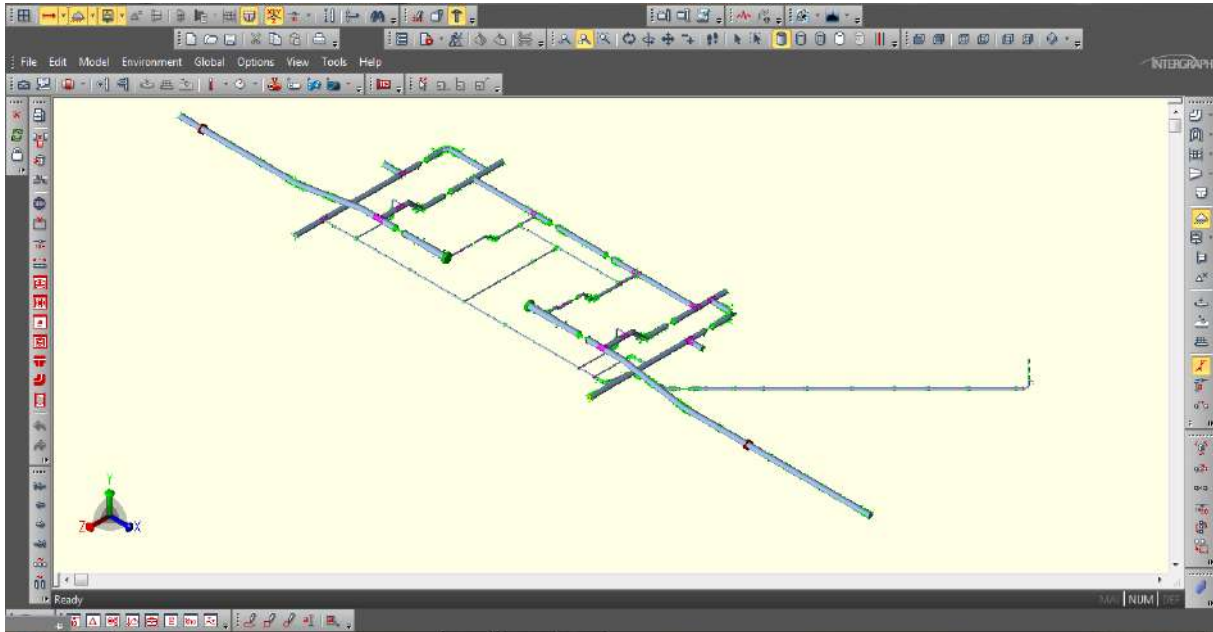


Figure IV.2 : schéma du PC N°02

IV.3.6. Représentation du poste de coupure N°02 sous logiciel CAESAR II



IV.3.7. Contraintes maximales calculées

scenario de chargement	nœud	Contrainte Calculé (KPa)	contrainte admissible (KPa)	ratio %	observation
WW+HP (HYD)	590	172 733,6	245 316,6	70,4	Ok
W+T1+P1 (OPE)	140	203 072,4	220 784,9	92,0	Ok
W+P1 (SUS)	590	107 309,7	220 784,9	48,6	Ok
T1 (EXP)	140	217 507,8	280 334,4	77,6	Ok
W+T1+P1+WIN (HYD)Occasionnelle	1 440	282 537,1	904 567,3	31,2	Ok

Tableau IV.5 : les contraintes maximales pour chaque cas de chargement

IV.3.8. Analyses des contraintes :

Scenario de chargement	Nœud	Stress axial	Stress de cisaillement	Contrainte de torsion	Contrainte circulaire	Contraint Maximal
HYD	11			0		
	580		99936.9			
	1040	86407.2			288024.1	293371.7
OPE (W+T1+P1)	11			0		
	140		166004.7			
	319	114180.7				316421.3
	1040				192016.1	
SUS	11			0		
	1040	57604.8			192016.1	195581.1
	4071		56343.7			
EXP	11				0	
	140		217496.8			
	319	168567.9				226217.5
	1340			33665.6		
OPE (W+T1+P1+WIN)	11			0		
	140		166004.7			
	319	114180.7				316421.3
	1040				192016.1	

Tableau IV-6 : les différentes contraintes maximales du PC**IV.3.9. Résultat de la simulation pour les différents cas de chargement du PC N°02 :****Le résultat des déplacements :**

Cas N°01 : essai hydrostatique(HYD)

Nœud	DX (mm).	DY (mm)	DZ (mm)	RX (deg).	RY (deg).	RZ (deg).
20	-0.000	-0.000	-0.000	0.0157	-0.0000	-0.0000
30	-0.000	0.075	-0.000	-0.0021	-0.0000	-0.0000
40	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0017	-0.0000	-0.0000
45	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
50	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
60	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	0.0000	0.0013
90	0.000	-0.000	0.000	0.0005	0.0000	0.0074
100	0.000	-0.000	0.013	0.0000	-0.0000	0.0027
110	0.000	-0.000	0.014	-0.0001	-0.0000	0.0026
117	-0.000	-0.013	0.031	0.0039	-0.0009	-0.0015
118	-0.000	-0.034	0.045	0.0072	-0.0013	-0.0016

Tableau IV-7 : les déplacements obtenus lors des essais hydrostatiques sur PC

Le résultat des Forces et moments :

Cas N°1 : essais hydrostatiques (HYD)

Nœud	Force axial (N)	Force de cisaillement (N)	Moment de flexion N.m.	Moment de torsion N.m.	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N.m)	MY (N.m)	MZ (N.m)
10	0	603	0	0	0	-603	0	0	0	0
11	0	603	208	0	0	603	0	0	0	-208
35	0	2130	10572	-7	0	2130	0	-7	0	10572
40	0	118252	8443	-7	0	118252	0	-7	0	8443
50	0	118760	9075	7	0	118760	0	7	0	-9075
60	0	58685	84158	0	0	58685	0	0	0	84158
69	0	8998	74108	0	0	8998	0	0	0	-74108
70	0	40690	0	0	0	40690	0	0	0	0
90	0	6487	62	-124	0	6487	0	-62	0	-124
100	0	6514	75	124	0	6514	0	75	0	124
120	0	7290	313	-35	0	7290	0	35	0	-313

Tableau IV-8 : les Forces et les moments obtenus lors des essais hydrostatiques sur PC**IV.3.10. Interprétation du résultat :**

Les résultats de la simulation de l'analyse de stress et analyse de flexibilité sur le poste de sectionnement N°02 et le poste de coupure N°02 de la ligne GR5 sous CAESARII ont montré que le cheminement considéré génère des contraintes acceptables et largement inférieures à celles admissibles. (Rapport des contraintes < 1).

Ainsi, le modèle analysé n'est pas très sollicité par les efforts engendrés aux différents points, cela a confirmé le bon dimensionnement de la tuyauterie et le bon choix de l'installation et de différents systèmes de supportage. et que tous les calculs effectués montrent la conformité aux exigences des limites imposées par Standard ASME B31.8.

IV.4. Vérification des brides :**IV.4.1. Généralités sur les brides :**

Les progrès réalisés dans le domaine du soudage ont considérablement réduit le nombre des assemblages à brides. Cependant, ceux-ci restent très employés notamment au niveau du raccordement des appareils, machines tournantes et robinetteries démontables

Les assemblages à brides ont une double fonction à assurer :

- la continuité mécanique ;
- l'étanchéité

Ces deux fonctions essentielles nécessitent la prise en compte dans le dimensionnement des trois composants principaux de l'assemblage : la bride, le joint d'étanchéité et la boulonnerie.

Les trois principales forces qui agissent sur l'assemblage sont :

- la force de la pression intérieure F_P
- la réaction du joint F_J (somme sur l'ensemble des n boulons) ;
- la force de serrage des boulons F_B

Pour assurer le bon fonctionnement du système, il doit y avoir un équilibre entre ces trois forces :

$$F_B = F_P + F_J$$

La valeur de F_J doit en effet rester suffisamment importante pour que l'étanchéité soit conservée dans les différentes situations possibles, notamment :

- La situation d'assise, $F_{BO} = F_{JO} + F_{p0}$;
- les situations sous pression, $F_{BI} = F_{JI} + F_{PI}$.

Les efforts extérieurs agissant sur l'assemblage doivent également être considérés. L'expression de l'équilibre devient alors :

$$F_{BI} = F_{JI} + F_{PI} + F_{EI}$$

Avec :

F_{EI} : force résultante de la prise en compte des efforts extérieurs représentés par la force axiale (traction-compression), et du moment de flexion agissant sur l'assemblage.

Deux méthodes de calcul (dimensionnement) sont aujourd'hui proposées dans les normes et codes de construction :

IV.4.1.1. La méthode Taylor-Forge :

La plus utilisée pour sa simplicité, qui fait l'hypothèse que la vérification mécanique permet de garantir l'étanchéité, critiquable sur les valeurs des coefficients caractérisant le comportement du joint d'étanchéité, qui sont pris forfaitairement.

IV.4.1.2. La méthode TGL :

Qui permet sur le plan théorique la définition d'un modèle mécanique et d'un modèle d'étanchéité ainsi que la prise en compte des efforts extérieurs. Cette méthode pose aujourd'hui le problème de la caractérisation réelle du joint d'étanchéité.

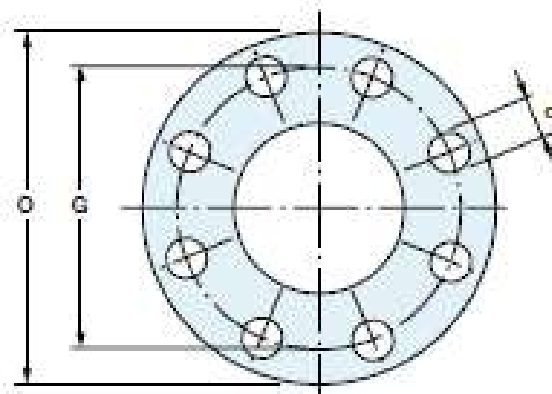


Figure IV-03 : schéma d'un joint

IV.4.2. Calcul de la pression équivalente sur la bride la plus contrainte :

La vérification des fuites des brides est effectuée en tenant compte du critère de la

Pression équivalente :

$$P_{eq} = P + \left(\frac{4F}{P_1 G^2} \right) + \left(\frac{16M_f}{P_1 G^3} \right)$$

$$P_{eq} = P + \left(\frac{12.7 F}{G^2} \right) + \left(\frac{50929.6 M_f}{G^3} \right)$$

F : Effort axial (N)

G: Diamètre effectif du joint en mm

IV.4.2.1.Cas d'un PS :

Les vannes sont de diamètre de 16'' série 100 / 600 # dans la Pression admise par le montage de bride 98 bar (voire la norme ASMI 16.5)

La bride est vérifiée, si le rapport de la (pression équivalente / la pression admissible de la classe de bride) est inférieur à 1

$$\frac{P_{eq}}{P_{adm}} < 1$$

Bride	G (mm)	Nœud	Scénario
PN 68 – DN 100 / 600#	603.2	240	OPE (W+P1+T1)

Sur la base des résultats de CAESERII on a :

- La charge en service :

$$P_1 = 71 \text{ bar}$$

- La force axiale :

$$F_N: 1240 \text{ lbs} = 5515.79 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{12.7 F_N}{G^2} = \frac{12.7 * 5515.79}{603.2^2}$$

$$P_2 = 0.1904 \text{ bar}$$

- Le moment de flexion :

$$M_f = 68 \text{ ft. lb} = 92.1956 \text{ N. m}$$

$$P_3 = \frac{50929.6 M_f}{G^3} = \frac{50929.6 * 92.1956}{603.2^3}$$

$$P_3 = 0.02139 \text{ bar}$$

On trouve :

$$P_{eq} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_{eq} = 71 + 0.1904 + 0.02139$$

$$P_{eq} = 71.2117 \text{ bar} < 98 \text{ bar}$$

Bride vérifiée

IV.4.2.2 Cas d'un PC :

Les vannes de 42''

Les vannes sont de diamètre de 42'' série 100 / 600 # dans la Pression admise par le montage de bride 98 bar (voire la norme ASMI 16.5)

La bride est vérifiée, si le rapport de la pression équivalente / la pression admissible de la classe de bride est inférieur à 1

$$\frac{P_{eq}}{P_{adm}} < 1$$

Bride	G (mm)	Nœud	Scénario
PN 68 – DN 100 / 600#	838.2	340	OPE (W+P1+T1)

A base des résultats de CAESERII on a :

- La charge en service :

$$P_1 = 71 \text{ bar}$$

La force axiale :

$$F_N: 962360.8 \text{ lb} = 428082.61519$$

$$P_2 = \frac{12.7F_N}{G^2} = \frac{12.7 * 428082.61519}{838.2^2}$$

$$P_2 = 7.7381 \text{ bar}$$

- Le moment de flexion :

$$M_f = 1891.4 \text{ ft. lb} = 2564.3940 \text{ N. m}$$

$$P_3 = \frac{50929.6 M_f}{G^3} = \frac{50929.6 * 2540.4}{838.2^3}$$

$$P_3 = 0.2196 \text{ bar}$$

On trouve :

$$P_{eq} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_{eq} = 71 + 7.7381 + 0.2196$$

$$P_{eq} = 78.95 \text{ bar} < 98 \text{ bar}$$

Donc la Bride est vérifiée

Les vannes de 16''

En se basant sur les même démarche suivit précédemment, nous procédant à la vérification de la Bride de 16''

classe	Scénario	Nœud	Force axial (N)	Moment de torsion (N.m)	P ₁ (bar)	P ₂ (bar)	P ₃ (bar)	P _{eq} (bar)
100/600#	OPE	740	71224.92	30953.05	71	2.4860	7.1827	80.6687

$$P_{eq} = 80.6687 < 98 \text{ bar}$$

Donc la Bride est vérifiée.

CONCLUSION :

Pour Promouvoir la sécurité de l'acheminement du gaz naturel sous haute pression durant toute la période de fonctionnement prévue et éviter d'atteindre les contraintes limites est imposé par les règles de sécurité des canalisations.

L'étude de stress et l'analyse de flexibilité appliquée dans ce chapitre a prouvé le bon dimensionnement du supportage du poste de sectionnement N°02 se situant au PK 39, Et du poste de coupure N°2 se situant au PK176 du STC GR5, ainsi qu'ils sont conforme à la réglementation et ne présentent aucun danger vis-à-vis le stress et la limite des contraintes admissible.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La sécurité et le bon fonctionnement des lignes de transport de gaz a hautes pression sur de grande distances est d'une première priorité.

Au terme de cette étude qui concerne le calcul et l'analyse de flexibilité sur les ouvrages concentré du STC GR5 qui collecte les quantités de gaz provenant du sud-ouest de HASSI R'MEL depuis le terminal départ REGGANE jusqu'au CNDG-HRM.

Les résultats obtenue de la simulation faite sur le logiciel CAESAR II sur le poste de sectionnement PS-N°02 qui se situe au PK 39, et sur le postes de coupures PC-N° 02 qui se situe au PK176 de la ligne GR5 ont montré que :

- La configuration du système de tuyauterie réalisé est suffisamment flexible pour éviter les dépassements de contraintes admissibles, durant les essais hydrostatiques et pendant l'exploitation, conformément aux exigences des codes et standards admis.
- Le système ne nécessite pas de dispositif correctif car le niveau de contrainte est satisfaisant au critère du code de construction.
- Les mouvements de la tuyauterie sont réduits et n'ont pas posé un problème de stress et cela a été assuré par les ancrages virtuels, Créés par le frottement dans le sol dans les endroits où la conduite est enterré, des ancrages réels (massif béton avec bride d'ancrage) disposés de part et d'autre des changements de direction importants dans le cas des conduites aérienne de manière à réduire les longueurs actives.

Avec le temps, le système peut perdre ces caractéristiques mécaniques, et les sollicitations peuvent provoquées des défaillances et le dépassement des limites d'admissibilités, pour lutter contre le stress engendré d'autres types de supportage vont être installé :

- La création de chambre d'expansion aux changements de direction, ces chambres étant Exécutées par maçonnerie enterrée ou talutage à ciel ouvert en fonction de l'environnement considéré.
- L'installation des coussins d'expansion en mousse de polyuréthane dans le sol dont le dimensionnement est effectuée en fonction des mouvements à absorber.
- L'installation des compensateurs de dilatation, qui eux aussi Nécessiteront la création de chambres pour permettre la libre dilatation.

Cette étude nous a permis de montrer l'intérêt d'une analyse de stress avant la mise en service d'un système de tuyauterie, soit du côté sécurité des personne et de l'environnement du fait que sa permet de prévenir les défaillances ou du coté économique car la prévention d'une défaillance permet d'éviter les dégâts.

ANNEXE

Résultat de simulations pour les différents cas de chargement du PS N°02 : Résultat des déplacements :

Cas N°01 : Essai Hydrostatique

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (deg)	RY (deg)	RZ (deg)
10	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
11	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
36	0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0012
40	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
50	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
60	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0017
69	0.000	-0.232	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0005
70	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	0.0045
90	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0008
100	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0008
120	0.000	-0.000	0.000	0.0002	-0.0000	0.0001
130	0.000	-0.000	0.000	0.0002	-0.0000	-0.0001
150	0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
160	0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
170	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	0.0001
180	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
194	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
195	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
196	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
197	-0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
198	-0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
199	-0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
200	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
201	-0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
202	-0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
203	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
204	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
205	0.000	-0.006	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
206	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
230	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0005
240	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0005

ANNEXE

Cas N°2 : condition de fonctionnement (OPE),

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (deg)	RY (deg)	RZ(deg)
10	-0.220	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
11	-0.216	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
36	0.000	0.000	0.025	0.0000	-0.0000	-0.0000
40	-0.022	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
50	0.003	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0001
60	0.001	0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
69	0.053	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
70	0.105	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
80	0.000	0.000	0.031	-0.0000	0.0000	0.0000
90	0.000	-0.000	0.040	0.0000	0.0000	0.0000
100	0.000	-0.000	0.051	-0.0000	-0.0000	0.0000
120	-0.128	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
150	-0.083	-0.000	-0.007	-0.0000	0.0003	0.0000
160	-0.044	-0.000	-0.002	-0.0000	0.0003	-0.0000
170	-0.131	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0001
180	-0.077	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
194	-0.002	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
195	0.021	0.029	0.000	-0.0000	0.0000	0.0040
196	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
197	0.019	0.030	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0143
198	0.054	0.077	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0195
199	0.101	0.116	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0174
200	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
201	0.143	0.132	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0105
202	0.164	0.127	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0015
203	0.132	0.099	0.000	-0.0000	0.0000	0.0071
204	0.107	0.085	0.000	-0.0000	0.0000	0.0072
205	-0.000	-0.355	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
206	0.060	0.057	0.000	-0.0000	0.0000	0.0063
230	-0.000	-0.000	0.072	0.0000	-0.0000	-0.0000
240	-0.000	-0.000	0.084	-0.0000	-0.0000	-0.0000

ANNEXE

Cas N°3 (SUS) : charges soutenues

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX(deg)	RY (deg)	RZ (deg)
10	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
11	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
36	0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
40	0.000	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0001
50	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0001
60	0.000	0.000	-0.000	0.0000	0.0000	0.0000
69	0.000	0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
70	0.000	0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
90	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
100	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
120	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0001
130	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
150	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
160	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
170	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
180	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0001
194	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
195	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
196	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
197	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
198	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
199	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
200	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
201	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
202	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
203	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
204	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
205	0.000	-0.003	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
206	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
230	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000

ANNEXE

Cas N°4 (EXP) : expansion Thermique

Noeud	DX (mm)	DY(mm)	DZ(mm)	RX(deg)	RY(deg)	RZ(deg)
10	-0.220	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
11	-0.216	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
36	0.000	-0.000	0.026	-0.0000	-0.0000	-0.0000
40	-0.022	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
50	0.003	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
60	0.001	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
69	0.053	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
70	0.105	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
90	0.000	0.000	0.048	0.0000	0.0000	-0.0000
100	0.000	0.000	0.059	0.0000	-0.0000	-0.0000
120	-0.135	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
130	-0.151	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
150	-0.090	-0.000	-0.008	-0.0000	0.0003	0.0000
160	-0.051	-0.000	-0.003	-0.0000	0.0003	-0.0000
170	-0.139	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
180	-0.085	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
194	-0.003	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
195	0.021	0.029	0.000	-0.0000	0.0000	0.0040
196	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
197	0.019	0.030	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0143
198	0.054	0.077	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0195
199	0.101	0.116	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0174
200	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
201	0.143	0.132	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0105
202	0.164	0.127	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0015
203	0.132	0.099	0.000	-0.0000	0.0000	0.0071
204	0.107	0.085	0.000	-0.0000	0.0000	0.0072
205	-0.000	-0.353	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
206	0.060	0.057	0.000	-0.0000	0.0000	0.0063
230	-0.000	0.000	0.076	-0.0000	-0.0000	-0.0000
240	-0.000	0.000	0.087	-0.0000	-0.0000	-0.0000

ANNEXE

Cas N°5 (OPE) occasionnelle : conditions de fonctionnements occasionnelles

Nœud	DX (mm)	DY(mm)	DZ (mm)	RX (deg)	RY (deg)	RZ (deg)
10	-0.220	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
11	-0.216	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
36	0.000	0.000	0.025	0.0000	-0.0000	-0.0000
40	-0.022	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
50	0.003	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0001
60	0.001	0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
69	0.053	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
70	0.105	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
90	0.000	-0.000	0.040	0.0000	0.0000	0.0000
100	0.000	-0.000	0.051	-0.0000	-0.0000	0.0000
120	-0.128	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
150	-0.083	-0.000	-0.007	-0.0000	0.0003	0.0000
160	-0.044	-0.000	-0.002	-0.0000	0.0003	-0.0000
170	-0.131	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0001
180	-0.077	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
194	-0.002	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
195	0.021	0.029	0.000	-0.0000	0.0000	0.0040
196	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
197	0.019	0.030	0.000	0.0000	0.0000	-0.0143
198	0.054	0.077	0.000	0.0000	0.0000	-0.0195
199	0.101	0.116	0.000	0.0000	0.0000	-0.0174
200	0.000	-0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
201	0.143	0.132	0.000	0.0000	0.0000	-0.0105
202	0.164	0.127	0.000	0.0000	0.0000	-0.0015
203	0.132	0.099	0.000	0.0000	0.0000	0.0071
204	0.107	0.085	0.000	0.0000	0.0000	0.0072
205	0.197	-0.355	0.197	0.0040	0.0000	-0.0040
206	0.060	0.057	0.000	-0.0000	0.0000	0.0063
230	0.000	-0.000	0.072	0.0000	0.0000	-0.0000
240	0.001	-0.000	0.084	-0.0000	0.0000	-0.0000

ANNEXE

Résultat des Forces et moments :

Cas N°1 : essais hydrostatiques (HYD)

Nœud	Force axial (N)	Force de cisaillement (N)	Moment de flexion N.m.	Moment de torsion N.m.	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N.m)	MY (N.m)	MZ (N.m)
10	0	603	0	0	0	-603	0	0	0	0
11	0	603	208	0	0	603	0	0	0	-208
35	0	2130	10572	-7	0	2130	0	-7	0	10572
40	0	118252	8443	-7	0	118252	0	-7	0	8443
50	0	118760	9075	7	0	118760	0	7	0	-9075
60	0	58685	84158	0	0	58685	0	0	0	84158
69	0	8998	74108	0	0	8998	0	0	0	-74108
70	0	40690	0	0	0	40690	0	0	0	0
90	0	6487	62	-124	0	6487	0	-62	0	-124
100	0	6514	75	124	0	6514	0	75	0	124
120	0	7290	313	-35	0	7290	0	35	0	-313
130	0	7291	313	35	0	7291	0	-35	0	313
150	0	6487	63	-1	0	6487	0	1	0	-63
160	0	6514	76	1	0	6514	0	-1	0	76
170	0	7290	313	-1	0	7290	0	1	0	-313
180	0	7291	313	1	0	7291	0	-1	0	313
194	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	0
196	2	8	2	0	-2	8	0	0	0	-2
197	-4	7	1	0	2	-8	0	0	0	1
198	-6	6	0	0	2	-8	0	0	0	0
199	-7	4	1	0	2	-8	0	0	0	-1
201	-8	2	1	0	2	-8	0	0	0	-1
202	-8	0	1	0	2	-8	0	0	0	-1
203	-8	2	0	0	2	-8	0	0	0	0
204	-8	2	0	0	2	-8	0	0	0	0
206	-8	2	1	0	2	-8	0	0	0	1
207	-8	2	1	0	2	-8	0	0	0	1
230	0	6536	102	137	0	6536	0	-102	0	137
240	0	6465	67	-137	0	6465	0	67	0	-137

ANNEXE

Cas N°2(OPE) : Conditions de fonctionnements,

Nœud	Force axial (N)	Force de cisaille- ment (N)	Moment de flexion N.m.	Moment de torsion N.m.	FX (N).	FY (N).	FZ (N).	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.
10	24	5	0	0	24	0	5	0	0	0
11	-24	5	2	0	-24	0	-5	0	-2	0
35	200524	2302	1262	-1	200524	-2297	-147	-1	578	1122
40	204340	118506	3446	-1	204340	118506	-137	-1	431	3419
50	-204340	118506	3420	1	-204340	118506	137	1	-89	-3419
60	313	6	59	0	313	6	0	0	-4	58
69	313	6	29	0	313	6	0	0	-2	29
70	-313	6	0	0	-313	-6	0	0	0	0
90	4001	6487	67	0	-61	6487	4001	-62	25	0
100	-4001	6514	114	0	61	6514	-4001	75	-85	0
120	-13415	6500	196	0	13415	6500	-2	0	-4	-196
130	13415	6500	196	0	-13415	6500	2	0	1	196
150	-193063	6475	140	0	193063	6467	-318	0	-134	-42
160	193063	6542	196	0	-193063	6534	318	0	-181	76
170	-198227	6500	196	0	198227	6500	3	0	4	-196
180	198227	6501	196	0	-198227	6501	-3	0	-1	196
194	-200413	0	0	0	200413	0	0	0	0	0
196	-10820	31103	9153	0	10820	-31103	0	0	0	9153
197	-18501	27243	4470	0	10820	-31103	0	0	0	4470
198	-24922	21526	556	0	10820	-31103	0	0	0	556
199	29644	14342	2322	0	-10820	31103	0	0	0	2322
201	32346	6181	3970	0	-10820	31103	0	0	0	3970
202	32844	2401	4273	0	-10820	31103	0	0	0	4273
203	31103	10820	1398	0	-10820	31103	0	0	0	1398
204	31103	10820	416	0	-10820	31103	0	0	0	-416
206	31103	10820	3980	0	-10820	31103	0	0	0	-3980
207	31103	10820	5794	0	-10820	31103	0	0	0	-5794
230	-12409	6523	90	0	6	6523	-12409	-90	0	0
240	12409	6478	68	0	-6	6478	12409	67	6	0

ANNEXE

Cas N°3 (SUS) :charges soutenues

Nœud	Force axial N.	Moment de cisaillement N.m	Moment de flexion (N.m)	Moment de torsion (N.m)	FX N.	FY N.	FZ N.	MX N.m.	MY N.m.	MZ N.m.
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	2297	1122	-1	0	-2297	0	-1	0	1122
40	0	118506	3419	-1	0	118506	0	-1	0	3419
50	0	118506	3419	1	0	118506	0	1	0	-3419
60	0	6	58	0	0	6	0	0	0	58
69	0	6	29	0	0	6	0	0	0	29
70	0	6	0	0	0	-6	0	0	0	0
90	0	6487	62	0	0	6487	0	-62	0	0
100	0	6514	75	0	0	6514	0	75	0	0
120	0	6500	196	0	0	6500	0	0	0	-196
130	0	6500	196	0	0	6500	0	0	0	196
150	0	6467	42	0	0	6467	0	0	0	-42
160	0	6534	76	0	0	6534	0	0	0	76
170	0	6500	196	0	0	6500	0	0	0	-196
180	0	6501	196	0	0	6501	0	0	0	196
194	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
196	1	3	1	0	-1	3	0	0	0	-1
197	-2	3	1	0	1	-3	0	0	0	1
198	-3	2	0	0	1	-3	0	0	0	0
201	-4	1	0	0	1	-3	0	0	0	0
202	-4	0	0	0	1	-3	0	0	0	0
203	-3	1	0	0	1	-3	0	0	0	0
204	-3	1	0	0	1	-3	0	0	0	0
206	-3	1	0	0	1	-3	0	0	0	0
207	-3	1	0	0	1	-3	0	0	0	0
230	0	6523	90	0	0	6523	0	-90	0	0
240	0	6478	67	0	0	6478	0	67	0	0

ANNEXE

Cas N°4(EXP) :expansion thermique

Nœud	Force axial (N)	Moment de Cisaillement (N).	Moment De flexion (N.m)	Moment de torsion (N.m)	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N.m)	MY N.m.	MZ N.m.
10	24	5	0	0	24	0	5	0	0	0
11	-24	5	2	0	-24	0	-5	0	-2	0
35	201850	138	580	0	201850	0	-138	0	580	0
40	201850	138	443	0	201850	0	-138	0	443	0
50	-201850	138	100	0	-201850	0	138	0	-100	0
60	313	1	7	0	313	0	1	0	-7	0
69	313	1	3	0	313	0	1	0	-3	0
70	-313	1	0	0	-313	0	-1	0	0	0
90	2606	63	37	0	-63	0	2606	0	37	0
100	-2606	63	99	0	63	0	-2606	0	-99	0
120	-11003	2	4	0	11003	0	-2	0	-4	0
130	11003	2	1	0	-11003	0	2	0	1	0
150	-196919	406	232	0	196919	0	-406	0	-232	0
160	196919	406	171	0	-196919	0	406	0	-171	0
170	-196954	3	6	0	196954	0	3	0	6	0
180	196954	3	1	0	-196954	0	-3	0	-1	0
194	-197006	0	0	0	197006	0	0	0	0	0
196	-10821	31107	9154	0	10821	-31107	0	0	0	9154
197	-18503	27246	4471	0	10821	-31107	0	0	0	4471
198	-24924	21529	556	0	10821	-31107	0	0	0	556
199	29647	14344	2323	0	-10821	31107	0	0	0	2323
201	32350	6182	3970	0	-10821	31107	0	0	0	3970
202	32847	2401	4273	0	-10821	31107	0	0	0	4273
203	31107	10821	1398	0	-10821	31107	0	0	0	1398
204	-31107	10821	416	0	10821	-31107	0	0	0	416
206	-31107	10821	3980	0	10821	-31107	0	0	0	3980
207	-31107	10821	5794	0	10821	-31107	0	0	0	5794
208	31107	10821	6701	0	-10821	31107	0	0	0	-6701
230	-11246	6	0	0	6	0	-11246	0	0	0
240	11246	6	6	0	-6	0	11246	0	6	0

ANNEXE

Cas N°5 (OPE) : conditions de fonctionnements occasionnelles

Nœud	Force Axial (N)	Force de Cisaillement (N)	Moment De flexion (N.m)	Moment de torsion (N.m)	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (N.m)	MY (N.m)	MZ (N.m)
10	24	5	0	0	24	0	5	0	0	0
11	-24	5	2	0	-24	0	-5	0	-2	0
35	200534	2302	1262	-1	200534	-2297	-147	-1	578	1122
40	204350	118506	3446	-1	204350	118506	-137	-1	431	3419
50	-204350	118506	3420	1	-204350	118506	137	1	-89	-3419
60	313	6	59	0	313	6	0	0	-4	58
69	313	6	29	0	313	6	0	0	-2	29
70	-313	6	0	0	-313	-6	0	0	0	0
90	4002	6487	67	0	-61	6487	4002	-62	25	0
100	-4002	6514	114	0	61	6514	-4002	75	-85	0
120	-13414	6500	196	0	13414	6500	-2	0	-4	-196
130	13414	6500	196	0	-13414	6500	2	0	1	196
150	-193064	6475	140	0	193064	6467	-318	0	-134	-42
160	193064	6542	196	0	-193064	6534	318	0	-181	76
170	-198228	6500	196	0	198228	6500	3	0	4	-196
180	198228	6501	196	0	-198228	6501	-3	0	-1	196
194	-200414	0	0	0	200414	0	0	0	0	0
196	-10815	31098	9152	2	10815	-31098	-3	-2	-1	9152
197	-18495	27239	4470	1	10815	-31098	-3	-1	0	4470
198	-24915	21524	557	1	10815	-31098	-3	-1	0	557
199	29637	14342	2322	-1	-10815	31098	3	1	-1	2322
201	32339	6183	3969	-1	-10815	31098	3	0	-1	3969
202	32838	2398	4273	-1	-10815	31098	3	0	-1	4273
203	31098	10815	1399	-1	-10815	31098	3	-1	-1	1399
204	-31098	10815	414	1	10815	-31098	-3	2	1	414
206	-31098	10815	3976	1	10815	-31098	-3	3	1	3976
207	31098	10815	5789	-1	-10815	31098	3	-3	-1	-5789
230	-12409	6529	93	0	-297	6523	-12409	-90	25	0
240	12409	6479	135	0	-111	6478	12409	67	-117	0

ANNEXE

Résultat de simulations pour les différents cas de chargement du PC N°02 :

Les résultats de déplacements :

Cas N°1 (HYD) : essais hydrostatiques

Nœud	DX (mm).	DY(mm)	DZ (mm)	RX (deg).	RY(deg).	RZ (deg).
20	-0.000	-0.000	-0.000	0.0157	-0.0000	-0.0000
30	-0.000	0.075	-0.000	-0.0021	-0.0000	-0.0000
40	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0017	-0.0000	-0.0000
45	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
50	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
60	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	0.0000	0.0013
90	0.000	-0.000	0.000	0.0005	0.0000	0.0074
100	0.000	-0.000	0.013	0.0000	-0.0000	0.0027
110	0.000	-0.000	0.014	-0.0001	-0.0000	0.0026
117	-0.000	-0.013	0.031	0.0039	-0.0009	-0.0015
118	-0.000	-0.034	0.045	0.0072	-0.0013	-0.0016
130	0.051	-0.762	0.605	0.0089	-0.0009	-0.0071
140	0.020	-1.005	0.598	0.0060	-0.0012	-0.0089
180	0.000	-0.000	0.000	0.0001	0.0000	0.0001
190	0.000	-0.000	0.000	0.0001	0.0000	-0.0001
200	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0001
210	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
220	0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0001
260	-0.000	-0.000	0.000	-0.0008	-0.0000	-0.0000
270	-0.000	0.038	0.000	-0.0011	-0.0000	-0.0000
280	0.000	-0.000	-0.000	0.0120	0.0000	-0.0000
283	0.000	0.000	0.000	0.0120	0.0000	-0.0000
285	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0163	-0.0000	-0.0000
420	0.105	-0.921	0.570	-0.0050	0.0020	0.0140
500	-0.000	-0.000	0.000	-0.0002	-0.0000	-0.0000
503	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	-0.0000	-0.0000
504	-0.000	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0001
506	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	-0.0000	0.0001
509	-0.000	0.000	-0.000	-0.0001	0.0000	0.0001
510	-0.001	0.000	0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
511	-0.000	0.000	-0.000	-0.0001	0.0000	0.0001
517	-0.001	0.000	-0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
570	0.000	0.000	-0.000	-0.0213	-0.0000	-0.0116
580	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0250	0.0000	0.1017
590	-0.000	-0.000	0.000	-0.0097	-0.0000	-0.1780
599	-0.000	-0.036	-0.000	0.0003	-0.0000	0.0613
600	0.000	-0.000	-0.000	-0.0015	0.0000	0.0856
605	-0.000	-0.000	0.000	-0.0010	0.0000	-0.0105
610	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0005	-0.0000	-0.0435
620	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0114	0.0000	0.0001
630	-0.000	-0.000	0.000	-0.0115	0.0000	0.0000

ANNEXE

660	0.000	0.000	-0.000	0.0001	-0.0000	0.0001
661	0.000	-0.000	-0.000	0.0001	-0.0000	0.0000
690	-0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0001
691	0.000	0.000	0.001	-0.0000	0.0000	-0.0005
710	0.000	-0.003	0.004	0.0005	-0.0006	-0.0008
711	-0.000	-0.006	0.008	0.0006	-0.0007	-0.0010
740	0.000	-0.000	0.039	-0.0000	-0.0000	-0.0031
750	-0.000	-0.000	0.039	0.0003	-0.0000	-0.0031
775	0.110	-1.378	0.580	-0.0045	-0.0008	0.0099
780	0.094	-0.000	0.270	-0.0062	0.0035	0.0011
880	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0472
890	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0046
900	0.000	0.050	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0030
920	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0004
940	-0.024	-0.180	-0.024	0.0102	-0.0009	0.0007
980	-0.095	-0.307	0.001	-0.0094	-0.0003	-0.0009
1027	-0.136	-0.022	-0.000	-0.0034	-0.0011	-0.0027
1028	-0.138	-0.023	-0.000	-0.0034	-0.0014	-0.0042
1034	-0.097	0.000	-0.000	-0.0024	-0.0000	-0.0001
1035	-0.099	-0.001	0.000	-0.0024	-0.0001	-0.0003
1040	-0.000	-0.009	0.000	-0.0000	0.0000	0.0004
1050	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0009
1170	0.304	-0.785	0.598	0.0014	-0.0169	-0.0344
1180	0.141	-0.017	0.117	0.0052	-0.0206	-0.0093
1444	-0.000	0.007	-0.007	-0.0006	0.0001	0.0001
1446	-0.000	0.012	-0.012	-0.0006	0.0002	0.0001
1447	-0.000	0.014	-0.014	-0.0006	0.0002	0.0001
1460	0.001	0.010	-0.022	0.0003	-0.0002	0.0005
1480	-0.007	-0.000	-0.022	0.0007	-0.0003	0.0005
1609	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0465
1615	0.000	0.000	0.000	-0.0001	0.0000	-0.0118
1616	-0.000	-0.000	0.000	0.0004	-0.0000	0.0369
4065	-0.138	-1.082	-3.324	-0.0462	-0.0133	0.0204
4070	0.349	-1.080	-2.223	-0.0462	-0.0133	0.0204
4071	0.566	-1.068	-1.731	-0.0462	-0.0133	0.0204
4080	0.000	-0.008	0.000	-0.0020	-0.0004	-0.0010
4090	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
8050	0.084	-0.042	-0.091	-0.0087	0.0007	-0.0010
8060	0.084	-0.051	-0.097	-0.0087	0.0007	-0.0010

ANNEXE

Cas N°2 (OPE) : conditions de fonctionnements

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (de.)	RY (deg)	RZ (deg)
20	-0.000	0.000	0.015	0.0000	0.0002	0.0000
30	-0.007	-0.000	-0.044	-0.0001	-0.0000	0.0000
40	-0.005	-0.000	-0.755	0.0001	-0.0001	0.0000
45	0.023	0.000	-0.827	0.0000	-0.0106	0.0000
50	0.546	-0.000	-0.014	0.0000	0.0086	-0.0000
60	-0.007	0.000	-0.040	0.0000	-0.0005	-0.0007
90	0.007	-0.000	0.000	-0.0000	0.0002	-0.0042
100	0.005	-0.000	0.199	0.0001	-0.0001	-0.0194
110	0.002	-0.000	0.914	-0.0001	-0.0001	-0.0197
117	0.000	-0.582	1.234	0.0676	-0.0145	-0.0311
118	-0.000	-1.069	1.438	0.0685	-0.0212	-0.0290
130	-2.032	-1.736	3.192	-0.0120	-0.0987	-0.0033
140	-5.022	-1.342	3.755	-0.0142	-0.0987	-0.0039
180	0.443	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
190	-0.252	-0.000	0.001	-0.0000	0.0000	-0.0001
200	0.520	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
210	-0.238	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0001
220	-0.029	-0.000	-0.004	-0.0000	0.0000	0.0000
260	0.006	-0.000	-0.785	0.0001	0.0001	0.0000
270	0.008	-0.000	-0.074	-0.0001	0.0000	0.0000
280	0.000	0.000	-0.003	0.0000	-0.0000	-0.0000
283	-0.397	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
285	-0.000	-0.000	0.171	-0.0000	0.0010	-0.0000
420	14.216	0.119	5.557	-0.0167	0.0263	-0.0056
500	2.608	-0.000	0.005	-0.0003	-0.0141	0.0001
503	1.984	-0.000	-0.000	-0.0002	0.0003	0.0001
504	2.481	0.000	-0.000	-0.0001	0.0032	0.0002
506	2.844	-0.000	-0.000	-0.0002	0.0029	0.0002
509	3.398	0.000	0.000	-0.0002	0.0028	0.0002
510	1.675	-0.000	-0.000	-0.0003	-0.0006	-0.0000
511	3.419	0.000	0.001	-0.0002	0.0018	0.0002
517	1.858	0.000	0.003	-0.0003	-0.0096	0.0000
570	0.001	0.000	0.003	-0.0114	0.0001	-0.0060
580	0.000	-0.000	0.001	-0.0127	-0.0000	0.0523
590	0.000	-0.000	-0.000	-0.0049	-0.0000	-0.0898
599	-0.001	-0.018	0.000	0.0001	-0.0000	0.0310
600	0.000	-0.000	0.000	-0.0007	0.0000	0.0432
605	0.000	-0.000	-0.000	-0.0004	-0.0003	-0.0059
610	0.006	-0.000	0.000	-0.0000	0.0011	-0.0197
620	0.134	-0.000	-0.044	-0.0000	-0.0019	0.0001
630	-0.056	-0.000	-0.065	-0.0000	-0.0019	-0.0000
660	0.054	-0.000	-0.004	-0.0000	-0.0007	-0.0001
661	0.007	-0.000	-0.002	-0.0000	-0.0015	-0.0003

ANNEXE

690	-0.002	-0.000	0.027	0.0004	0.0022	0.0006
691	0.000	0.000	0.288	-0.0015	-0.0005	0.0049
710	-0.000	-0.681	0.884	0.0620	0.0067	0.0091
711	-0.000	-1.048	1.366	0.0490	0.0080	0.0104
740	3.181	0.101	2.752	0.0051	0.0952	-0.0169
750	4.843	-0.000	3.094	0.0071	0.0967	-0.0172
780	15.531	-0.000	4.155	-0.0180	0.0144	-0.0001
790	16.392	-0.000	3.541	-0.0180	0.0139	0.0001
800	17.423	-0.002	3.056	-0.0190	0.0054	0.0000
890	-0.238	-0.000	-0.010	0.0001	-0.0002	0.0022
900	0.028	0.023	-0.008	0.0001	-0.0002	0.0014
920	0.002	-0.000	0.017	0.0002	-0.0002	-0.0051
940	-10.319	-0.515	1.281	0.0201	-0.1308	0.0115
980	-16.670	-0.292	2.691	-0.0133	-0.0189	-0.0015
1027	9.890	1.707	-0.002	-0.0106	-0.0077	-0.0015
1028	10.026	1.730	-0.001	-0.0102	-0.0108	-0.0022
1034	6.930	0.002	-0.000	-0.0080	-0.0001	0.0201
1035	7.054	0.087	0.000	-0.0082	-0.0002	0.0297
1040	-0.242	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
1050	-1.972	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
1170	-3.885	0.009	2.692	-0.0020	-0.1050	-0.1060
1180	-3.603	1.169	0.269	0.0102	-0.0820	0.1518
1444	0.000	-0.410	0.404	-0.0257	-0.0278	-0.0273
1446	0.000	-0.132	0.132	-0.0337	-0.0323	-0.0296
1447	0.001	-0.017	0.026	-0.0350	-0.0341	-0.0301
1460	-3.080	0.585	0.169	0.0183	-0.1244	0.0042
1480	-7.073	-0.000	0.801	0.0184	-0.1253	0.0047
1609	0.001	-0.000	-0.001	0.0000	-0.0003	-0.0233
1615	-0.000	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0058
1616	-0.000	-0.000	-0.000	0.0002	-0.0000	0.0187
4065	0.045	-0.824	-3.201	-0.0441	-0.0109	0.0161
4070	0.428	-0.884	-2.149	-0.0441	-0.0109	0.0161
4071	0.599	-0.901	-1.679	-0.0441	-0.0109	0.0161
4080	0.003	-0.007	-0.002	-0.0018	-0.0003	-0.0009
4090	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
8050	20.080	-0.017	3.066	-0.0205	-0.0017	-0.0005
8060	20.253	-0.021	3.081	-0.0205	-0.0017	-0.0005

ANNEXE

Cas N°3 (SUS) :charges soutenues

Nœud	DX (mm)	DY (mm)	DZ (mm)	RX (deg.)	RY (deg)	RZ (deg)
20	0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0000
30	0.000	-0.000	0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
40	0.000	-0.000	0.000	0.0001	0.0000	0.0000
45	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
50	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
60	-0.000	0.000	0.000	0.0000	-0.0000	-0.0000
90	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0002
100	0.000	-0.000	0.005	0.0001	-0.0000	-0.0009
110	0.000	-0.000	0.005	-0.0001	-0.0000	-0.0010
117	-0.000	-0.005	0.012	0.0015	-0.0007	-0.0015
118	-0.000	-0.013	0.017	0.0028	-0.0010	-0.0014
130	0.021	-0.292	0.231	0.0034	-0.0004	-0.0031
140	0.010	-0.385	0.229	0.0022	-0.0004	-0.0037
180	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
190	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0001
200	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	0.0001
210	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0001
220	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
260	-0.000	-0.000	0.000	0.0001	-0.0000	-0.0000
270	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	-0.0000	-0.0000
280	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
283	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0000
285	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
420	0.036	-0.340	0.219	-0.0023	0.0008	0.0053
500	-0.000	-0.000	0.000	-0.0002	-0.0000	-0.0001
503	-0.000	-0.000	0.000	-0.0001	-0.0000	-0.0000
504	-0.000	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
506	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
509	-0.000	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
510	-0.000	0.000	0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
511	-0.000	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
517	-0.000	0.000	-0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
570	0.000	0.000	-0.000	-0.0107	-0.0000	-0.0058
580	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0125	0.0000	0.0511
590	-0.000	-0.000	0.000	-0.0048	-0.0000	-0.0895
599	-0.000	-0.018	-0.000	0.0001	-0.0000	0.0308
600	0.000	-0.000	-0.000	-0.0007	0.0000	0.0430
605	-0.000	-0.000	0.000	-0.0004	0.0000	-0.0053
610	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0219
620	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
630	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
660	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
661	0.000	0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000

ANNEXE

690	-0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
691	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0004
710	0.000	-0.001	0.001	0.0002	-0.0006	-0.0008
711	-0.000	-0.003	0.003	0.0002	-0.0007	-0.0009
740	0.001	-0.000	0.016	0.0000	-0.0001	-0.0029
750	-0.001	-0.000	0.016	0.0001	-0.0001	-0.0029
775	0.039	-0.511	0.224	-0.0021	-0.0003	0.0037
780	0.032	-0.000	0.093	-0.0031	0.0015	0.0002
517	-0.000	0.000	-0.000	-0.0001	0.0000	0.0000
570	0.000	0.000	-0.000	-0.0107	-0.0000	-0.0058
580	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0125	0.0000	0.0511
590	-0.000	-0.000	0.000	-0.0048	-0.0000	-0.0895
599	-0.000	-0.018	-0.000	0.0001	-0.0000	0.0308
600	0.000	-0.000	-0.000	-0.0007	0.0000	0.0430
605	-0.000	-0.000	0.000	-0.0004	0.0000	-0.0053
610	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0219
620	-0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0001
630	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
660	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
661	0.000	0.000	-0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
690	-0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
691	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0004
710	0.000	-0.001	0.001	0.0002	-0.0006	-0.0008
711	-0.000	-0.003	0.003	0.0002	-0.0007	-0.0009
740	0.001	-0.000	0.016	0.0000	-0.0001	-0.0029
750	-0.001	-0.000	0.016	0.0001	-0.0001	-0.0029
775	0.039	-0.511	0.224	-0.0021	-0.0003	0.0037
780	0.032	-0.000	0.093	-0.0031	0.0015	0.0002
790	0.031	-0.000	0.030	-0.0031	0.0014	0.0001
880	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0236
890	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0019
900	0.000	0.020	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0012
920	0.000	-0.000	-0.000	0.0000	0.0000	-0.0001
940	-0.008	-0.085	-0.008	0.0048	-0.0003	0.0010
980	-0.033	-0.140	0.003	-0.0047	0.0000	-0.0002
1027	-0.051	-0.008	-0.000	-0.0015	-0.0005	-0.0010
1028	-0.052	-0.009	-0.000	-0.0015	-0.0006	-0.0016
1034	-0.036	-0.000	-0.000	-0.0011	-0.0000	-0.0001
1035	-0.036	-0.000	0.000	-0.0011	-0.0000	-0.0002
1040	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
1050	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
1170	0.121	-0.302	0.227	0.0003	-0.0066	-0.0131
1180	0.057	-0.008	0.041	0.0018	-0.0085	-0.0037
1444	-0.000	0.002	-0.002	-0.0002	0.0002	0.0002
1446	0.000	0.004	-0.004	-0.0002	0.0003	0.0003
1447	0.000	0.004	-0.004	-0.0002	0.0003	0.0003
1460	-0.000	-0.000	-0.006	0.0001	-0.0001	0.0008
1480	-0.002	-0.000	-0.007	0.0001	-0.0001	0.0008

ANNEXE

1609	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0233
1615	0.000	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0059
1616	-0.000	-0.000	0.000	0.0002	-0.0000	0.0186
4065	-0.128	-0.978	-3.012	-0.0419	-0.0119	0.0185
4070	0.313	-0.976	-2.013	-0.0419	-0.0119	0.0185
4071	0.510	-0.965	-1.568	-0.0419	-0.0119	0.0185
4080	0.000	-0.007	0.000	-0.0018	-0.0004	-0.0009
4090	-0.000	-0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	-0.0000
8050	0.028	-0.027	-0.043	-0.0046	0.0003	-0.0007

Cas N°4 (EXP) : Expansion thermique

Nœud	DX (mm)	DY(mm)	DZ(mm)	RX (deg).	RY (deg)	RZ (deg).
20	-0.000	0.000	0.015	-0.0000	0.0002	-0.0000
30	-0.007	0.000	-0.044	-0.0000	-0.0000	-0.0000
40	-0.005	0.000	-0.755	-0.0000	-0.0001	-0.0000
45	0.023	0.000	-0.827	-0.0000	-0.0106	-0.0000
50	0.546	-0.000	-0.014	-0.0000	0.0086	-0.0000
60	-0.007	0.000	-0.040	0.0000	-0.0005	-0.0007
90	0.007	-0.000	0.000	-0.0000	0.0002	-0.0040
100	0.005	0.000	0.194	0.0000	-0.0001	-0.0185
110	0.002	0.000	0.908	0.0000	-0.0001	-0.0188
117	0.000	-0.578	1.222	0.0661	-0.0138	-0.0296
118	0.000	-1.056	1.421	0.0657	-0.0202	-0.0275
130	-2.054	-1.444	2.961	-0.0154	-0.0983	-0.0002
140	-5.032	-0.957	3.527	-0.0164	-0.0983	-0.0002
180	0.443	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
190	-0.252	-0.000	0.001	-0.0000	0.0000	0.0000
200	0.520	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
210	-0.238	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
220	-0.029	-0.000	-0.004	-0.0000	0.0000	0.0000
260	0.006	0.000	-0.785	-0.0000	0.0001	0.0000
270	0.008	0.000	-0.074	-0.0000	0.0000	0.0000
280	0.000	0.000	-0.003	-0.0000	-0.0000	0.0000
283	-0.397	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
285	-0.000	-0.000	0.171	0.0000	0.0010	0.0000
420	14.179	0.459	5.339	-0.0144	0.0255	-0.0109
500	2.608	-0.000	0.005	-0.0002	-0.0141	0.0002
503	1.984	-0.000	-0.000	-0.0001	0.0003	0.0001
504	2.481	-0.000	-0.000	-0.0001	0.0032	0.0001
505	2.371	-0.000	-0.001	-0.0002	-0.0126	0.0002
506	2.844	0.000	-0.000	-0.0001	0.0029	0.0001
509	3.399	-0.000	0.000	-0.0002	0.0028	0.0002
510	1.676	-0.000	-0.000	-0.0003	-0.0006	-0.0000
517	1.858	-0.000	0.003	-0.0002	-0.0096	0.0000
570	0.001	0.000	0.003	-0.0007	0.0001	-0.0002
580	0.000	-0.000	0.001	-0.0002	-0.0000	0.0012

ANNEXE

590	0.000	-0.000	-0.000	-0.0001	-0.0000	-0.0003
599	-0.001	-0.000	0.000	0.0000	-0.0000	0.0002
600	0.000	-0.000	0.000	-0.0000	0.0000	0.0002
661	0.007	-0.000	-0.002	-0.0000	-0.0015	-0.0003
690	-0.002	-0.000	0.027	0.0004	0.0021	0.0006
691	0.000	0.000	0.288	-0.0015	-0.0005	0.0053
710	-0.000	-0.680	0.882	0.0617	0.0073	0.0099
711	-0.000	-1.046	1.363	0.0487	0.0087	0.0113
740	3.180	0.101	2.736	0.0051	0.0953	-0.0139
750	4.844	-0.000	3.078	0.0069	0.0968	-0.0142
780	15.500	0.000	4.062	-0.0149	0.0129	-0.0003
790	16.361	-0.000	3.511	-0.0149	0.0125	-0.0000
880	0.002	0.000	-0.001	0.0000	-0.0003	-0.0000
890	-0.238	0.000	-0.010	0.0001	-0.0002	0.0003
900	0.028	0.004	-0.008	0.0001	-0.0002	0.0002
920	0.002	-0.000	0.017	0.0002	-0.0002	-0.0050
940	-10.310	-0.430	1.289	0.0153	-0.1305	0.0105
980	-16.637	-0.152	2.688	-0.0087	-0.0189	-0.0012
1027	9.941	1.715	-0.002	-0.0090	-0.0072	-0.0005
1028	10.078	1.739	-0.001	-0.0087	-0.0102	-0.0006
1034	6.965	0.002	-0.000	-0.0069	-0.0001	0.0202
1035	7.090	0.087	0.000	-0.0071	-0.0002	0.0299
1040	-0.242	0.000	0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
1050	-1.972	0.000	0.000	-0.0000	-0.0000	0.0000
1170	-4.006	0.311	2.464	-0.0024	-0.0985	-0.0929
1180	-3.661	1.177	0.229	0.0084	-0.0735	0.1555
1444	0.000	-0.412	0.407	-0.0256	-0.0281	-0.0275
1446	0.000	-0.135	0.136	-0.0335	-0.0325	-0.0299
1460	-3.079	0.585	0.175	0.0182	-0.1243	0.0034
1480	-7.071	0.000	0.808	0.0183	-0.1252	0.0039
1609	0.001	-0.000	-0.001	0.0000	-0.0003	-0.0000
1615	-0.000	0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	0.0000
1616	-0.000	-0.000	-0.000	0.0000	-0.0000	0.0001
4065	0.173	0.153	-0.189	-0.0023	0.0010	-0.0024
4070	0.115	0.092	-0.135	-0.0023	0.0010	-0.0024
4071	0.089	0.065	-0.111	-0.0023	0.0010	-0.0024
4080	0.002	-0.000	-0.003	-0.0000	0.0000	-0.0000
4090	0.000	-0.000	-0.000	-0.0000	0.0000	-0.0000
8050	20.052	0.010	3.109	-0.0159	-0.0019	0.0002
8060	20.225	0.012	3.126	-0.0159	-0.0019	0.0002

ANNEXE

Les résultats des forces et des moments :

Cas N°1 (HYD)

nœud	Stress de flexion KPa	Stress de torsion KPa	SIF/Index In Plane	SIF/Index Out Plane	Contraint calculé KPa	Contraint admissible KPa
20	41456.7	0.0	2.422	2.896	123037.4	437069.7
30	2188.0	0.0	1.000	1.000	192543.0	485633.1
40	3507.8	0.0	1.000	1.000	193862.9	485633.1
45	7.1	0.0	2.090	1.741	81587.8	437069.7
50	4.4	0.0	1.000	1.000	190359.4	485633.1
60	5508.8	0.0	2.422	2.896	87089.6	437069.7
90	2117.4	0.0	2.422	2.896	84138.6	437069.7
100	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
110	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
117	3254.5	0.0	2.097	1.747	85837.2	437069.7
118	4258.4	0.0	2.097	1.747	86949.8	437069.7
130	1664.6	0.0	1.000	1.000	192844.0	485633.1
140	12198.7	0.0	3.508	3.508	92955.1	437069.7
180	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
210	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
221	82.2	0.0	1.000	1.000	190437.2	485633.1
220	212.5	0.0	2.422	2.896	81793.2	437069.7
270	3109.3	0.0	1.000	1.000	193464.3	485633.1
280	31843.9	0.0	2.422	2.896	113424.6	437069.7
285	32369.9	0.0	3.508	3.508	113950.7	437069.7
420	2257.7	0.0	2.509	3.011	83044.9	437069.7
503	28.5	0.0	1.000	1.000	156748.8	485633.1
504	9.0	0.0	1.000	1.000	156729.2	485633.1
506	2.4	0.0	1.000	1.000	156722.5	485633.1
509	6.2	0.0	1.000	1.000	156726.5	485633.1
511	13.8	0.0	1.000	1.000	156734.4	485633.1
517	17.5	0.0	1.000	1.000	156727.1	485633.1
570	30391.0	0.0	1.879	2.172	83922.4	220784.9
580	93014.1	0.0	1.879	2.172	146545.5	220784.9
590	47827.0	0.0	1.000	1.000	172733.6	245316.6
600	32283.6	0.0	1.879	2.172	85815.0	220784.9
605	38190.4	0.0	1.000	1.000	163097.0	245316.6
610	40696.2	0.0	1.879	2.172	94227.6	220784.9
620	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
630	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
660	155.1	0.0	2.422	2.896	81735.8	437069.7
690	78.2	0.0	2.153	2.537	67306.4	437069.7

ANNEXE

691	6.3	0.0	1.000	1.000	156665.8	485633.1
692	20.2	0.0	1.000	1.000	156679.6	485633.1
710	38.2	0.0	1.000	1.000	156285.0	485633.1
711	178.1	0.0	1.000	1.000	156295.1	485633.1
740	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
750	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
880	43079.7	0.0	1.879	2.172	96611.1	220784.9
890	36745.6	0.0	1.000	1.000	161652.1	245316.6
900	11872.6	0.0	1.000	1.000	136779.2	245316.6
920	1383.9	0.0	2.313	2.751	54915.3	220784.9
940	7770.7	0.0	2.313	2.751	83172.3	437069.7
948	949.7	0.0	1.000	1.000	177719.3	485633.1
980	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1031	1500.9	0.0	1.000	1.000	203951.7	485633.1
1032	975.8	0.0	1.000	1.000	203427.0	485633.1
1033	860.2	0.0	1.000	1.000	203311.4	485633.1
1034	903.4	0.0	1.000	1.000	203354.9	485633.1
1035	974.8	0.0	1.000	1.000	203426.7	485633.1
1031	1500.9	0.0	1.000	1.000	203951.7	485633.1
1032	975.8	0.0	1.000	1.000	203427.0	485633.1
1033	860.2	0.0	1.000	1.000	203311.4	485633.1
1040	680.4	0.0	1.000	1.000	202297.3	485633.1
1050	0.0	0.0	1.000	1.000	201616.9	485633.1
1170	2543.9	0.0	1.000	1.000	127490.6	245316.6
1178	1433.0	0.0	1.000	1.000	126379.8	245316.6
1443	53.6	0.0	1.000	1.000	176530.8	485633.1
1444	31.7	0.0	1.000	1.000	176509.0	485633.1
1446	41.7	0.0	1.000	1.000	176520.7	485633.1
1447	71.2	0.0	1.000	1.000	176559.5	485633.1
1460	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1480	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1443	53.6	0.0	1.000	1.000	176530.8	485633.1
1444	31.7	0.0	1.000	1.000	176509.0	485633.1
1446	41.7	0.0	1.000	1.000	176520.7	485633.1
1610	4.4	0.0	1.000	1.000	124911.0	245316.6
1611	4.0	0.0	1.000	1.000	124910.5	245316.6
1612	4.4	0.0	1.000	1.000	124911.0	245316.6
1613	6.3	0.0	1.000	1.000	124912.9	245316.6
1615	29.9	0.0	1.000	1.000	124936.5	245316.6
1616	90.0	0.0	1.000	1.000	124996.6	245316.6
1610	4.4	0.0	1.000	1.000	124911.0	245316.6
4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4071	16121.7	0.0	2.153	2.537	80144.5	437069.7
4080	18331.7	0.0	1.000	1.000	175297.9	485633.1
4090	20858.0	0.0	1.000	1.000	177824.3	485633.1
4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

ANNEXE

4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
8050	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
8060	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

ANNEXE

Cas N°2 (OPE) : conditions de fonctionnements

Nœud	Stress de flexion KPa	Stress de cisaillement KPa	SIF/Index In Plane	SIF/Index Out Plane	Contraint calcule KPa	Contraint admissible KPa
20	97.2	0.0	2.422	2.896	53418.5	437069.7
30	198.2	0.0	1.000	1.000	194496.8	437069.7
30	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
45	32047.5	0.0	2.090	1.741	44358.1	437069.7
50	17202.4	0.0	1.000	1.000	189587.3	437069.7
60	4174.3	0.0	2.422	2.896	13069.4	437069.7
90	3689.2	0.0	2.422	2.896	13005.1	437069.7
100	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
110	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
117	22444.7	0.0	2.097	1.747	66884.3	437069.7
118	15521.4	0.0	2.097	1.747	63401.8	437069.7
130	6212.7	0.0	1.000	1.000	135304.5	437069.7
140	15170.9	0.0	3.508	3.508	67369.7	437069.7
180	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
210	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
220	910.2	0.0	2.422	2.896	29928.7	437069.7
260	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
270	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
280	394.5	0.0	2.422	2.896	13080.7	437069.7
285	1999.8	0.0	3.508	3.508	56295.5	437069.7
420	116809.0	0.0	2.509	3.011	169090.0	437069.7
500	480.3	0.0	1.000	1.000	128358.2	437069.7
502	2447.7	0.0	1.000	1.000	22805.1	437069.7
503	689.4	0.0	1.000	1.000	21046.8	437069.7
504	171.0	0.0	1.000	1.000	21292.8	437069.7
506	88.7	0.0	1.000	1.000	22324.8	437069.7
507	108.5	0.0	1.000	1.000	23599.9	437069.7
508	380.4	0.0	1.000	1.000	25164.4	437069.7
510	1041.8	0.0	1.138	1.138	29368.8	437069.7
511	3925.9	0.0	1.000	1.000	27756.2	437069.7
512	7648.2	0.0	1.000	1.000	31478.6	437069.7
516	14222.7	0.0	1.000	1.000	144357.9	437069.7
517	17901.5	0.0	1.000	1.000	138807.1	437069.7
570	15668.5	0.0	1.879	2.172	50358.9	220784.9
580	47795.4	0.0	1.879	2.172	82485.8	220784.9
590	24078.8	0.0	1.000	1.000	177757.5	220784.9
600	16252.9	0.0	1.879	2.172	50973.1	220784.9
605	19117.2	0.0	1.000	1.000	172888.8	220784.9

ANNEXE

610	17317.5	0.0	1.879	2.172	56780.8	220784.9
620	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
630	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
660	1908.2	0.0	2.422	2.896	18543.4	437069.7
680	1717.5	0.0	1.000	1.000	175201.6	437069.7
690	3270.3	0.0	2.153	2.537	27496.0	437069.7
691	1264.0	0.0	1.000	1.000	157128.1	437069.7
710	16988.7	0.0	1.000	1.000	138985.4	437069.7
711	13414.5	0.0	1.000	1.000	135411.2	437069.7
740	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
750	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
775	27128.9	0.0	1.000	1.000	165304.3	437069.7
780	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
790	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
880	21643.1	0.0	1.879	2.172	59797.7	220784.9
890	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
900	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
920	21300.9	0.0	2.313	2.751	60492.3	220784.9
940	4753.0	0.0	2.313	2.751	53004.3	437069.7
948	8211.0	0.0	1.000	1.000	128073.7	437069.7
970	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
980	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1027	12473.2	0.0	1.000	1.000	150841.4	437069.7
1028	19665.8	0.0	1.000	1.000	158034.1	437069.7
1034	42564.0	0.0	1.000	1.000	187658.5	437069.7
1035	55556.0	0.0	1.000	1.000	200650.4	437069.7
1040	0.0	0.0	1.000	1.000	134451.7	437069.7
1050	0.0	0.0	1.000	1.000	134451.7	437069.7
1170	9966.0	0.0	1.000	1.000	97794.1	220784.9
1180	9858.6	0.0	1.000	1.000	94735.8	220784.9
1443	22398.8	0.0	1.000	1.000	211587.3	437069.7
1444	18444.3	0.0	1.000	1.000	203997.1	437069.7
1446	8387.0	0.0	1.000	1.000	193939.7	437069.7
1447	6801.2	0.0	1.000	1.000	187911.0	437069.7
1460	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1480	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4071	14151.2	0.0	2.153	2.537	15734.5	437069.7
4080	16836.9	0.0	1.000	1.000	20047.6	437069.7
4090	19140.1	0.0	1.000	1.000	22350.8	437069.7
8050	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
8060	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

ANNEXE

Cas N°3 (SUS) :charges soutenues

Nœud	Stress de flexion KPa	Stress de cisaillement KPa	SIF/Index In Plane	SIF/Index Out Plane	Contraint calculé KPa	Contraint admissible KPa
20	10.4	0.0	2.422	2.896	54397.5	437069.7
30	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
45	0.2	0.0	1.000	1.000	126903.5	437069.7
50	0.1	0.0	1.000	1.000	126903.5	437069.7
60	152.5	0.0	2.422	2.896	54539.7	437069.7
90	181.1	0.0	2.422	2.896	54736.8	437069.7
100	60.2	0.0	1.000	1.000	126795.1	437069.7
110	110.9	0.0	1.000	1.000	126819.5	437069.7
117	1209.8	0.0	2.097	1.747	55980.5	437069.7
118	1601.4	0.0	2.097	1.747	56413.7	437069.7
130	650.0	0.0	1.000	1.000	127885.5	437069.7
140	4880.4	0.0	3.508	3.508	58935.4	437069.7
180	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
210	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
220	7.1	0.0	2.422	2.896	54394.3	437069.7
260	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
270	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
280	12.1	0.0	2.422	2.896	54399.2	437069.7
285	5.3	0.0	3.508	3.508	54392.4	437069.7
420	1034.0	0.0	2.509	3.011	55099.6	437069.7
500	338.0	0.0	1.000	1.000	104812.1	437069.7
503	12.6	0.0	1.000	1.000	2997.2	437069.7
504	4.0	0.0	1.000	1.000	2988.6	437069.7
506	1.1	0.0	1.000	1.000	2985.5	437069.7
507	0.4	0.0	1.000	1.000	2984.9	437069.7
508	0.7	0.0	1.000	1.000	2985.2	437069.7
509	2.7	0.0	1.000	1.000	2987.2	437069.7
510	44.0	0.0	1.138	1.138	44827.4	437069.7
511	6.1	0.0	1.000	1.000	2990.9	437069.7
517	8.7	0.0	1.000	1.000	104483.7	437069.7
570	15263.4	0.0	1.879	2.172	50951.0	220784.9
580	46720.4	0.0	1.879	2.172	82408.0	220784.9
590	24038.6	0.0	1.000	1.000	107309.7	220784.9
600	14238.8	0.0	1.879	2.172	49926.4	220784.9
605	19198.0	0.0	1.000	1.000	102469.1	220784.9
610	20445.3	0.0	1.879	2.172	56132.9	220784.9
620	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
630	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

ANNEXE

660	4.3	0.0	2.422	2.896	54391.5	437069.7
690	73.6	0.0	2.153	2.537	44877.2	437069.7
691	3.8	0.0	1.000	1.000	104458.6	437069.7
710	34.4	0.0	1.000	1.000	104314.7	437069.7
711	76.7	0.0	1.000	1.000	104356.9	437069.7
740	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
750	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
775	2512.5	0.0	1.000	1.000	137161.5	437069.7
780	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
790	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
880	21618.7	0.0	1.879	2.172	57306.3	220784.9
890	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
900	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
920	666.6	0.0	2.313	2.751	36354.2	220784.9
940	3568.0	0.0	2.313	2.751	53852.5	437069.7
980	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1027	2244.5	0.0	1.000	1.000	136995.8	437069.7
1028	3516.1	0.0	1.000	1.000	138267.4	437069.7
1034	230.0	0.0	1.000	1.000	134948.9	437069.7
1035	299.7	0.0	1.000	1.000	135018.6	437069.7
1040	0.0	0.0	1.000	1.000	134411.3	437069.7
1050	0.0	0.0	1.000	1.000	134411.3	437069.7
1170	1009.6	0.0	1.000	1.000	84293.5	220784.9
1180	2201.4	0.0	2.286	1.905	37704.1	220784.9
1444	4.1	0.0	1.000	1.000	117672.1	437069.7
1446	22.9	0.0	1.000	1.000	117690.9	437069.7
1447	32.7	0.0	1.000	1.000	117706.0	437069.7
1460	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1480	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1610	2.1	0.0	1.000	1.000	83273.2	220784.9
1611	1.9	0.0	1.000	1.000	83273.0	220784.9
1615	14.7	0.0	1.000	1.000	83285.7	220784.9
1616	44.2	0.0	1.000	1.000	83315.2	220784.9
4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4071	56343.7	0.0	2.153	2.537	56868.2	220784.9
4080	16559.4	0.0	1.000	1.000	19764.5	437069.7
4090	18840.5	0.0	1.000	1.000	22045.6	437069.7
8050	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
8060	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

Annexe

ANNEXE

Cas N°4 (EXP) : Expansion thermique

Nœud	Stress de flexion KPa	Stress de cisaillement KPa	SIF/Index In Plane	SIF/Index Out Plane	Contraint calcule KPa	Contraint admissible KPa
20	66.8	0.0	2.422	2.896	66.8	379899.6
30	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
45	20448.4	0.0	1.000	1.000	20448.4	379909.8
50	17202.4	0.1	1.000	1.000	17202.4	379909.8
60	5414.3	0.1	2.422	2.896	5414.3	379757.5
90	546.8	3488.3	2.422	2.896	3530.9	379560.3
100	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
110	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
117	27479.4	5122.6	2.097	1.747	27952.7	378316.6
118	20653.5	6016.7	2.097	1.747	21512.1	377883.4
130	5925.7	3.7	1.000	1.000	5925.7	379592.1
140	19567.1	3.7	3.508	3.508	19567.1	375361.7
180	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
190	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
200	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
210	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
260	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
270	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
280	443.4	0.0	2.422	2.896	443.4	379897.9
285	1303.1	0.0	3.508	3.508	1303.1	379904.7
420	156683.6	2124.9	2.509	3.011	156698.0	379197.5
500	350.1	2.0	1.000	1.000	350.1	395581.2
502	2447.4	2.0	1.000	1.000	2447.4	468376.5
503	689.3	2.0	1.000	1.000	689.3	468409.8
504	171.0	2.0	1.000	1.000	171.0	468418.4
506	88.7	2.0	1.000	1.000	88.8	468421.3
509	1844.9	2.0	1.000	1.000	1844.9	468419.8
511	3927.2	2.0	1.000	1.000	3927.3	468416.4
517	17906.8	24.7	1.000	1.000	17906.8	395911.5
570	550.1	57.0	1.879	2.172	553.1	268197.8
580	1434.2	57.0	1.879	2.172	1435.3	236740.8
590	40.3	3.3	1.000	1.000	40.4	259422.6
600	30.3	3.3	1.879	2.172	30.5	269222.4
605	91.8	0.2	1.000	1.000	91.8	264263.2
610	2059.1	0.1	1.879	2.172	2059.1	264692.9
620	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
630	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
660	2106.3	0.2	2.422	2.896	2106.3	379905.7
690	4355.6	77.7	2.153	2.537	4356.2	395916.6
691	1261.6	928.8	1.000	1.000	1566.6	395896.2
710	16994.8	1829.6	1.000	1.000	17093.0	395691.0
711	13491.2	1829.6	1.000	1.000	13614.7	395648.8

ANNEXE

740	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
750	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
775	25881.8	2435.7	1.000	1.000	25996.2	372272.3
780	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
790	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
880	131.9	4.3	1.879	2.172	131.9	261842.5
890	68.9	4.3	1.000	1.000	69.0	264932.8
900	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
920	29246.5	4.3	2.313	2.751	29246.5	282794.6
940	8501.9	3862.6	2.313	2.751	9338.2	383079.9
980	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1027	11774.1	566.3	1.000	1.000	11787.7	372642.7
1028	18508.9	566.3	1.000	1.000	18517.5	371371.0
1034	42789.6	482.3	1.000	1.000	42792.3	374624.8
1035	55847.7	482.3	1.000	1.000	55849.8	374555.1
1040	0.0	0.0	1.000	1.000	0.0	374547.2
1050	0.0	0.0	1.000	1.000	0.0	374547.2
1170	10583.9	4186.4	1.000	1.000	11381.8	282464.4
1180	19512.7	6522.9	2.286	1.905	20574.1	281444.7
1444	18442.7	6080.3	1.000	1.000	19419.1	386481.1
1446	8405.9	6080.3	1.000	1.000	10374.5	386463.4
1447	6812.8	6080.3	1.000	1.000	9131.5	386468.6
1460	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1480	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
1611	252.7	4.2	1.000	1.000	252.8	283459.3
1615	1.0	4.2	1.000	1.000	4.4	283446.6
1616	2.1	4.2	1.000	1.000	4.7	283417.1
4065	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4070	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
4071	0.0	0.0	2.153	2.537	0.0	469063.9
4080	341.1	32.6	1.000	1.000	342.7	452083.4
4090	362.9	32.6	1.000	1.000	364.4	449802.3
8050	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0
8060	0.0	0.0	0.000	0.000	0.0	0.0

BIBLIOGRAPHIE

1. **CHABOUBA, AMAR.** Cours de Transport Gaz .
2. **Menon, E.Shashi.** GAS PIPELINE HYDRAULICS. New York : Taylor and Francis Group, 2005. ISBN 0-8493-2785-7.
3. **BANMOUNAH, AMAR.** Perfectionnement Chefs de Quart-Dispatchers. 2007.
4. PIPEPHASE 9.1 Keyword Manual
5. PIPEPHASE 9.1 User's Guide
6. **PITROU, bernard.** tuyauterie.resistance des elements.
7. **SCHIMA, Jean.** Suportage .
8. **PITROU, bernard.** tuyauterie.resistance des elements.
9. CAESAR II USER GUIDE. s.l. : INTERGRAPH, 2015.
10. CAESAR II QUICK REFERENCE GUIDE. s.l. : INTERGRAPH, 2015.
11. COADE PIPE STRESS ANALYSIS SEMINAR NOTES.
12. BOUALI.cours de mecanique des sols