

Centre Universitaire Abd elhafid boussouf - Mila

Institut des sciences et de la technologie
Département de Génie Mécanique et Électromécanique



N° Réf :.....

Mémoire préparé En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER
En: Génie Mécanique

Spécialité : **ENERGETIQUE**

Etude et dimensionnement d'un réseau de
transport gaz haute pression (HP) pour
l'alimentation de gaz naturel de la ville de
TASSADANE HADDADA (W. Mila)

Préparé par : **Bougribia Nadir**
Rouana Azzeddine

Soutenu devant le jury

Pr. Saouli Saleh	C. U. Abdelhafid Boussouf,	Mila	Président
Dr. Ben Djaghlouli Ali	C. U. Abdelhafid Boussouf,	Mila	Examinateur
Dr. Zeghibid Ilham	C. U. Abdelhafid Boussouf,	Mila	Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Nous remercions en premier lieu celui qui nous a donnés la vie, et nous prend en
soin à chaque instant

ALLAH, le Clément de m'avoir donné la foi et le courage pour
Terminer ce travail.

Un grand merci à madame ZEGHBID Ilhem notre encadreur pour tous les
conseils et orientations tout

Au long de l'élaboration de notre étude.

Nos remerciements vont aussi aux messieurs les membres du jury d'avoir pris
Le temps et le soin de lire ce mémoire.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont participé à
Notre formation et l'aide qu'ils nous ont fournie pendant la période d'étude.

Nous réservons nos remerciements les plus chaleureux à nos familles. Rien
n'aurait

Été possible sans le soutien de nos parents, nos sœurs et nos frères, leurs appuis

Nous a aidés beaucoup à tenir jusqu'au bout ce travail.

Merci infiniment nos familles.

Dédicaces

Nous Dédions ce modeste travail :

A nos parents.

A nos frères et nos sœurs.

A toutes nos familles.

A tous nos amis.

Nadir et Azzeddine

ملخص

الهدف من هذا المشروع، دراسة أبعاد خط نقل الغاز الذي يزود بلدية تسدان حدادة - ولاية ميلة انطلاقا من دراسة التقنية له.

هذه الدراسة التقنية تتمثل في معرفة خصائص الغاز الطبيعي، مبادئ وشروط إنشاء أنبوب نقل الغاز، كيفية حماية هذا الأخير من التآكل من مختلف العوامل الخارجية، بالإضافة الى حساب قطر، سعة وسمك أنبوب الغاز اللازم من اجل مقاومة داخلية لضغط الغاز وخارجية خاصة في الأماكن العمومية بواسطة البرنامج حسابي (Fortran).
تبين هذه الدراسة أيضا كيفية تمديد الضغط العالي للغاز وسعة المحطة المسؤولة عليها وأهم مكوناتها، كما تساعد على معرفة طريقة معالجة ظاهرة تشكل الجليد في المحطة.
الكلمات المفتاحية: خط نقل الغاز، الضغط العالي، محطة تمديد الغاز.

Résumé

Le but de ce projet, c'est l'étude et dimensionnement d'un réseau de transport gaz pour alimenter la ville de Tassadane Haddada (W. Mila).

Cette étude technique consiste à connaître les caractéristiques du gaz naturel, les principes et les conditions de construction d'un gazoduc, comment protéger ce dernier de la corrosion et de divers facteurs externes, en plus d'un calcul de diamètre, capacité et épaisseur de la conduite requis pour la résistance interne à la pression du gaz et externe dans des endroits spécieux, utilisant un programme (Fortran).

Cette étude montre également comment détendre la haute pression du gaz et la capacité de poste de détente qui en est responsable, et ses composantes les plus importantes, et cela aide également à connaître la méthode de traitement du phénomène de givrage dans le poste.

Mots clés : gazoduc, haute pression (HP), poste de détente.

Abstract:

The purpose of this project is to study and size a gas transport network to supply the APC Tassadane Haddada (W. Mila) proceeding from the technical study. This technical study consists of knowing the characteristics of natural gas, the principles and conditions of construction of a gas pipeline, how to protect the latter from corrosion and various external factors, in addition to an expenditure diameter, capacity and thickness of the pipe. required for internal resistance to gas pressure and external in specious places advertising, using program (Fortran). This study also shows how to relieve the high pressure of the gas and the capacity of the reduction station which is responsible for it, and its more important components, and it also helps to know the method of treatment phenomenon of icing in the station.

Keywords: gas pipeline, high pressure, expansion station.

Table des matières

CHAPITRE I	1
I.1 Définition de gaz naturel :	1
I.2 Extrait de gaz naturel :	1
I.3 Origines des constituants du gaz naturel :	1
I.3.1 Gaz bactérien :	1
I.3.2 Gaz inorganique :	1
I.3.3 Gaz thermique :	1
I.4 Composition chimique du gaz naturel brut :	2
I.5 Types de gaz naturel :	2
I.5.1 Gaz sec :	2
I.5.2 Gaz humide :	2
I.5.3 Gaz à condensat :	3
I.5.4 Gaz à associe :	3
I.6 Gaz naturel en Algérie :	3
I.6.1 Gisement d'Hassi R'Mel :	4
I.7 Exploitation des puits et le traitement de gaz :	5
I.7.1 Dégazolinage :	5
I.7.2 Déshydrations :	5
I.7.3 Désulfuration :	5
I.7.4 Décarbonation :	6
I.8 Ouvrages installés sur le parcours de pipeline du transport de gaz naturel:	6
I.8.1 Les stations de compression :	6
I.8.2 Poste de sectionnement :	7
I.8.3 Poste de coupure :	8
I.8.4 Les gares de piston de ramonage (Lancement/réception) :	9
I.8.5 Poste de détente et réchauffeur :	10
I.8.6 Poste pré-détente :	12
I.8.7 Poste de prélèvement :	12
CHAPITRE II	15
II.1. Propriétés physico-chimiques du gaz naturel :	14
II.1.1 La densité (σ) :	14
II.1.2 La masse volumique (ρ) :	15
II.1.3 La viscosité :	15
II.1.3.a La viscosité dynamique (μ) : [6]	15

II.1.3.b La viscosité cinématique (ν) :	18
II.1.4 Le facteur de compressibilité (Z) :	18
II.2 Lois des pertes de charges :	18
II.2.1 Equations de Bernoulli généralisée :	18
Soient un conduit de section S dans laquelle s'écoule un élément de gaz compressible.	18
II.2.2 Développement de l'équation d'écoulement :	20
II.2.3 Le nombre de Reynolds :	23
II.2.3.a Les Différentes régimes d'écoulement :	23
II.2.4 Le coefficient de frottement :	23
II.2.5 Equations de PANHANDLE :	24
II.2.6 Densité fictive :	24
II.3. L'équation de la vitesse d'écoulement :	24
CHAPITRE III	27
III.1 Introduction :	25
III.2 Historique de transport par canalisation :	25
III.3 Les conditions générales de canalisations :	25
III.3.1 profondeurs d'enfouissement :	26
III.4 Les matériaux employés :	26
III.5: Les caractéristiques d'acier :	27
III.6 Formules de règlement de sécurité :	28
III.6.1 Pression limite de sécurité (P_c) :	28
III.6.2 pression maximale de service (P_{MS}) :	29
III.6.3 Pression d'épreuve (P_u) :	29
III.7 Spécifications relatives aux tubes en acier :[15]	30
III.8 La protection interne des conduites de canalisation :[6]	31
III.9 La protection externe des canalisations :	31
III.9.1 Définition de la corrosion :	31
III.9.2 Phénomène de la corrosion :	31
III.9.3 Différents types de protection :	32
III.9.3.1 Protection passive :	32
III.9.3.2 Protection active :	33
III.9.4 Techniques de protections cathodiques :	33
III.9.5 Protection par anodes réactives ou sacrificielles :	34
III.9.6 Protection par soutirage de courant :	35
III.9.7 Mesure de potentiel :	35

CHAPITRE IV	26
IV.1 Les alternatives possibles d'alimentation en gaz naturel de la ville de Tassadane Haddada (W. Mila) :	37
IV.3 Dimensionnement du pipeline Ø8" Tassadane Haddada (W. Mila) :	38
IV.3.1 Spécifications du conduit :	38
IV.3.2 Le diamètre du conduit :	39
IV.3.3 La contrainte maximale agit sur la paroi de la conduite :	44
IV.3.4 L'épaisseur de la conduite :	45
IV. 3.5 La capacité maximale du pipeline :	47
IV.3.5.1 Capacité maximale pour un diamètre de Ø 8" :	49
IV.4 Les différentes traversées de notre réseau de transport gaz (HP) :	51
IV.4.1 Points spéciaux N°01 (Pk : 2+009.24) :	51
IV.4.2 Points spéciaux N°02 (Pk : 2+267.00) :	53
IV.4.3 Points spéciaux N°03 (Pk : 7+155.07) :	54
CHAPITRE V	38
V.1 Principe de détente :	56
V.1.1 Principe pour abaisser la pression :	56
V.1.2 Etude des variations de P₂ avec S constante :	56
V.1.3 Principe pour maintenir la pression aval constant :	57
V.2 Etude l'écoulement de gaz travers un orifice :	57
V.3 Classification des détendeurs :	60
V.4 Phénomène de givrage :	60
V.4.1 Teneur en eau :	60
V.4.2 Hydrates :	61
V.4.3 Les méthodes de prévention de la formation d'hydrates :	61
V.5 Rôle de poste de détente :	63
V.6 La nourrice amont :	65
V.7 La nourrice aval :	65
V.8 Les filtres :	65
V.8.1 Principe de fonctionnement :	66
V.8.2 Choix d'un filtre :	66
V.9 Le détendeur régulateur de pression :	67
V.9.1 Domaine d'utilisation :	68
V.9.2 Description du fonctionnement de REFLUX 819 :	68
V.9.3 Choix de détendeur régulateur Poste détente DP Tassadan Haddada :	69

V.10 Le clapet de sécurité :	70
V.10.1 Description de fonctionnement du clapet de sécurité :	70
V.10.2 Choix du clapet de sécurité :	70
V.11 La soupape de sureté pilotée :	71
V.11.1 Description du fonctionnement :	71
V.11.2 Choix de la soupape de sûreté :	72
CONCLUSION GENERALE	
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

Liste des tableaux

Tableau	Descriptions	Page
Tableau I.1	Les composantes de gaz naturel.	2
Tableau I.2	Caractéristique de gisement Hassi R'mel.	4
Tableau II.1	Caractéristique de gaz naturel HASSI R'mel.	17
Tableau III.1	Différents croisements des canalisations.	26
Tableau III.2	La composition chimique de l'acier X42 utilisée dans la canalisation de transport de gaz.	26/27
Tableau III.3	La pression d'épreuve en fonction des zones traversées.	29
Tableau III.4	Composition chimique tubes soudée et sans soudée.	30
Tableau III.5	Propriétés mécaniques du tube soudée et sans soudée.	30
Tableau III.6	Compositions chimique (soudés/sans soudure).	30
Tableau II.7	PK et mesure de potentiel d'antenne TASSADAN HADDADA.	34
Tableau IV.1	La composition chimique de l'API 5L X42.	38
Tableau IV.2	Calcul le diamètre de la conduite.	42
Tableau IV.3	Calcul de l'épaisseur minimale de la conduite.	47
Tableau IV.4	Calcule la capacité maximale de la conduite de Ø 8".	50
Tableau V.1	Désignation du détendeur régulateur (PIETRO-FIORENTINI REFLUX 819) utilisé.	69

Listes des figures

Figure	Descriptions	Page
Figure I.1	Aperçu de gaz naturel en Algérie.	4
Figure I.2	Aperçu de gisement de gaz naturel.	4
Figure I.3	Unité du traitement de gaz.	6
Figure I.4	Station de compression HASSI R'mel.	7
Figure I.5	Post de sectionnement.	8
Figure I.6	Poste de coupure.	9
Figure I.7	Gare racleur de lancement.	10
Figure I.8	Gare racleur de réception.	10
Figure I.9	Schéma descriptive des composantes nécessaires d'une ligne de Poste détente.	11
Figure I.10	Poste de détente DP Tassadane Haddada; Cap : 5000 Nm ³ /h (W.Mila).	11
Figure I.11	Réchauffeur de poste détente DP Tassadane Haddada (W. Mila).	12
Figure I.12	Poste de prélèvement Ouled Smail-Teleghma (W. Mila).	13
Figure II.1	Ecoulement de gaz dans une conduite cylindrique en régime permanent.	19
Figure II.2	Etude l'écoulement de gaz dans une conduite cylindrique horizontale.	21
Figure III.1	Les couches de revêtement de la canalisation.	25
Figure III.2	Corrosion interne du tube de la canalisation.	31
Figure III.3	Formation de la couche double.	32
Figure III.4	Principe de la protection cathodique.	33
Figure III.5	Croquis de prise potentiel (anode magnésium).	34
Figure III.6	Croquis de protection par soutirage (poste de soutirage redresseur).	35
Figure III.7	Schéma représente l'opération de mesure potentiel de la canalisation.	36
Figure IV.1	Schéma descriptif du réseau transport gaz HP Ø8'' TASSADANE HADDADA (W. Mila).	37
Figure IV.2	Les variations de la pression aval (PAVAL) en fonction de diamètre.	43
Figure IV.3	Les variations de la vitesse d'écoulement en fonction de diamètre.	43
Figure IV.4	La variation de la vitesse d'écoulement V en fonction de débit Q.	50
Figure IV.5	Traversé de route Mechta Bouchakouf avec un canal des égouts (Pk : 2+009.24).	51
Figure IV.6	Croquis de traversée de route et croisement de canal d'égout	52

	(Pk : 2+009.24).	
Figure IV.7	Traversée d'oued el-Kabir (Pk : 2+267.00).	53
Figure IV.8	Croquis de listage et gabionnage de traversée d'oued el-Kabir (PK : 2+267.00).	54
Figure IV.9	Croisement gazoduc avec conduite d'eau et une piste forestière (Pk : 7+155.07).	54
Figure IV.10	Croquis de croisement de gazoduc avec conduit d'eau et piste forestière.	55
Figure V.1	Chute de pression en fonction d'une surface S et de débit Qs.	56
Figure V.2	Variation du débit en fonction de la pression aval.	58
Figure V.3	Plan de situation du poste détente DP TASSADANE HADDADA (W.Mila).	63
Figure V.4	Poste de détente DP Tassadane Haddada capacité 5000Nm ³ /h (W. Mila).	64
Figure V.5	Schéma des composants du poste de détente capacité : 5000 [Nm ² /h].	65
Figure V.6	Filtre de gaz naturel d'un poste de détente DP TASSADANE HADDADA (W. Mila).	67
Figure V.7	Régulateur détendeur PIETRO-FIORENTINI REFLUX 819.	69
Figure V.8	Le clapet de sécurité SBC 103 .	71

Nomenclature

A	La surface minimum	[cm ²]
C _g	Coefficient de débit	
C	Coefficient d'expansion	
D	Diamètre de la conduite	[mm]
e, t	Epaisseur de la conduite	[mm]
E	Limite élastique de l'acier	[bars]
F	Facteur de rugosité	
g	Accélération de pesanteur	[m/s ²]
GRD	Gare racleur départ	
GRA	Gare racleur arrivé	
H	La hauteur	[m]
i	Concentration en ions (g de métal / litre de solution)	[g /l]
K	Coefficient de l'écoulement k = 0.56	
L	Longueur de la conduite	[km]
l	Longueur de tube	[m]
M	Masse moléculaire	[g/mole]
M _a	Nombre de mach	
N _t	Nombre de tubes	
P ₁	Pression amont	[bars]
P ₂	Pression aval	[bars]
P _r	Nombre de Brandt	
P _T	Pression de tarage	[bars]
Q	Débite du gaz	[Nm ³ /h]
R _e	Nombre de Reynolds	
R _a	Nombre de Rayleigh	
R	Charge à la rupture	[bars]
S	Section d'entrée du filtre	[m ²]
SE	Surépaisseur de sécurité	[mm]
T _b	Température du gaz aux conditions normales	[K]
T ₀	Température minimale du gaz naturel en ville du Tassadane Haddada	[K]
U	Vitesse du gaz	[m/s]

V_c	Vitesse de son à l'orifice à la température T_c	[m/s]
X	Fraction molaire du constituant (i)	[mole]
Z	Facteur de compressibilité	
nF	Charge des ions [F = 96500 coulombs]	
ΔT	Différence de température créée dans le réchauffeur	

Indices

c	Chaud
cm	Critique du mélange
e, s	Entrée, sortie
ext	L'extérieure
FH	Formation d'hydrate
f	Froid
int	L'intérieure
i	Le constituant (i)
MS	Maximale de service
m	Moyen
mc	Minimale calculée
rm	Réduite du mélange
sm	Standard minimal

Symboles Grec

σ	Densité fictive	
ν	Viscosité cinématique du gaz	[m ² /s]
ϕ	Puissance échangée	[j/s]
β	Coefficient de dilatation	[K]
λ_{acier}	Conductivité de l'acier	[W/m ² °C]
ρ_0	Masse volumique du gaz	[kg/m ³]
μ_m	Viscosité dynamique du mélange	[kg/m.s]
μ	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
"	Pouce ; Unité de mesure égale à 2.54 [cm]	[pouce]

Introduction générale

Le gaz naturel est devenu une ressource clé du système énergétique mondial, à la fois abondante, polyvalente et relativement peu émettrice de dioxyde de carbone (CO₂). Le gaz naturel est utilisé pour la production d'électricité, pour les applications industrielles, pour les besoins thermiques des bâtiments et pour les transports. Bien que le gaz ait été historiquement produit à partir de gisement conventionnel, son extraction par des procédés non-conventionnels représente aujourd'hui une part importante de sa production, notamment en Amérique du Nord. Face à l'augmentation de la demande mondiale de gaz naturel, les échanges internationaux de gaz se sont multipliés et ont été accompagnés par les nombreux investissements dans les infrastructures et technologies de transport. La demande mondiale de gaz naturel devrait croître, tirée notamment par le secteur électrique où le gaz naturel peut remplacer le carbone et faciliter l'intégration des énergies renouvelables intermittentes.

L'Algérie essaye depuis l'indépendance de réaliser une base solide de la politique énergétique pour avancer dans le sens d'une plus grande maîtrise du processus moderne du gaz naturel, que la SONELGAZ se soit vue confiée la réalisation de sa mission est maître à disposition des consommateurs de l'énergie gazière.

L'objet de notre étude est l'alimentation de la ville de TASSADANE HADDADA (W.Mila) avec une source d'énergie économique durable et propre c'est le gaz naturel. Pour établir ce projet une étude de dimensionnement des dispositifs gaz pipeline est nécessaire, c'est d'ailleurs l'objectif essentiel de ce travail.

Ce mémoire est divisé comme suit :

Le premier chapitre représente une étude générale sur le gaz naturel, son origine, son traitement au niveau de puits et les différentes stations installées sur son parcours de transport.

Le deuxième chapitre consacré à une présentation des propriétés physico-chimiques du gaz naturel comme la masse volumique, la densité, la viscosité,etc. ainsi que le développement des différentes équations d'écoulement et les lois de perte de charge.

Dans le troisième chapitre, nous exposons des généralités sur le transport du gaz naturel par canalisation, les matériaux employés, les conditions générales de transport, la protection interne et externe des conduites contre le phénomène de corrosion.

Le quatrième chapitre, nous illustrons une présentation graphique aux différents résultats de dimensionnement de la canalisation Ø8" alimentant la ville de TASSADANE HDDADA (W. Mila). De plus, nous avons présenté les spécifications techniques utilisées au niveau les différents points spécieux relatifs à ce projet.

Le cinquième chapitre, traite la détente de gaz naturel, le fonctionnement d'un poste de détente et comment résoudre le problème de phénomène du givrage par le réchauffage du gaz.

Enfin, une conclusion générale clarifier les points essentiels et les résultats finals de notre étude.

Concernant le problème de formation d'hydrate l'étude a donnée des solutions pratiques par l'utilisation d'un système convenable de prévention de l'hydrate. Aussi le problème de la corrosion est discuté, et la protection cathodique est conçue.

Parmi les causes qui nous ont favorisé le choix de ce thème, ils reviennent dans l'ensemble à :

- La rareté d'études semblables au niveau de notre institut.
- Cette étude enveloppe plusieurs domaines de notre spécialité dont nous désirons mette en application.
- Le désir de créer une base dans le domaine d'énergie, surtout que l'Algérie dresse un nouveau plan directeur d'organisation à l'étude et en application aussi, qui devraient permettre d'accroître ses performances en matière de transport et distribution de l'énergie électrique et gazière.

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE GAZ NATUREL

I.1 Définition de gaz naturel :

Le gaz naturel est une combinaison de plusieurs hydrocarbures fossiles, utilisé comme combustible. Gaz inflammables, il est composé en grande partie de méthane et d'autres hydrocarbures, présent naturellement sous terre (souvent en association avec du pétrole).

I.2 Extrait de gaz naturel :

Le gaz naturel est extrait en creusant un trou dans la roche. Le forage peut être effectué sous terre ou en mer. Le matériel employé est fonction de la localisation de la poche de gaz et de la nature de la roche. Si c'est une formation peu profonde, des câbles de forage peuvent être utilisés. Un mouvement de va et vient dans le sol est effectué à plusieurs reprises à l'aide d'un foret métallique.

Le plus souvent, le gaz naturel sous pression sortira du puits sans intervention extérieure. Toutefois, il est parfois nécessaire de faire appel à des pompes ou à d'autres méthodes plus complexes. La méthode d'extraction la plus répandue est basée sur le recours à des équipements de pompage.

I.3 Origines des constituants du gaz naturel :

I.3.1 Gaz bactérien :

Ce mode est de l'action de bactéries sur les déchets organiques qui s'accumulent, le sédiment, le gaz formé est appelé gaz bactérien ou organique.

I.3.2 Gaz inorganique :

Ce mode de gaz reste très secondaire. Les gaz volcaniques où les sources hydrothermales contiennent parfois du méthane et les inclusions fluides des roches métamorphiques ou magmatiques renferment souvent des hydrocarbures légers, principalement du méthane.

I.3.3 Gaz thermique :

Au cours de l'évolution des sédimentaires, les sédiments sont portés à des températures et pressions thermiques qui vont donner à côté des hydrocarbures une large gamme de composés non hydrocarbonés tels que : H_2 , O_2 , N_2 .

I.4 Composition chimique du gaz naturel brut :

Le gaz naturel est le mélange dont le constituant principal est le méthane (CH₄), avec une teneur comprise entre 70% et 100 % en présence d'autres hydrocarbures (propane, butane, éthane, ...), de diazote, de dioxyde de carbone, de sulfure d'hydrogène et des gaz rares.

Tableau I.1 : composants de gaz naturel.

Gaz	Formule Chimique	Composition
Méthanes	CH ₄	70-90%
Ethane	C ₂ H ₆	0-20%
Propane	C ₃ H ₈	
Butane	C ₄ H ₁₀	
C5 +	C ₅ H ₁₂	0-10%
Dioxyde de carbone (CO ₂)	CO ₂	0-8%
Oxygène	O ₂	0-0.2%
Azote	N ₂	0-5%
Sulfure d'hydrogène	H ₂ S	0-5%
Gaz rare	Ar, He, Ne, Xe	Trace

I.5 Types de gaz naturel :

I.5.1 Gaz sec :

Ce type de gaz contient un grand pourcentage de méthane (CH₄) et contient très peu d'hydrocarbures plus lourds que l'éthane (C₂H₆), il ne forme aucune phase liquide dans les conditions de production.

I.5.2 Gaz humide :

Ce type de gaz forme une phase liquide (eau et/ou condensats) au cours de la production dans les conditions de surfaces quand il y'aura des chutes de pression et/ou de température, il est moins concentré en hydrocarbure légers.

I.5.3 Gaz à condensat :

Ce type de gaz forme une forme de phase liquide (eau et/ou condensat) dans le réservoir et au cours de la production, la phase condensée est plus riche en constituants lourds.

I.5.4 Gaz à associe :

Ce dernier type de gaz se trouve généralement dans les gisements pétroliers il coexiste dans le réservoir avec la phase huile soit sous forme libre (gaz de couverture) ou sous forme dissoute dans la phase huile. Le gaz dissous sera récupéré après la distillation atmosphérique du pétrole brut.

I.6 Gaz naturel en Algérie :

L'Algérie dispose d'importantes réserves prouvées de gaz naturel, estimée 3700 milliards de mètres cubes au 1^{er} janvier 1994, ce que représente 2.5% du total mondial et place l'Algérie au 8^{ème} rang. La production commercialisée de gaz à dépasser 55 milliards de mètres cubes en 1994 (contre 5 en 1973.27 en 1983) et elle devrait étendre 90 milliards de mètres cubes entre 2000-2005. La SONATRACH est une société publique d'hydrocarbures est la 5^{ème} société mondiale en matière de production de gaz naturel, certes loin derrière la société russe GAZPROM. Une grande partie de ce gaz est exportée : près de 32 milliards de mètres cubes en 1994 (13.5 par gazoducs et 18.1 par méthanier). De ce fait, l'Algérie est aussi le 5^{ème} exportateur mondial de gaz, derrière la Russie (qu'en a exporte 180 milliards de mètres cubes), le Canada (63), le Turkménistan (50) et les Pays-Bas (44).

La quasi-totalité du gaz algérien est exporté vers l'Europe. L'Italie est le principal acheteur de gaz algérien avec 14 milliards de mètres cubes livrés essentiellement par le gazoduc transmet. La France achète 9 milliards de mètres cube de GLN, la Belgique et l'Espagne un peu plus de 4 milliards chacune, le solde est exporté vers les USA 2.3 million de mètre cubes, la Tunisie (0.5) et la Slovénie (0.3). Certes les exportations gazières de l'Algérie.

Sept bassins potentiels identifiés

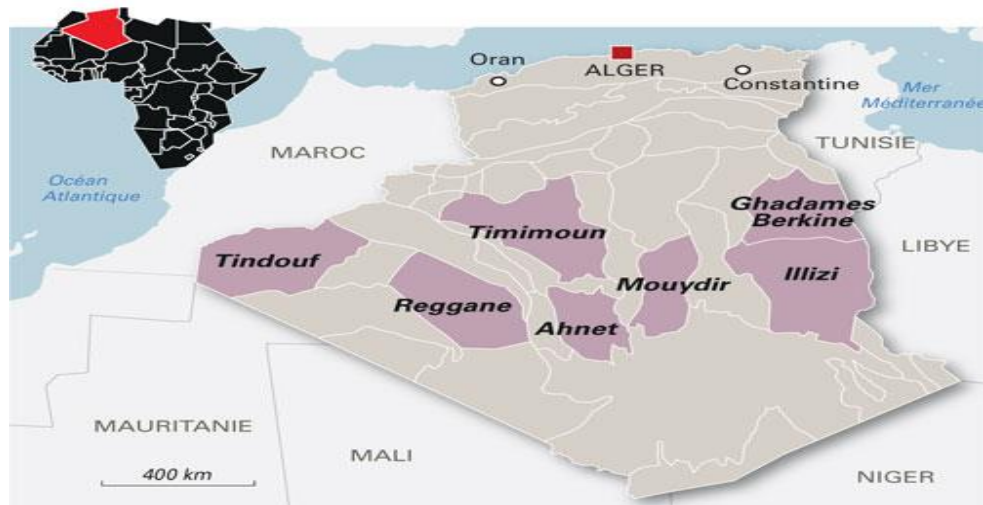


Figure I.1: aperçu de gaz naturel en Algérie.

I.6.1 Gisement d’Hassi R’Mel :

Le gisement d'Hassi R'Mel, est le plus grand gisement de gaz naturel en Algérie et de continent africain, découvert en 1956 par la compagnie française des pétroles Algérie, dans la formation triasique, le gisement représente encore le quart de la production de gaz du pays.

Tableau II.2 : Caractéristiques de gisement d’HASSI R'MEL.

Réserves de gaz total estimées	2400 milliards de mètres cubes
Production de gaz au pic	200 millions de mètres cubes
Pression au fond	310 bars

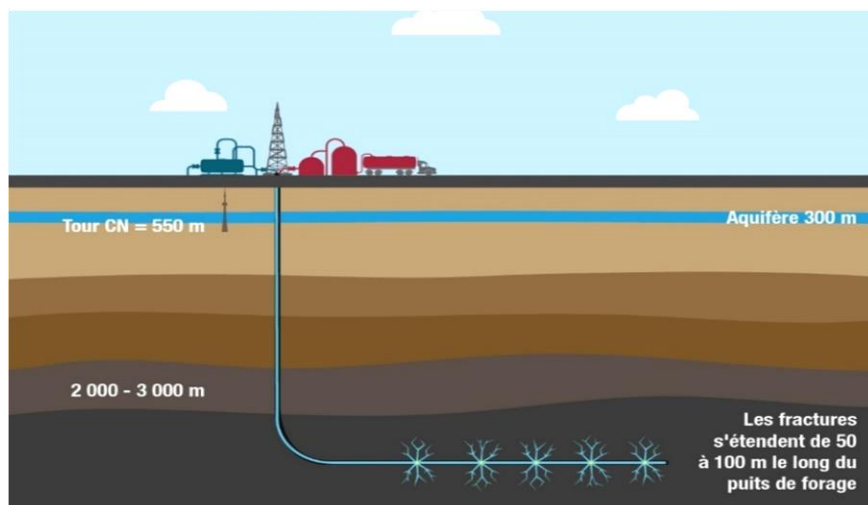


Figure I.2: Gisement de gaz naturel.

I.7 Exploitation des puits et le traitement de gaz :

Le gaz naturel est distribué par gazoduc à des installations de traitement appelées usines à gaz. Le gaz naturel y est séparé de l'eau, des impuretés et d'autres gaz comme sulfure d'hydrogéné. Certaines usines à gaz retirent aussi les liquides de gaz naturel (LGN) comme l'éthane, le propane et le butane.

I.7.1 Dégazolinage :

C'est l'enlèvement des produits condensables : par exemple on enlèvera :

- 70 % du propane.
- 80 % du butane.
- 100 % du C₅⁺.

Avant de l'envoi dans les canalisations, les produits récupèrent subissent un fractionnement pour obtenir par exemple : des butanes commerciaux de l'essence légère, du gazole.

I.7.2 Déshydrations :

La déshydrations est un procédé d'élimination des molécules d'eau liquide ou vapeur contenues dans le gaz, par utilisation des moyens physiques ou chimiques afin d'éviter les problèmes suivants :

- Risque de corrosion des pipes (surtout en présence des gaz des gaz acides tels que CO₂ et H₂S).
- Ecoulement diphasique et augmentation de la perte de charge.
- Risque de solidification dans les procédés cryogéniques.
- Diminution du pouvoir calorifique du gaz.

I.7.3 Désulfuration :

La désulfuration du gaz naturel est basée sur le procédé d'absorption sur charbon actif. Il s'agit de retirer les quelques derniers mg d'H₂S pour des débits de gaz naturel pouvant être supérieurs à 500 000 Nm³/h.

I.7.4 Décarbonation :

La décarbonation est un procédé destiné à réduire la teneur en CO₂, c'est-à-dire en dioxyde de carbone (ou gaz carbonique). Le dioxyde de carbone étant un des principaux gaz à effet de serre (avec la vapeur d'eau), la décarbonation à tout son intérêt, surtout lorsqu'on sait que la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère est d'environ 100 ans. Les principaux procédés de décarbonation sont la décarbonation du gaz naturel par absorption et la décarbonation du gaz par adsorption.

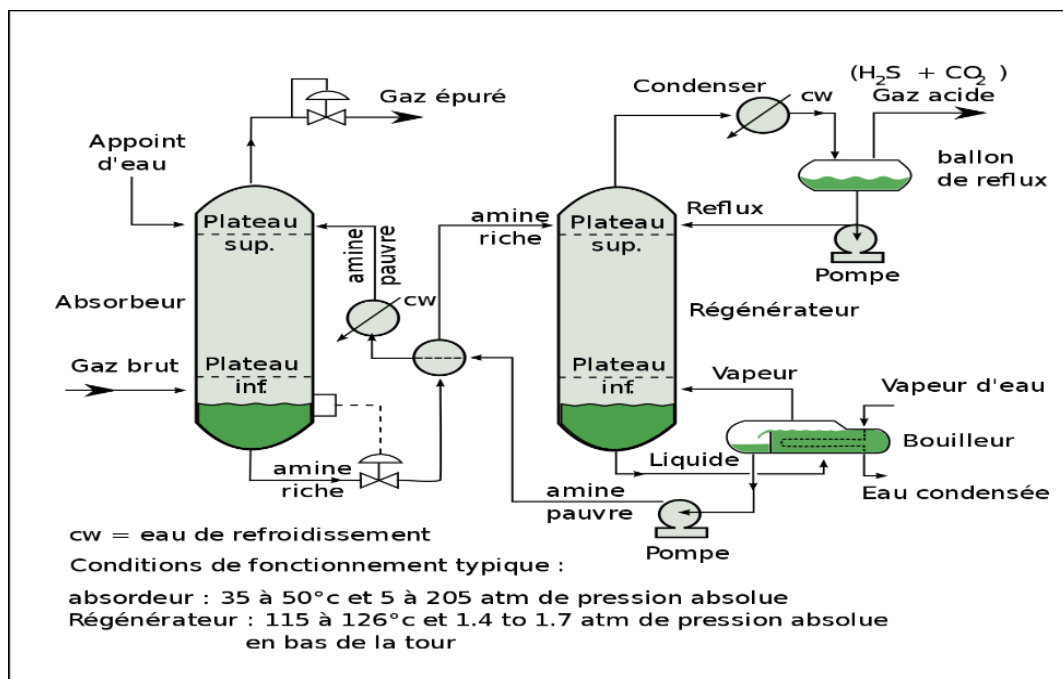


Figure I.3: Unité de traitement de gaz naturel.

I.8 Ouvrages installés sur le parcours de pipeline du transport de gaz naturel:

Le transport du gaz à travers le pipeline, il contient plusieurs points spéciaux, nous mentionnons les stations les plus importantes :

I.8.1 Les stations de compression :

Les stations de compression peuvent être caractérisées par leurs taux de compression, on peut distinguer :

- Les stations à taux de compression élevé, cette dernière attachée avec des compresseurs centrifuges à plusieurs étages pour comprimer le gaz naturel, la compression c'est fait à un ou plusieurs étages.
- Les stations à faible taux de compression, dont l'équipement peut être constitué de compresseurs à pistons à cylindre refroidis à l'air.



Figure I.4: Station de compression d'HASSI R'MEL.

I.8.2 Poste de sectionnement :

Le rôle d'un poste de sectionnement est d'interrompre la circulation du gaz l'intermédiaire d'un robinet qui est utilisé dans deux situations :

- Lors des opérations de maintenance : la fermeture de deux robinets de sectionnement et la décompression du tronçon compris entre ces deux robinets permettent à l'exploitation de réaliser certains travaux en toute sécurité.
- En cas d'incident sur la canalisation avec perte de confinement : la fermeture des robinets situés de part et d'autre du tronçon incriminé permet de réduire la quantité de gaz émise à l'atmosphère et donc de limiter les effets de l'accident.

Un poste de sectionnement contient :

- Un robinet enterré sur la canalisation principale, permettant d'interrompre la circulation du gaz.
- Un circuit d'équilibrage de diamètre inférieur à celui de la canalisation, en partie aérienne, permettant de procéder :

À un équilibrage des pressions de part et d'autre du robinet principale lorsque celui-ci est fermé avant sa réouverture.

Et dans le cas de poste équipé d'un évent, à une décompression de la canalisation par évacuation du gaz à l'atmosphère : cette opération étant réalisée exceptionnellement de manière locale en présence d'un opérateur.

Les distances respectées entre deux postes :

- 20 km maximum pour les canalisations ne traversant que des emplacements classés en catégorie A et B.
- 10 km maximum pour les canalisations emprunte un emplacement classé en catégorie C, avec une tolérance de +/- 10 % en cas de difficulté constructive.

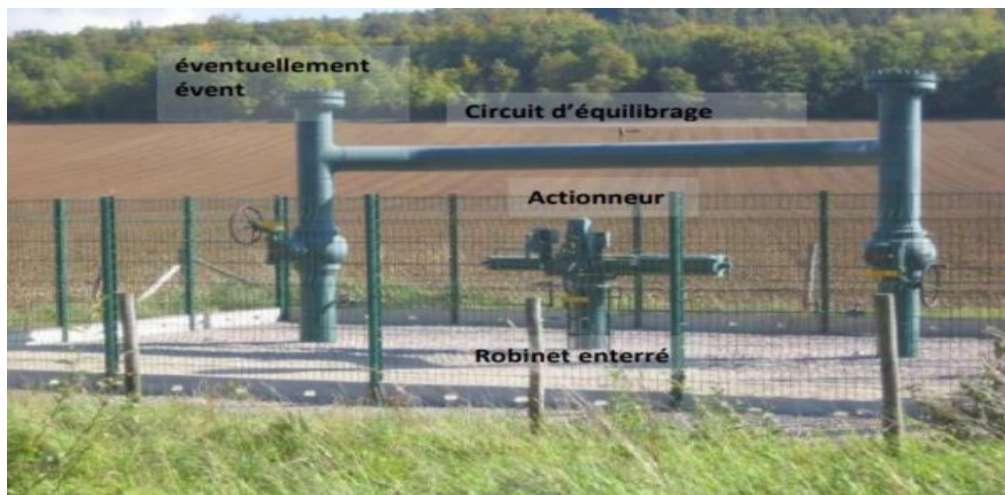


Figure I.5 : Poste de sectionnement.

I.8.3 Poste de coupure :

Un poste de coupure pour fonction principale à l'introduction d'un piston de nettoyage ou d'inspection. En effet, il est parfois nécessaire de nettoyer l'intérieure de la canalisation pour éliminer les poussières et les dépôts de gaz qui pourraient s'être accumulée sur la longueur de la canalisation. Par ailleurs des pistons instrumentés sont utilisés afin de détecter notamment des manques d'épaisseur ou des défauts géométriques lors des opérations de pitonnage, la gare est isolée de la canalisation à laquelle elle est associée.

Un poste de coupure est constitué essentiellement :

Un robinet d'isolement à passage intégral (robinet de même diamètre inférieur que la canalisation).

- Un sas (gare), muni d'une culasse permettant l'introduction ou la réception des pistons racleur.
- Un circuit d'équilibrage.
- Une ligne d'évent permettant d'évacuer le gaz naturel à l'atmosphère avant de pouvoir ouvrir la culasse.

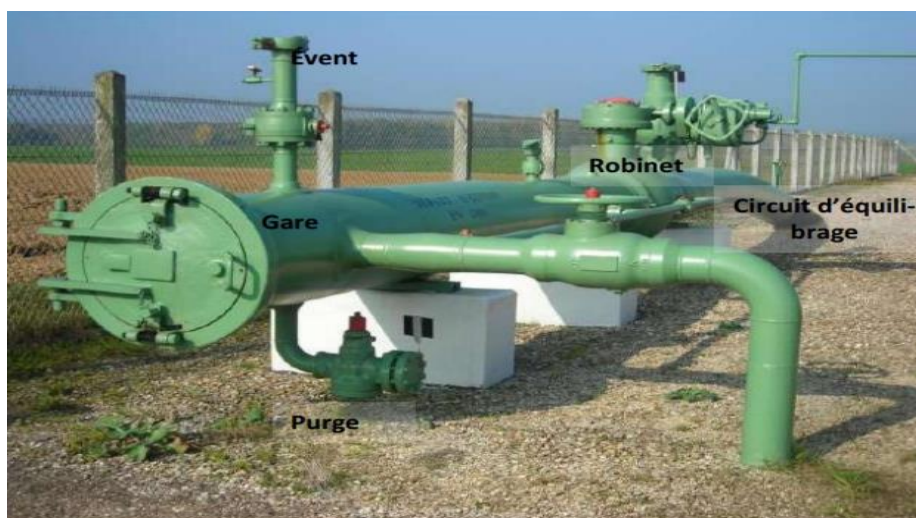


Figure I.6: Poste de coupure.

I.8.4 Les gares de piston de ramonage (Lancement/réception) :

Une gare de piston racleur est installée aux extrémités d'un pipeline, permet l'envoi et/ou la réception de pistons servant à nettoyer l'intérieur de la tuyauterie par raclage. Elle peut être raccordée par soudures ou par brides (gare de racleur mobile).

La gare de lancement de piston racleur est constituée : culasse d'ordre de mètres. Le piston racleur dans la gare, souffleur (blowdown) de compression pour lancer le racleur en cas d'essai hydrostatique, Mano de pression (pression indicateur) que indiquer la pression dans la gare, le purgeur (vent valve) pour dépresser la gare, canon de racleur (luncher barrel) il a un diamètre supérieur à diamètre du tube de ligne que raccorder avec-il, la réduction (reducer) existe entre le canon de racleur et la manchette de même diamètre de ligne brider en coter de vanne à passage total (launching valve) pour l'isolation de gare en cas normale de

fonctionnement du réseaux et l'indicateur de démarrage de piston (big inductor), enfin le by-pass (by passe line) afin de fournir le gaz à la station pour envoyer le piston racleur vers à l'arrivée du ligne de gaz.

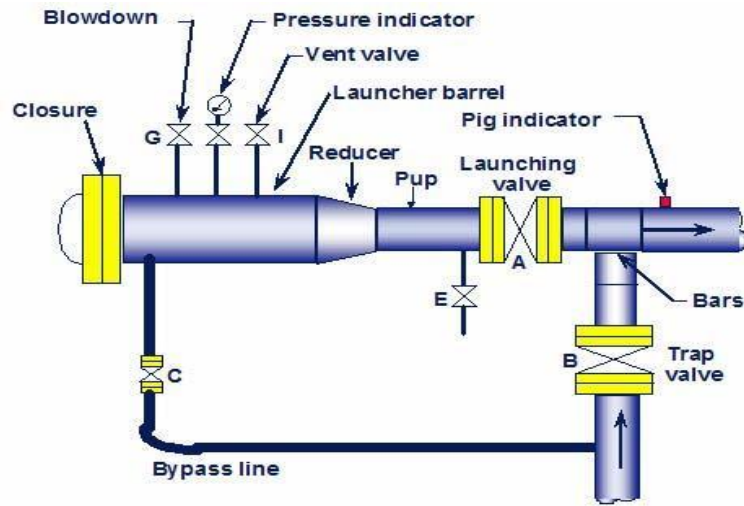


Figure I.7: Gare racleur de lancement.

La gare de réception de piston racleur est constitué de même composante de l'autre gare mais installée à contre sens de dernier avec un drain pour éjectée les vestiges de raclage.

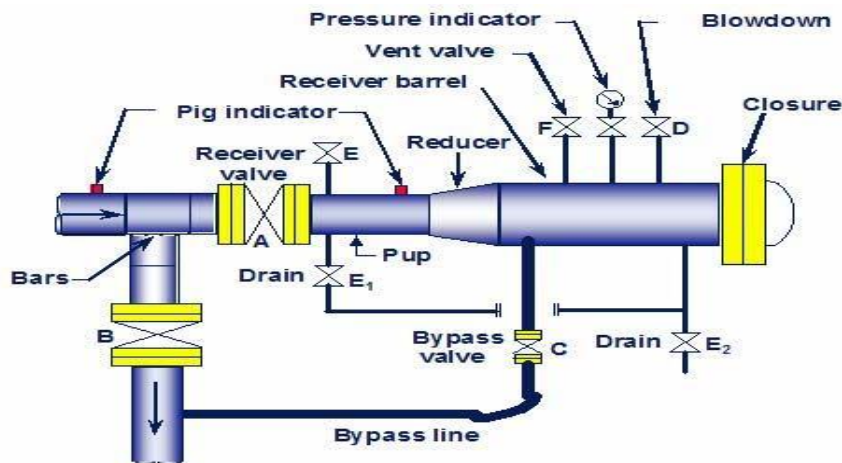


Figure I.8: Gare racleur de réception.

I.8.5 Poste de détente et réchauffeur :

Le poste de détente est un opérateur qui fonction automatiquement, pour d'abaisser la pression du gaz sur le réseau à haute pression pour exploiter sur les réseaux de distribution à base pression, il se compose généralement par : robinets, régulateurs de pression, les appareils

de mesures et de tuyauteries composées de tubes et de pièce de forme chaudronnées, la sécurité de pression (soupapes, vannes de sécurité).

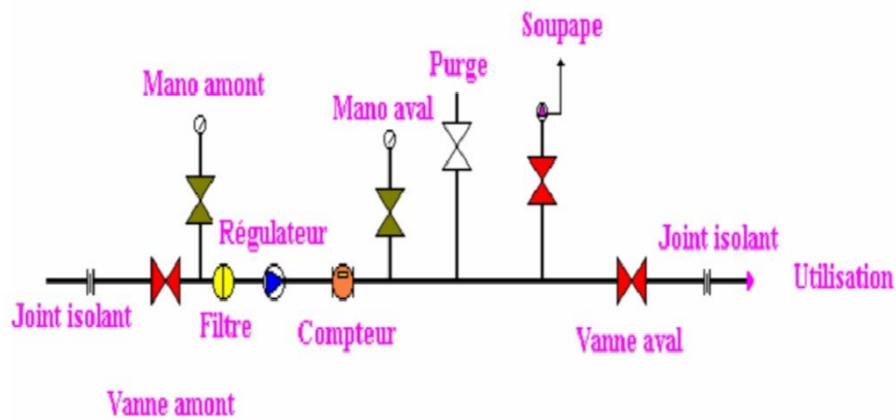


Figure I.9: Schéma descriptive des composants nécessaires d'une ligne de poste de détente.



Figure I.10: Poste de détente DP Tassadane Haddada ; Capacité : 5000 Nm³/h (W. Mila).

Le réchauffeur de gaz naturel permet de compenser la baisse de température du gaz lors du passage à travers le poste de détente et éviter donc la formation de givre sur l'aval de poste de détente. Le gaz entre dans le réchauffeur à basse température et circule dans un réservoir d'eau, ce dernier chauffe le gaz naturel à une température de sortie d'environ de 25 °C.



Figure I.11: Réchauffeur de poste détente DP Tassadane Haddada (W. Mila).

I.8.6 Poste pré-détente :

Les postes de pré-détente assurent la séparation entre deux canalisations de transports de gaz naturel à haute pression, il existe deux types des postes de pré-détente :

- **La pré-détente technique**, il sert à étager la détente entre deux réseaux de transport du GN de même pression maximale de service.
- **La pré-détente de sécurité**, il est placé entre le réseau principal et le réseau secondaire lorsque ce dernier à une pression maximale de service inférieure à celle du réseau principal.

I.8.7 Poste de prélèvement :

C'est un poste installé à l'extrémité du réseau de transport de gaz. Le rôle principal de ce poste est le comptage du gaz fournit par SONATRACH au SONALGAZ. Et il comporte en série :

- Un joint isolant.
- Les filtres.
- Une nourrice amont sur laquelle sont branchées 2 lignes de comptage.

Chapitre I: Généralités sur le gaz naturel

- Un joint isolant.
- Une gare de départ de piston de ramonage.



Figure I.12: Poste de prélèvement Ouled Smail-Teleghma (W. Mila).

CHAPITRE II

PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DU GAZ NATUREL ET EQUATIONS DECOULEMENT

II.1. Propriétés physico-chimiques du gaz naturel :

Pour dimensionner un pipeline du transport du gaz naturel, nous devons connaître les propriétés physico-chimiques de ce dernier.

II.1.1 La densité (σ) :

La densité d'un corps gazeux par rapport à l'air se calcule par le rapport entre la masse d'un volume donné de ce gaz et la masse du même volume d'air (pris dans les mêmes conditions de température et de pression).

$$PV = nRT \quad (1)$$

$$PV = \frac{m}{M}RT$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

de l'équation (2) soient :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT}$$

$$\sigma = \frac{\rho_{\text{air}}}{M_{\text{gaz}}} \quad (3)$$

de l'équation (3) soient :

$$\sigma = \frac{\frac{P_{\text{gaz}}M_{\text{gaz}}}{RT_{\text{gaz}}}}{\frac{P_{\text{air}}M_{\text{air}}}{RT_{\text{air}}}}$$

Donc :

$$\sigma = \frac{M_{\text{gaz}}}{M_{\text{air}}} = \frac{18,884}{29} = 0,651$$

II.1.2 La masse volumique (ρ) :

L'équation d'état est :

$$PV = ZnRT$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

$$PV = \frac{Z}{M} mRT \Rightarrow \frac{m}{V} = \frac{PM}{ZRT} \quad (5)$$

$$(4) = (5) \Rightarrow \rho = \frac{PM}{ZRT}$$

Dans les conditions normal ($P_0 = 1,013$ bars, $T_0 = 15$ °C)

$$\rho_0 = \frac{P_0 M}{ZRT} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \times 18,884 \cdot 10^{-3}}{8,314 \times 288,16} = 0,798 \text{ [Kg/m}^3\text{] Gaz parfait.}$$

$$\rho_0 = 0,798 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

II.1.3 La viscosité :

C'est une mesure de la résistance d'un fluide au changement de forme et détermine la vitesse de mouvement du fluide, par exemple : le déplacement du gaz naturel comme tous les gaz parfaits dans un conduit. Si le fluide de grande viscosité donc, il est de grande résistance, et si c'était de la viscosité nulle, la déformation de fluide est facile.

Nous spécifions : la viscosité dynamique et la viscosité cinématique.

II.1.3.a La viscosité dynamique (μ) : [6]

Il y a des formules du DEAN et STIEL que détermine la viscosité dynamique de gaz :

$$\mu_m \cdot \varepsilon_m = \begin{cases} 3,40 T_{rm}^{\frac{8}{9}} & , \text{ si } T_m \leq 1,5 \\ 16,68(0,1338 T_m - 0,0932)^{\frac{5}{9}} & , \text{ si } T_m \geq 1,5 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varepsilon_m = \frac{T_{cm}^{\frac{1}{6}}}{P_{cm}^{\frac{2}{3}} (\sum_1^n Y_i M_i)^{\frac{1}{2}}}$$

La température moyenne du gaz : 15 °C = $288,16$ [°K]

$$T_{rm} = \frac{T_m}{T_{cm}}$$

Les valeurs de T_{cm} et P_{cm} sont tirées du tableau II.1 :

Donc :

$$T_{rm} = \frac{288,16}{201,4827} = 1,43$$

On voit que T_{rm} est inférieur de 1,5 donc :

$$\mu_{cm} \cdot \varepsilon_{cm} = 3,40 \cdot T_{rm}^{\frac{8}{9}} \text{ et } \varepsilon_m = \frac{T_{cm}^{\frac{1}{6}}}{P_{cm}^{\frac{2}{3}} (\sum_1^n Y_i M_i)^{\frac{1}{2}}} = \frac{(201,4827)^{\frac{1}{6}}}{(44,6737)^{\frac{2}{3}} (18,884)^{\frac{1}{2}}} = 0,04424$$

$$\mu_{cm} = \frac{3,40 \times (1,43)^{\frac{8}{9}}}{0,04424} = 105,61857 \cdot 10^{-7} [\text{Kg/m.s}]$$

Tableau II.1 : Les caractéristique de Gaz naturel de HASSI R'MEL.[9]

Comp	Yi	M	M Yi	Tci [°K]	Tci Yi	Pci [bars]	Pci Yi	Zci	Zci Yi	Vci Yi [m ³]
N ₂	0,0585	28	1,6380	126,20	7,3827	33,50	1,9597	0,290	0,016	5,2357
CO ₂	0,0021	44	0,0924	304,20	0,6388	72,80	0,1528	0,274	0,0005	0,1947
H _c	0,0019	4	0,0076	5,19	0,0098	2,24	0,0042	0,301	0,0009	0,1088
CH ₄	0,8315	16	1,3600	190,6	159,151	45,4	37,9090	0,288	0,2404	82,665
C ₂ H ₆	0,0690	30	2,0700	305,4	21,0726	48,20	3,3258	0,285	0,0196	10,212
C ₃ H ₈	0,0210	44	0,9240	369,80	7,77658	41,90	0,8799	0,281	0,0059	4,2630
IC ₄ H ₁₀	0,0035	58	0,2030	408,10	1,4283	36,00	0,1260	0,283	0,00099	0,9205
nC ₄ H ₁₀	0,0053	58	0,3074	425,20	2,2535	37,50	0,1987	0,274	0,00145	1,3515
IC ₅ H ₁₂	0,0011	72	0,0792	460,40	0,5064	33,4	0,03674	0,271	0,00029	0,3366
nC ₅ H ₁₂	0,0012	72	0,0864	469,60	0,5635	33,3	0,0399	0,262	0,00031	0,3648
C ₆ H ₁₄	0,0014	86	0,1204	507,40	0,7103	29,3	4,0410	0,260	0,00036	0,518
N ₂	Trace	28	/	/	/	/	/	/	/	/
H ₂ S	Trace	34	/	/	/	/	/	/	/	/
H ₂ O	Trace	18	/	/	/	/	/	/	/	/
C ₆ H ₆	Trace	78	/	/	/	/	/	/	/	/
TOTAL	1,00	/	M _{gaz} = 18,884 [g/mole]	/	T _{cm} = 201,482 [°K]	/	P _{cm} = 44,6737 [bars]	/	Z _{cm} = 0,2873	V _{cm} = 106,1733 m ³

II.1.3.b La viscosité cinématique (ν) :

La viscosité cinématique représente la capacité de rétention des particules de fluides et quantifié sa capacité à s'épancher, et s'exprime en mètre carrés par seconde. Elle est le quotient de la viscosité dynamique par la masse volumique du fluide.

$$\nu = \frac{\mu_m}{\rho} \quad (6)$$

Dans les conditions normales :

$$\nu = \frac{\mu_m}{\rho_0} = \frac{105,61857 \times 10^{-7}}{0,798}$$

$$\sigma = 132,3541 \cdot 10^{-7} m^2/s = 0,132354 [\text{stocks}]$$

II.1.4 Le facteur de compressibilité (Z) :

Il existe deux méthodes pour définir ce facteur

a) 1^{er} méthode :

Le facteur de compressibilité Z est nécessaire pour calculer les propriétés du gaz et vous pouvez le trouver les valeurs d'une certaine température réduite par des abaques :

$$T_{rm} = \frac{T}{T_{cm}}$$

Et d'une pression réduite (lignes pleines) :

$$P_r = \frac{P}{P_{cm}}$$

b) 2^{ème} méthode :

Le facteur de compressibilité Z diminue avec l'augmentation de la pression $P_m \leq 70 [\text{bars}]$, et la valeur de Z est données par GDF par la relation :

$$Z_m = 1 - \frac{P_m}{500}$$

II.2 Lois des pertes de charges :

II.2.1 Equations de Bernoulli généralisée :

Soient un conduit de section S dans laquelle s'écoule un élément de gaz compressible.

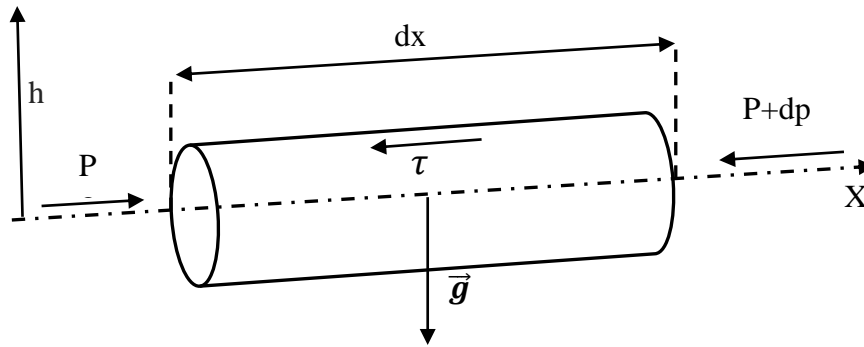


Figure II.1: Ecoulement de gaz dans une conduite cylindrique en régime permanent.

L'écoulement est permanent et les variables P , U , pression et vitesse respectivement sont uniforme dans la section droite du tube.

Sur la base de la loi fondamentale de la dynamique on peut écrire :

$$m \cdot \frac{du}{dt} = p \cdot S - \left(p + \frac{dp}{dx} \right) \cdot S - g \cdot \frac{dh}{dx} \cdot m - \tau \cdot \pi \cdot D \cdot dx \quad (7)$$

En simplifiant équation (7) on trouve :

$$\frac{dp}{\rho} + g \cdot dh + u \cdot du = \frac{4\tau}{\rho D} \cdot dx$$

La contrainte τ est exprimée par la formule suivante :

$$\tau = \frac{\lambda \rho u^2}{4} \cdot \frac{D}{2}$$

Ou λ : coefficient de frottement (dépend de Re , D et de la rugosité de la conduite), cela nous permet d'arriver à l'équation de Bernoulli généralisée :

$$\frac{dp}{\rho} + g \cdot dh + u du = -\lambda \cdot \frac{u^2}{2D} \cdot dx$$

Etant donné que :

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{P_0} \cdot \frac{ZT_0}{ZT} \text{ et } u = \frac{4Q}{\pi D^2} \text{ et } Q = \frac{z}{z_0} \cdot \frac{P_0}{T_0} \cdot \frac{T}{P} \cdot Q_0$$

On déduit :

$$\rho u \cdot \frac{du}{dx} + \rho_0 g \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{z_0 T_0}{z T} \frac{dh}{dx} + \frac{8}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \lambda \frac{Q_0^2}{D^5} \cdot \frac{z}{z_0} + \frac{dp}{dx} = 0 \quad (8)$$

Avec :

$$R_e = \frac{uD}{\nu} = \frac{\rho u D}{\mu} = \frac{4\rho_0 Q_0}{\pi \mu D}$$

Cas d'une conduite horizontal :

$$\frac{dh}{dx} = 0$$

L'équation (8) devient :

$$p \cdot \frac{dp}{dx} = -\frac{8}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot P_0 \cdot \frac{T_m}{T_0} \cdot z_m \cdot \frac{Q_0^2}{D^5}$$

En intégrant :

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_0 \cdot P_0 \cdot \frac{T_m}{T_0} \cdot z_m \lambda_m \cdot \frac{Q_0^2}{D^5} \cdot L \quad (9)$$

Nous utilisons cette équation dans le cas de conduite de gros diamètre et un écoulement largement turbulent (R_e de 4 à 40 millions). Elle est donnée par la formule suivante :

$$Q = 1,002 \cdot 10^{-2} \cdot E \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1,02} \cdot \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{s^{0,961} T_f L z} \right)^{0,51} \cdot D^{2,53} \quad (10)$$

Le coefficient de frottement f est exprimé par :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 9,54 \cdot E \cdot \left(\frac{Q_s}{D} \right)^{0,001961}$$

La formule de COLEBROOK est utilisée pour calculer le coefficient de perte de charge d'un écoulement turbulent d'un gaz dans une conduite :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{e}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (11)$$

II.2.2 Développement de l'équation d'écoulement :

L'équation d'écoulement général est applicable dans les conditions suivantes :

- Débit volumique constante.

- Température de gaz constante.
- Pipeline en position horizontale. Il n'existe sur la ligne ni un poste de détente ni un poste de compression.
- L'écoulement est adiabatique.

Considérons le volume ABCD du gaz de longueur élémentaire dl .

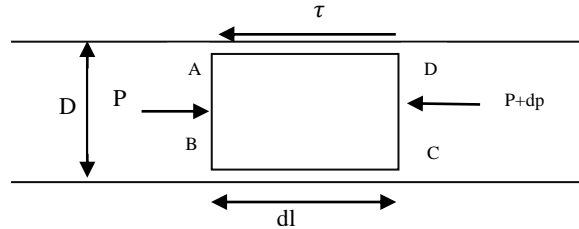


Figure II.2 : Etude l'écoulement de gaz dans une conduite cylindrique horizontale.

Selon la loi de NEWTON :

$$\sum F = m\vec{\gamma}$$

$$\frac{\pi}{4}D^2(P - (P + dp)) - \tau\pi Ddl = m \frac{dV}{dt} \quad (12)$$

On a : $V = \frac{dl}{dt}$

$$(p - p - dp) \frac{\pi D^2}{4} - \tau\pi Ddl = m \frac{dl}{dt} \frac{dV}{dl} = mV \frac{dV}{dl} = \rho V^2 \frac{dV}{dl}$$

$$m = \rho V = \vartheta \frac{\pi D^2}{4} dl$$

$$\tau = f \frac{\rho V^2}{8}$$

L'équation (12) devient après la simplification :

$$\frac{-dp}{\rho V^2} - \frac{f}{2} \frac{dl}{D} = \frac{dV}{V} \Leftrightarrow \frac{dp}{\rho V^2} + \frac{f}{2} \frac{dl}{D} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (13)$$

En utilisant l'équation de continuité :

$$m = \rho V_1 A_1 = \rho V A \quad (14)$$

Avec : $\rho = \frac{PM}{RT}, \rho_1 = \frac{P_1 M_1}{RT_1}$

$$A_1 = A \quad \text{Donc : } \rho_1 V_1 = \rho V \Leftrightarrow (\rho_1 V_1)^2 = (\rho V)^2$$

$$\Leftrightarrow \rho V^2 \left(\frac{PM}{RT} \right) = \rho_1 V_1^2 \left(\frac{P_1 M_1}{RT_1} \right) \quad \text{Avec : } M_1 = M, \quad T_1 = T$$

$$\rho V^2 P = \rho_1 V_1^2 P_1 \Rightarrow \rho V^2 = \left(\frac{\rho_1 V_1^2 P_1}{P} \right) \quad (15)$$

$$(15) \text{ dans (13) on obtient : } \frac{dp}{\rho_1 v_1^2 \frac{P_1}{P}} + \frac{f dl}{2 D} + \frac{dv}{V} = 0 \quad (16)$$

On intègre l'équation (16) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\rho_1 V_1^2 P_1} (p_2^2 - p_1^2) &= \frac{f}{2} \int \frac{dl}{D} \int \frac{dv}{V} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2\rho_1 V_1^2 P_1} (p_1^2 - p_2^2) &= \frac{f}{2} \int_0^L \frac{dl}{D} + \int_{V_1}^{V_2} \frac{dv}{V} \\ \Leftrightarrow \frac{1}{2\rho_1 V_1^2 P_1} (p_1^2 - p_2^2) &= \frac{f L}{2 D} + \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned}$$

Le terme $\ln \frac{V_2}{V_1}$ est négligeable auprès de $\frac{f L}{2 D}$ ($\ln \frac{V_2}{V_1} \ll \ll \frac{f L}{2 D}$)

$$\Rightarrow P_2^2 - P_1^2 = \rho_1 V_1^2 P_1 \frac{f L}{D} \quad (17)$$

$$m = \rho_1 V_1 A_1 = Q_b \rho_b \Rightarrow \rho_1 V_1 = \frac{Q_b \rho_b}{A_1} = \frac{Q_b \rho_b}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (18)$$

$$(15) \text{ dans (14) } \Rightarrow P_1^2 - P_2^2 = \frac{Q_b \rho_b}{\frac{\pi D^2}{4}} V_1 P_1 \frac{f L}{D} \quad (19)$$

$$V_1 = \frac{Q_b \rho_b}{\rho_1 \frac{\pi D^2}{4}} \quad (20)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1 M}{RT_1 Z} \quad (21)$$

(21) dans (20) on obtient :

$$V_1 = \frac{RT_1 Z Q_b \rho_b}{\frac{\pi D^2}{4} P_1 M} \quad (22)$$

(22) dans (19) :

$$\Rightarrow P_1^2 - P_2^2 = \frac{Q_b^2}{\left(\frac{\pi}{4} D^2\right)^2} \frac{R}{M} T Z \frac{f L}{D}$$

$$P_1^2 - P_2^2 = K L Z_m T_m \frac{Q_b^2}{D^5} f \quad (23)$$

Avec :

$$K = 16 \frac{\rho_b^2 R}{\pi^2 M}$$

II.2.3 Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds nous permet de savoir la nature de l'écoulement.

$$R_e = \frac{UD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad , \quad V = \frac{Q}{A}$$

Si on exprime Q en $[Nm^3/h]$ à (15 °c et 1,013 bars), D en $[mm]$, ν en $[Stocks]$ et selon la notation proposée par M. KOWARSKI :

$$R_e = \frac{3537 Q}{\nu D} \quad (24)$$

II.2.3.a Les Différentes régimes d'écoulement :

Il existe trois modes d'écoulement, mises en évidence par les expressions classique de Reynolds pour un gaz donné, le régime dépend uniquement de la vitesse :

$Re < 2300$: L'écoulement est laminaire.

$2300 < Re < 10^4$: L'écoulement est transitoire.

$Re > 10^4$: L'écoulement est turbulent.

II.2.4 Le coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement est obtenu à partir des différentes formules empiriques une de ces formules est utilisée par PANHANDELE, cette formule est utilisée par les américains pour le calcul du coefficient de frottement dans les grandes artères de transport du gaz naturel.

$$f = 0,014692R_e^{-0,03922} \quad (25)$$

II.2.5 Equations de PANHANDLE :

L'équation de Reynolds et l'équation d'écoulement générale avec une modification on arrive à une forme empirique qui est défini par :

$$P_1^2 - P_2^2 = 22100 \cdot \sigma \cdot L \frac{Q^{1,96}}{D^{4,96}} \quad (26)$$

L'équation de PANHANDLE est appliquée pour :

$$2 \cdot 10^6 < Re < 10^8$$

Et si $Re < 10^6$ on utilise une carte proposée par RENOARD.

II.2.6 Densité fictive :

La densité fictive est définie par PANHANDLE

$$\sigma = S \left[\frac{\nu}{0,16} \right]^{-0,4} Z_m \frac{T_m}{288,16} \left[\frac{0,85}{E} \right]^{-1,96} \quad (27)$$

II.3. L'équation de la vitesse d'écoulement :

L'équation de continuité est :

$$Q_b \rho_b = Q_{réel} \rho_{réel} \quad (28)$$

$$\rho_b = \frac{p_b M}{RT_b Z_b} \quad (29)$$

$$Q_{réel} = V_{réel} \cdot A \quad (30)$$

On introduit l'équation (30) et (29) dans l'équation (28) on obtient :

$$Q_b \frac{p_b M}{RT_b Z_b} = V_{réel} \cdot A \cdot \rho_{réel} \frac{M}{Z_{réel} T_{réel} R}$$

$$P_b = 1.013 \text{ bars}$$

$$Z_b = 1$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$V_{réel} = \frac{4Q_b Z_{réel} (T_m + 273.16)}{\pi D^2 P T_b 3600} \quad (31)$$

CHAPITRE III
GENERALITES SUR LE TRANSPORT DE GAZ
NATUREL PAR CANALISATIONS

III.1 Introduction :

Le transport du gaz naturel consiste à l'acheminer depuis la zone d'extraction jusqu'à la zone de consommation afin d'alimenter les réseaux de distribution. Les réseaux de transport de gaz sont souvent comparés à une autoroute car il est constitué de grands axes alors que les réseaux de distribution sont composés d'axes plus courts acheminant le gaz directement chez le consommateur.

III.2 Historique de transport par canalisation :

Le premier concept de pipeline aurait été formulé par le Russe Dimitri Mendeleïev en 1863. Il suggéra d'utiliser des tubes pour transporter du pétrole. Un autre Russe, Vladimir Choukhov aurait construit l'un des premiers oléoducs à la fin du XIXe siècle, en 1878-1880 près de Bakou.

III.3 Les conditions générales de canalisations :

Les canalisations de transport de gaz est constituée de tubes en acier de forme circulaire, ces derniers soudés bout à bout et revêtus d'un enrobage extérieur qui constitue une protection passive contre la corrosion. Ces tubes doivent être suffisamment robustes pour résister aux forces de pression du gaz surtout lorsqu'il s'agit de transport de gaz à pression élevée et aux conditions mécaniques ceci implique un choix judicieux des matériaux employés.

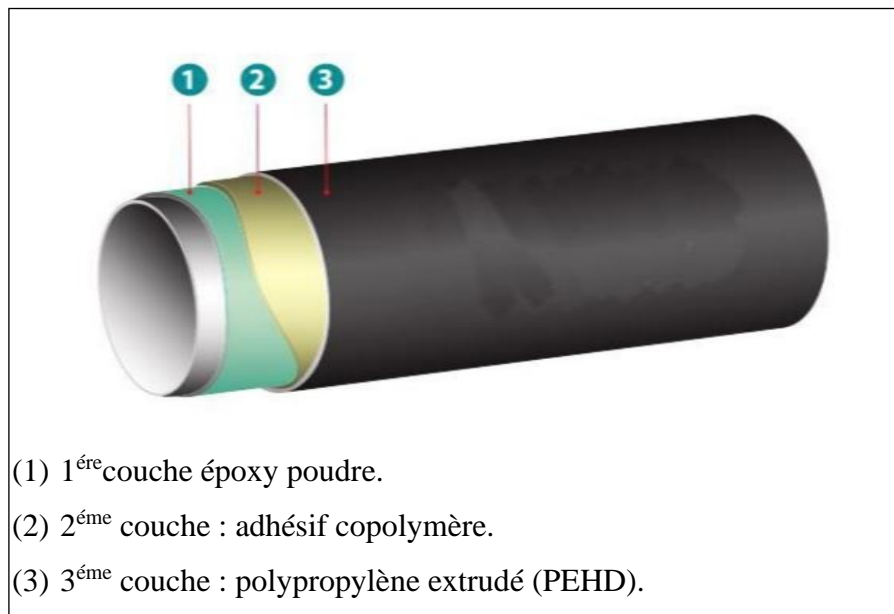


Figure III.1 : Les couches de revêtement de la Canalisation.

III.3.1 profondeurs d'enfouissement :

La mise en fouille des canalisations de transport du gaz hors clôture entourant les stations, sont posées à une profondeur d'au moins 0,80 m, mesurée entre la génératrice supérieure du tube et le niveau du terrain naturel, citée dans les cas suivants :

Tableau III.1 : Différents croisements des canalisations.

Type de croisement	Profondeur d'enfouissement minimale
Croisement avec une route	1,20 m sous le niveau supérieur de la route
Croisement avec route régionale (routes national, ...)	1,50 m sous le niveau supérieur de la route
Croisement avec voie ferrée	1,60 m sous le patin du rail
Croisement de cours d'eau classés, non classés et navigables	1,20 m sous la position la plus basse du profil théorique du lit du cours d'eau

III.4 Les matériaux employés :

L'acier est le matériau plus utilisé est spécialisée de haute résistance, conçu spécifiquement pour le transport du gaz à haut pression et dont l'extérieur sera recouvert d'une couche d'époxy de protection, le gaz naturel circule dans la conduite en étant comprimé. La composition chimique des aciers est élaborée selon un cahier de charge exigé par le client et contrôlée par la spectrométrie au laboratoire d'Arcelor Métal.

Tableau III.2 : La composition chimique de l'acier X42 utilisée dans la canalisation de transport de gaz.

Composition Chimique (%)	X42 API5L	X42
C	0.12÷0.17	0.14÷0.16
Mn	0.70÷1.10	1.30÷1.36
Si	0.15÷0.30	0.20÷0.30
P	<0.020	≤0.024
S	<0.020	≤ 0.014
Cr	<0.022	≤ 0.050
Mo	<0.025	≤0.050
Nb	<0.040	≤0.040
Al	<0.125	0.018÷0.040

Tableau III.2 : composition chimique de l'acier X42 utilisée dans la canalisation de transport de gaz (suite).

Composition Chimique (%)	X42 API5L	X42
Cu	<0.050	≤0.080
Sn	<0.050	≤0.010
Ni	<0.250	≤0.050
Ti	<0.035	≤0.039

III.5: Les caractéristiques d'acier :

L'acier caractérise par sa composition et les caractéristiques mécaniques qui en découlent, bien que non rattachées à un type d'essai normalisé, les caractéristiques les plus souvent citées sont :

- **Élasticité** : C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer sous une charge (un effort) et de retourner à son état initial après décharge.
- **Plasticité** : C'est la déformation d'un matériau sous une charge sans revenir à son état initial après décharge.
- **La rigidité** : C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer de façon élastique (et donc réversible). la rigidité est définie par le Module d'élasticité E. Plus le matériau est rigide, plus la force qu'on peut lui appliquer est importante.
- **Résistance maximale** : C'est la charge maximale que peut supporter un matériau. La charge peut être effort en traction ou couple en torsion.
- **Limite élastique** : c'est la charge maximale que peut supporter un matériau pour se déformer d'une façon élastique.
- **Ductilité** : C'est l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture. Un matériau qui se déforme plus avant rupture est plus ductile qu'un matériau qui se déforme moins.
- **Fragilité** : C'est la facilité avec laquelle on peut fracturer un matériau. Un matériau fragile se fracture sans se déformer plastiquement.
- **Ténacité** : C'est l'aptitude d'un matériau à absorber l'énergie lors d'une déformation plastique. C'est une combinaison entre la bonne résistance à la rupture et la bonne ductilité.
- **La dureté** : L'aptitude du métal à résister à la pénétration et à l'abrasion.

III.6 Formules de règlement de sécurité :

Le règlement a fait de l'objet d'arrête du 06/03/1961 s'applique pour des pressions de service effectives comprises entre 4 à 100 bars, présente par la relation de détermination des démentions des tubes droits en acier :

$$P_c = \frac{2T}{D_{ext}} e$$

La détermination du T est comme suite :

- **Catégorie (I)** : traversées du domaine public, régions habitées et revires : autoroute, cheminsferreux, oued, ...

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,6 E \\ et \\ 0,36 R \end{array} \right.$$

- **Catégorie (II)** : dans les zones hors de domaine public non habité, régions désertiques.

La valeur de T plus petite des deux expressions :

$$\left\{ \begin{array}{l} 73 E \\ et \\ 0,55 R : si l'element de canalisation enfouille. \\ 0,44 R : si l'element de canalisation est airien. \end{array} \right.$$

- **Catégorie (III)** : régions désertiques et assimilées.

La valeur de T est égale à la plus petite des deux expressions :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,80 E \\ et \\ 0,6 R : si l'element de canalisation enfouille. \\ 0,5 R : si l'element de canalisation est airien. \end{array} \right.$$

III.6.1 Pression limite de sécurité (P_c) :

C'est une pression toujours supérieure à la pression maximale de service, ce dernier ne dépassera pas la pression de sécurité (P_c), elle est liée à l'épaisseur du tube par la relation :

$$P_c = \frac{2T}{D_{ext}} e$$

III.6.2 pression maximale de service (P_{MS}) :

La pression maximale de service est définie à partir de la pression d'épreuve.

- **Catégorie (I) :**

$$P_{MS} = 0,67 P_U$$

- **Catégorie (II) et (III) :**

$$P_{MS} = 0,83 P_U$$

III.6.3 Pression d'épreuve (P_u) :

C'est une pression choisie la plus élevée possible, elle est déterminée en fonction de pression limite de sécurité (P_c) pour les tubes soudés :

- **Catégorie (I) :**

$$P_u = 1,5 P_c$$

- **Catégorie (II) :**

$$P_u = 1,233 P_c$$

- **Catégorie (III) :**

$$P_u = 1,205 P_c$$

Ce tableau mentionne chaque catégorie des zones traversées, la pression d'épreuve en fonction de la maximale de service.

Tableau III.3 : La pression d'épreuve en fonction des zones traversées.

Pression maximale de service $P_{MS}[bars]$	Pression d'épreuve $P_u[bars]$		
	Catégorie (I)	Catégorie (II)	Catégorie (III)
25	37,313	30,120	30,120
50	74,726	60,240	60,240
70	104,477	84,337	84,337
90	134,328	108,433	108,433
100	149,253	120,481	120,481

III.7 Spécifications relatives aux tubes en acier :[15]

Nous mentionnons les spécifications des tubes exploités dans les canalisations de transport de gaz naturel :

1. API 5L :

Cette spécification couvre de tube en acier soudée et sans soudée.

Tableau III.4 : Composition chimique des tubes soudée et sans soudée.

	Soudée		Sans Soudée	
	Grade A	Grade B	Grade A	Grade B
Carbone Max [%]	0,21	0,26	0,22	0,27
Manganèse Max [%]	0,90	1,15	0,90	1,15
Phosphore Max [%]	0,04	0,04	0,04	0,04
Soufre Max [%]	0,05	0,05	0,05	0,05

Tableau III.5 : Propriétés mécanique des tubes soudée et sans soudée.

Soudée et Sans soudée	Résistance Minimum		Limite Elastique	
	Psi	Hecto bar	Psi	Hecto bar
Grade A	48000	33,1	30 000	20,7
Grade B	60000	41,3	35 000	24,1

2. API 5L X :

Spécification des tubes du conduite à haute résistance soudés et sans soudure.

Tableau III.6 : composition chimique (soudés / sans soudure).

Nuances	Soudés			Sans soudure		
	X42	X46-X52	X56-X60	X42	X46-X52	X56-X60
C max[%]	0,28	0,30	0,26	0,29	0,31	0,26
Mgmax[%]	1,25	1,35	1,35	1,25	1,35	1,35
Ph max[%]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
S max[%]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

III.8 La protection interne des conduites de canalisation :[6]

Afin de protéger une canalisation de la corrosion interne résultant par des attaques chimiques de la surface interne de la conduit (figure : III.2) : présence de souffleur d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz. Ils ont peint la surface intérieure du tube avec une peinture lisse et brillante.



Figure III.2 : Corrosion interne du tube de la canalisation.

III.9 La protection externe des canalisations :

III.9.1 Définition de la corrosion :

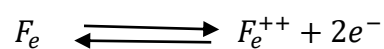
La corrosion d'un métal est la détérioration progressive du matériau causée par une réaction chimique et/ou électrochimique avec l'environnement.

III.9.2 Phénomène de la corrosion :

Lorsque le noyau est électriquement neutre, il est constitué des charges positives (protons) et charge négatives (électrons), ce dernier est perdu à l'environnement.

Les métalloïdes au contraire ont tendance à gagner des électrons, d'où formation d'ion négatif par excès de charges négatives.

Le métal reste chargé par les électrons (négativement), l'attraction des couches positives et négatives établit un certain équilibre qui forme ce qu'on appelle la couche double.



Cette équation est représentée sur la figure suivante :

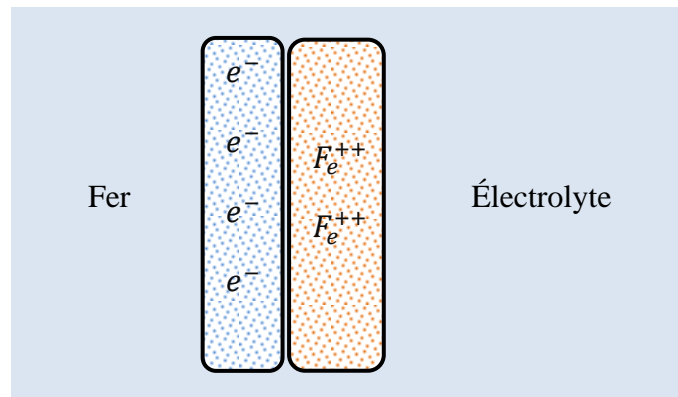


Figure III.3 : formation de la couche double.

Par contre au transport d'une charge de coulomb entre les couches positives et négatives.

L'équation de **Nerst** est montrée que l'équilibre du potentiel pris par le métal et sa solution d'équilibre :

$$F = F_0 + \frac{RT}{nF} \ln i$$

En substitution les valeurs des constantes et transformant le logarithme népérien en logarithme décimaux soient :

$$F = F_0 + \frac{0.0591}{n} \log i$$

si : $i = 1$, $\log i = 0$, donc : $F = F_0$, le potentiel est normal.

III.9.3 Différents types de protection :

Il existe deux types de protection d'un gazoduc pour démunie la corrosion des canalisations, nous mentionnant :

III.9.3.1 Protection passive :

Cette protection consiste à isolée la surface extérieure d'un pipeline de l'environnement agressif par des différents revêtements des conduites (revêtement métallique et non métallique) et les joints isolants entre les gazoducs.

III.9.3.2 Protection active :

Cette protection est basée sur une alimentation électrique externe qui empêche le démarrage de processus de corrosion nous classons :

III.9.3.2.a Les passivant et inhibiteurs :

La passivation est la protection du métal sous la forme d'un film d'oxide qui perdure sou certain limite de pH. Par exemple la phosphatation de H_3PO_4 est une mesure de protection similaire.

III.9.3.2.b Protection cathodique :

La protection cathodique est une technique contre la corrosion d'une canalisation ou contacte d'un électrolyte. Il s'agit d'un système de prévention électrochimique basé sur la diminution de potentiel de corrosion jusqu'à un niveau ou la vitesse de corrosion de métal significative.

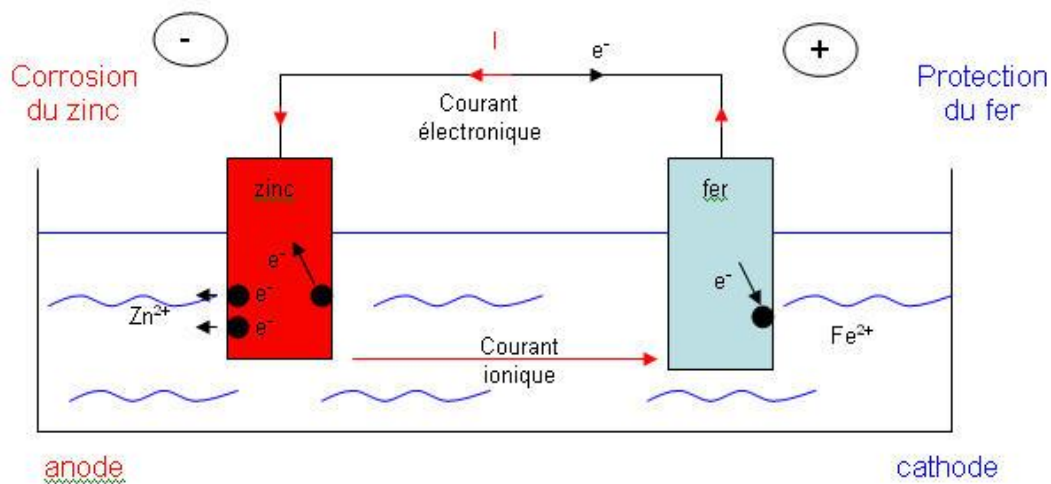


Figure III.4 : principe de la protection cathodique.

III.9.4 Techniques de protections cathodiques :

Les techniques de la protection cathodique sont :

- Protection par anodes réactives ou sacrificielles.
- Protection par soutirage de courant.

III.9.5 Protection par anodes réactives ou sacrificielles :

Ce mode de protection est basé sur la réaction d'une pile magnésium dont la pièce à protéger sera la cathode de la pile et pièce à consommer sera l'anode dans notre cas à mettre en place sera un métal dont le potentiel normal apparent sera plus électro-négatif par rapport à la conduite, la conduite à protéger qui elle joue le rôle de la cathode.

Dans notre projet, la protection de notre ouvrage Ø 8" antenne TASSADANE HADDADA d'une longueur 7 400 ml.

On a procédé d'une protection par quatre anodes sacrificielles.

Tableau III.7 : PK et mesure de potentiel d'antenne TASSADANE HADDADA.

N° anode	PK	Mesure potentiel de la canalisation
01	1+997.94	- 1400 [mV]
02	4+372.39	-1390 [mV]
03	5+277.17	-1410 [mV]
04	6+289.58	- 1390 [mV]

Après l'installation de ces quatre anodes sacrificielles, il a été constaté que les mesures de potentiel de cette canalisation sont aux normes éditées dans le transport du gaz par canalisations [<-650 mVolt]. Donc on a évité l'endommagement de la conduite et assurer la protection de la canalisation contre la corrosion.

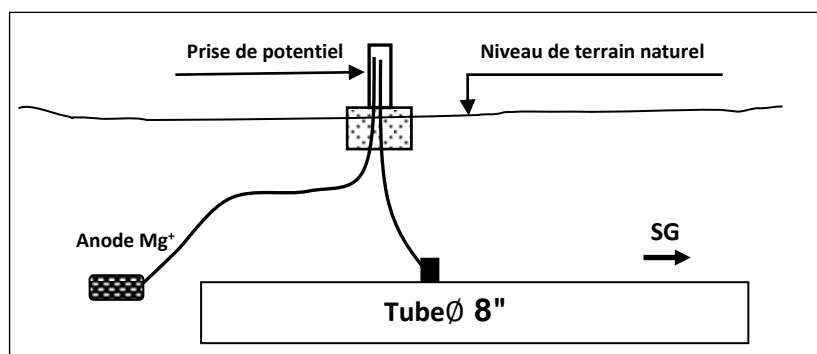


Figure III.5 : Croquis de prise potentiel (anode Mg⁺) utilisée sur l'antenne de la ville de TASSADAN HADDADA (W. Mila).

III.9.6 Protection par soutirage de courant :

Pour assurer la protection par cette méthode, l'ont besoin d'installer un poste de protection cathodique. Le rôle de poste a délivré le courant nécessaire à la protection de la structure. De façon général un poste est constitué de :

- **Un branchement en tension** : provenant d'une source électrique.
- **Coffret de soutirage** : il comprend un disjoncteur (qui permet de protéger les équipements électrique aval), un compteur, un transfo-redresseur, Ce dernier élément effectuer à chaque fois une régulation permettant de livrer le courant nécessaire pour la protection, il est donc un élément très important dans cette méthode de protection.
- Conducteur de liaison au déversoir et à la structure à protéger.

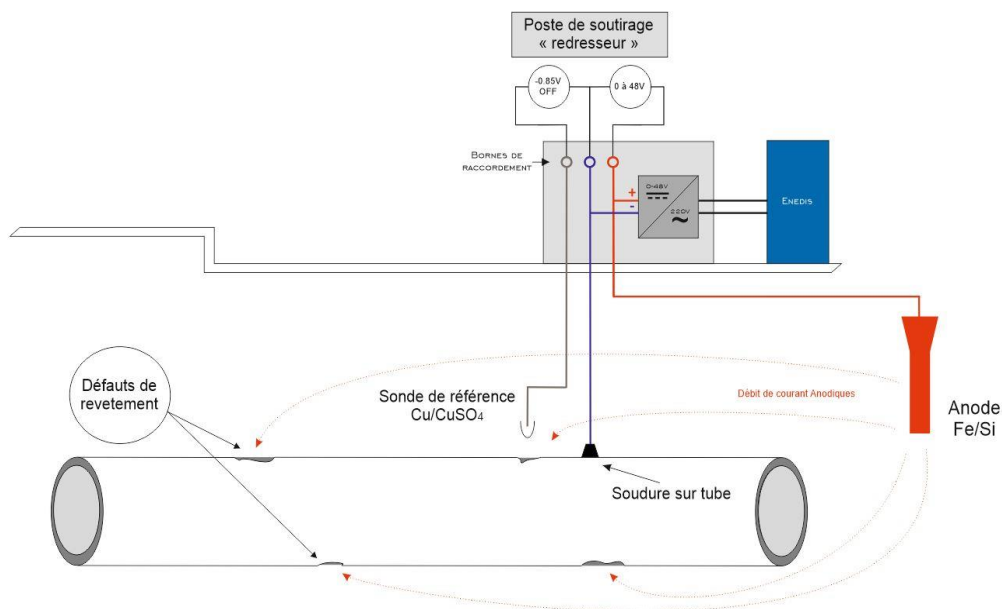


Figure III.6 : Croquis de protection par soutirage (poste de soutirage redresseur).

III.9.7 Mesure de potentiel :

Toutes mesures de potentiel nécessitent un contact électrique franc sur la canalisation qui peut être une prise de potentiel avec un câble attaché sur le conduit, ou par contacte directe sue une bride et tout élément conducteur non isolé électriquement du conduit, ...

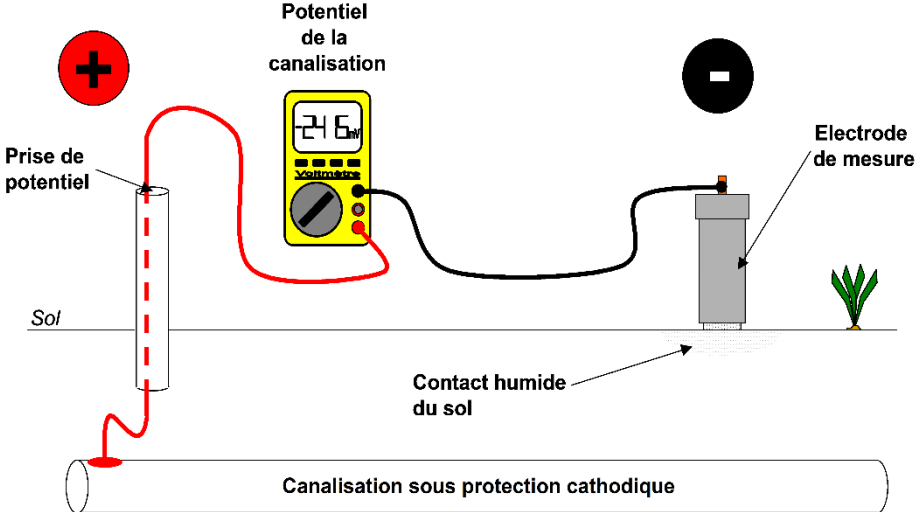


Figure III.7 : schéma représente l'opération de mesure le potentiel de la canalisation.

CHAPITRE IV

DIMENSIONNEMENT DU PIPELINE Ø8" TASSADAN HDDADA (W. Mila)

IV.1 Les alternatives possibles d'alimentation en gaz naturel de la ville de Tassadane Haddada (W. Mila) :

TASSADAN HADDADA est une ville appartenant à la Wilaya de Mila, cette commune est constituée d'un lycée, des écoles secondaires, des écoles primaires, environ de 500 d'habitas et quelques constructions de l'état, en plus il existe une base de vie prévue en cours de réalisation.

Le point de piquage de notre réseau haute pression est situé au niveau du gazoduc Ø8" alimentant la ville de LANTIA (W. Mila) au Pk : 8+417.0

La longueur de notre canalisation approximativement est de : 7400 ml entre le point de piquage et le terminal arrivée.

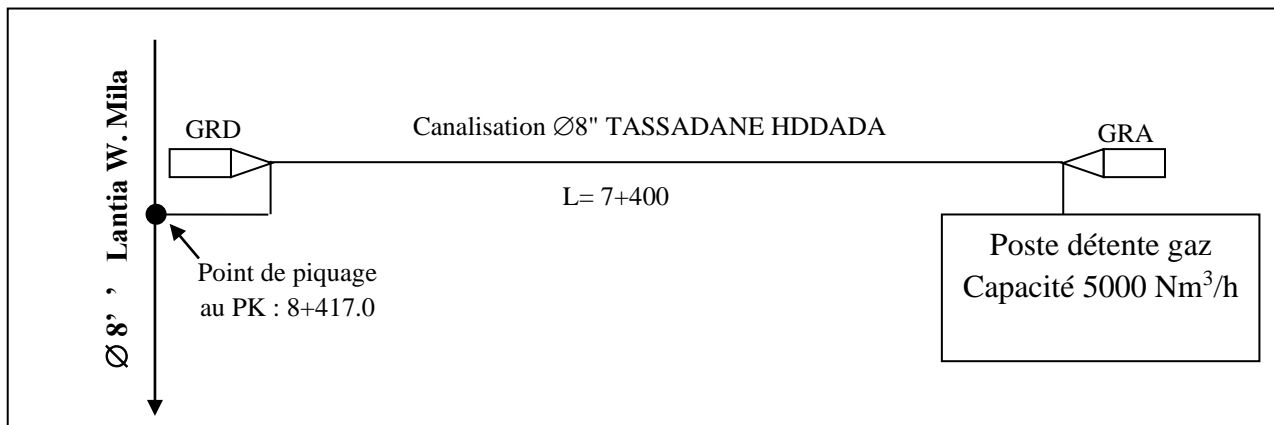


Figure IV.1 : Schéma descriptif du réseau transport gaz HP Ø8'' TASSADAN HADDADA (W. Mila).

IV.2 Les besoins énergétiques de la ville de Tassadane Haddada :

Les besoins énergétiques de la ville de Tassadane Haddada (W. Mila) sont présentés comme suit :

- Le lycée et les deux CEM : consommations du gaz naturel est : 3×25 [Nm^3/h]
- Les trois écoles primaires : consommations du gaz naturel est : 3×25 [Nm^3/h]
- 500 habitats de la ville : consommations du gaz naturel est : 500×6 [Nm^3/h]
- La consommation de différentes constructions de l'état (commune, Daira, la gendarmerie, ...) est : 25 [Nm^3/h]
- La consommation de la base de vie prévue est : 100 [Nm^3/h]

IV.3 Dimensionnement du pipeline Ø8" Tassadane Haddada (W. Mila) :

Pour déterminer les dimensions de notre conduite de gaz, plusieurs facteurs doivent être connus comme le débit volumique du gaz naturel, la température moyenne, la longueur de la conduite, la vitesse maximale de gaz, la densité du gaz, etc.

Données utilisées :

- Le débit volumique maximale du gaz naturel est : $Q = 4582.46 \text{ [m}^3/\text{h]}$.
- La longueur de conduite Ø 8" entre le point de piquage et le poste de détente est :

$$L = 7400[\text{ml}].$$

- La pression maximale délivrée par SONATRACH est : $P_m = 70,9[\text{bars}]$.
- La température moyenne de gaz est : $T_m = 288,16[\text{k}]$.
- La viscosité cinématique est : $\nu = 0.132354 \text{ [stocks]}$.

IV.3.1 Spécifications du conduit :

En général on distingue deux types de conduites : **API 5LX, API 5LS**

API 5L : c'est une spécification qui englobe les tubes de conduites en acier soudés et sans soudure.

API 5LX : cette spécification couvre les tubes de conduites à haut résistance sans soudure et soudés.

API 5LS : cette spécification couvre les tubes de conduite soudé en spirale.

La SONELGAZ a choisi l'**API 5L X42** vue sa résistance aux hautes pressions.

Sa composition chimique est résumée dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : La composition chimique de l'API 5L X42.

	Carbone	Manganèse	Phosphore	Soufre	Niobium	Vanadium	Titane
	%	%	%	%	%	%	%
X42	0,28	1,25	0,04	0,05	/	/	/

Du niobium, du vanadium et du titane ont une combinaison de ces trois éléments peuvent être utilisés au choix du fabricant.

Les propriétés mécaniques de ce dernier (l'API 5L X42) sont :

- La limite d'élasticité minimum : $E = 42000[\text{Psi}] = 28,9[\text{hecto bars}]$.
- La charge unitaire de rupture minimum : $R = 60000[\text{Psi}] = 41.3[\text{hecto bars}]$.

IV.3.2 Le diamètre du conduit :

- **La méthode de calcul :**

La formule de PANHANDELE est une équation à deux inconnues, pour sa résolution on a intérêt à utiliser une deuxième équation qui est celle de la vitesse d'écoulement :

$$\begin{cases} P_1^2 - P_2^2 = 22100 \cdot \sigma \cdot L \cdot \frac{Q^{1,96}}{D^{4,96}} & (32) \\ V_{\text{réel}} = \frac{4Q Z_2 (T_m + 273.16)}{\pi D^2 P_2 T_b 3600} & (33) \end{cases}$$

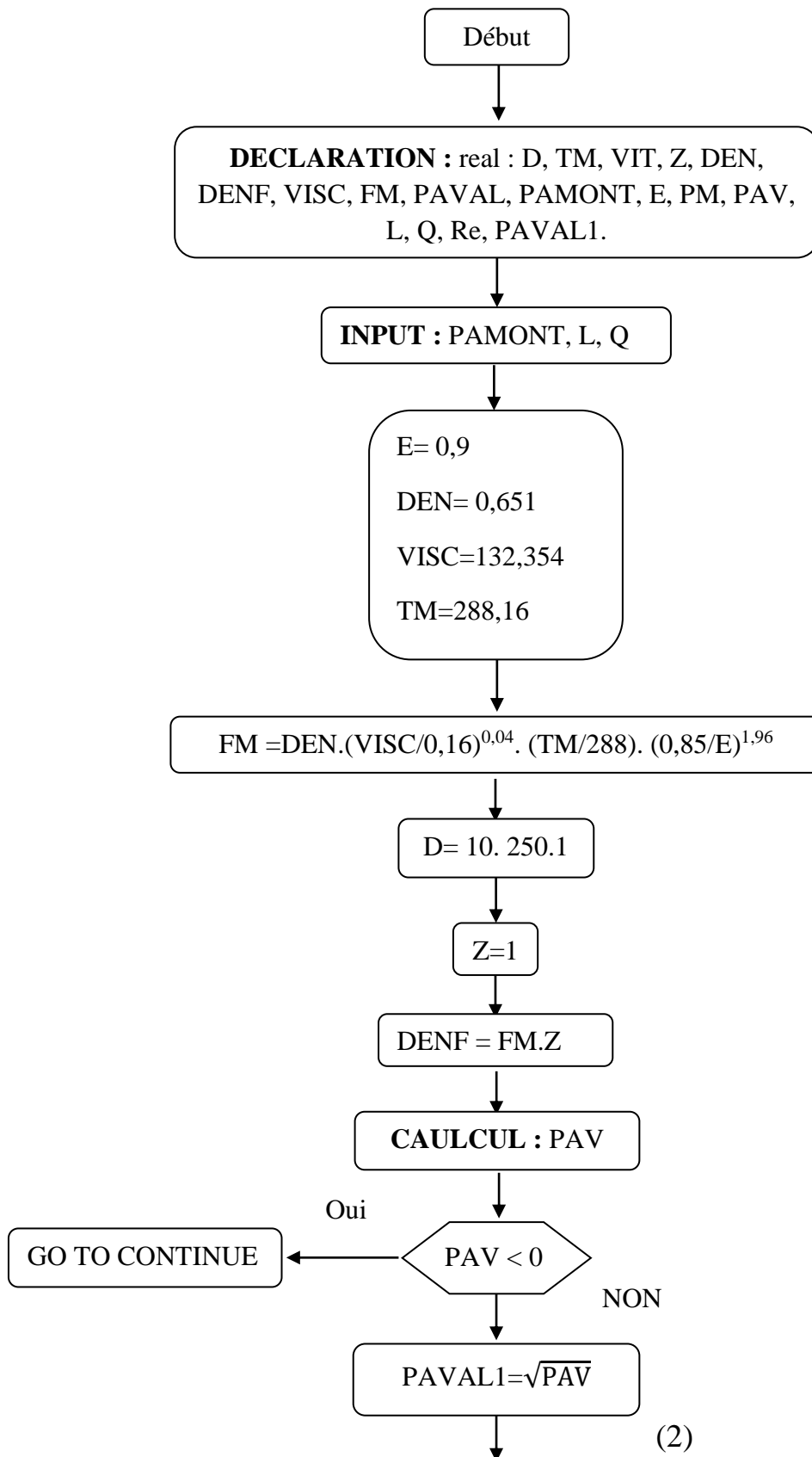
Aussi nous avons :

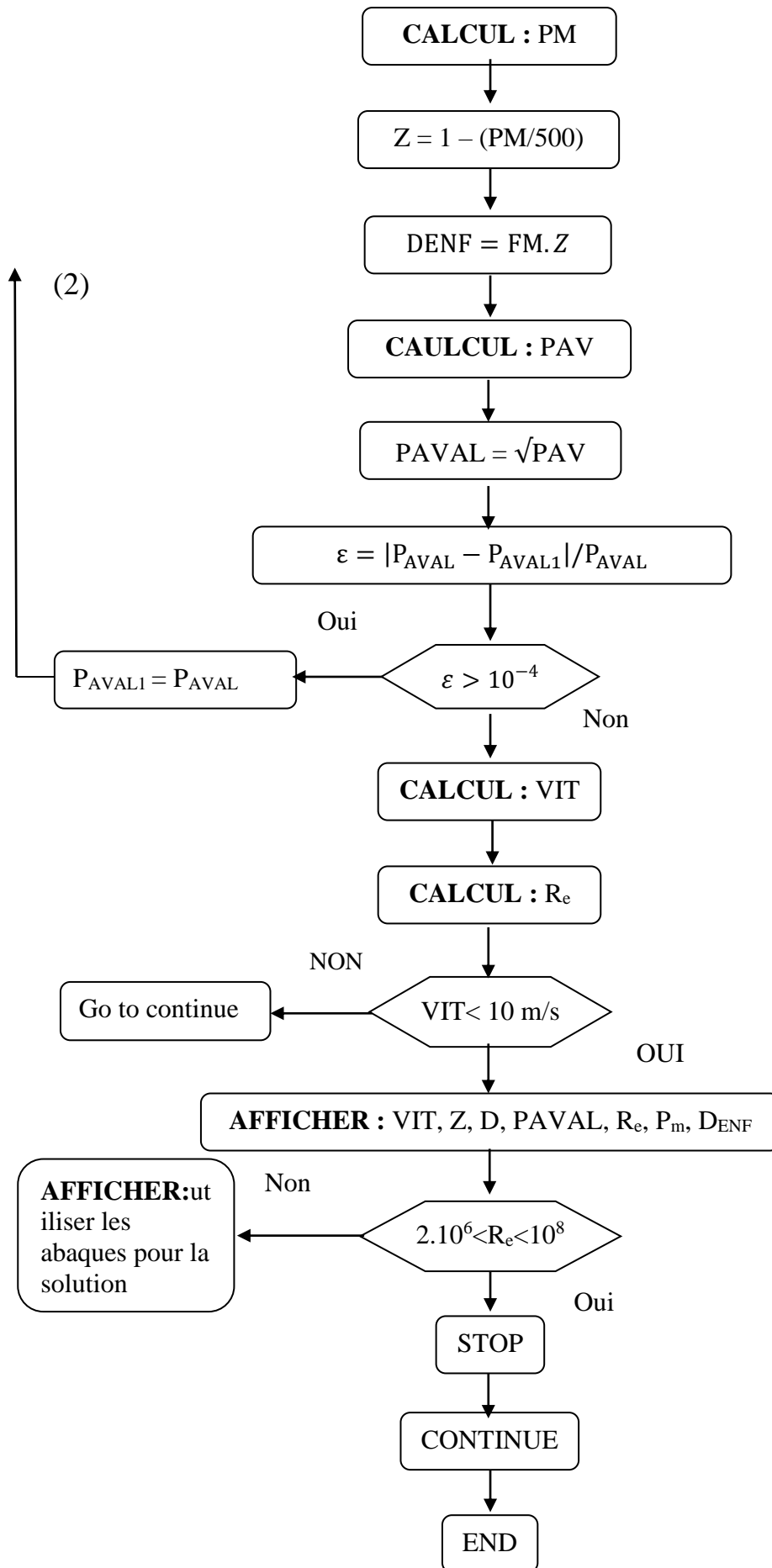
$$\sigma = S \left[\frac{v}{0,16} \right]^{0,04} \cdot Z_m \frac{T_m}{288,16} \left[\frac{0,85}{E} \right]^{1,96} \quad (34)$$

La méthode de calcul consiste à supposer la valeur de Z_m égale à 1 et obtenir par la suite la densité fictive, de même on estime la valeur du diamètre intérieur pour pouvoir calculer la pression P_2 , connaissons P_2 , si la différence entre les deux est négligeable on passe au calcul de la vitesse, sinon on revient au calcul de P_2 mais cette fois-ci en utilisant le dernier Z calculé.

Le diamètre obtenu doit correspondre à une vitesse d'écoulement inférieure à 10 [m/s] pour résoudre ce problème on utilise un programme maison en Fortran qui a une possibilité de calculer la pression avale, le diamètre intérieur du conduit ainsi le nombre de Reynolds.

Organigramme : Diamètre du conduit.





Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.2 :

Tableau IV.2 : calcul le diamètre de la conduite.

D[m].10 ⁻²	Z.10 ⁻¹	PAVAL [bars]	$\sigma \cdot 10^{-1}$	V[m/s]	Re
10	9.2151	57.5684	5.9785	11.9748	1185624.7
11	9.2112	63.5853	5.7512	11.8835	1110738.0
12	9.2096	66.2432	5.6084	11.6041	1018176.0
13	9.2086	67.8049	5.5063	11.3947	939854.9
14	9.2080	68.7720	5.5063	11.1356	872722.4
15	9.2076	69.3955	5.5063	10.9031	814540.9
16	9.2074	69.8109	5.5063	10.7803	763632.2
17	9.2072	70.0953	5.5056	10.5214	718712.6
18	9.2071	70.2948	5.5056	10.2135	678784.1
19	9.2070	70.4377	5.5056	9.9815	643058.7
20	9.2070	70.5108	5.5056	9.6321	610905.8
21	9.2069	70.6189	5.5043	9.2253	581815.0
22	9.2069	70.6769	5.5043	8.8963	555368.8
23	9.2069	70.7211	5.5043	8.6104	531222.4
24	9.2068	70.7552	5.5042	8.2879	509088.1
25	9.2068	70.7817	5.5042	8.0245	488724.6
26	9.2068	70.8027	5.5043	7.8807	469927.5
27	9.2068	70.8193	5.5043	7.5239	452522.8
28	9.2068	70.8326	5.5043	7.1882	436361.2
29	9.2068	70.8434	5.5043	6.9416	421314.3

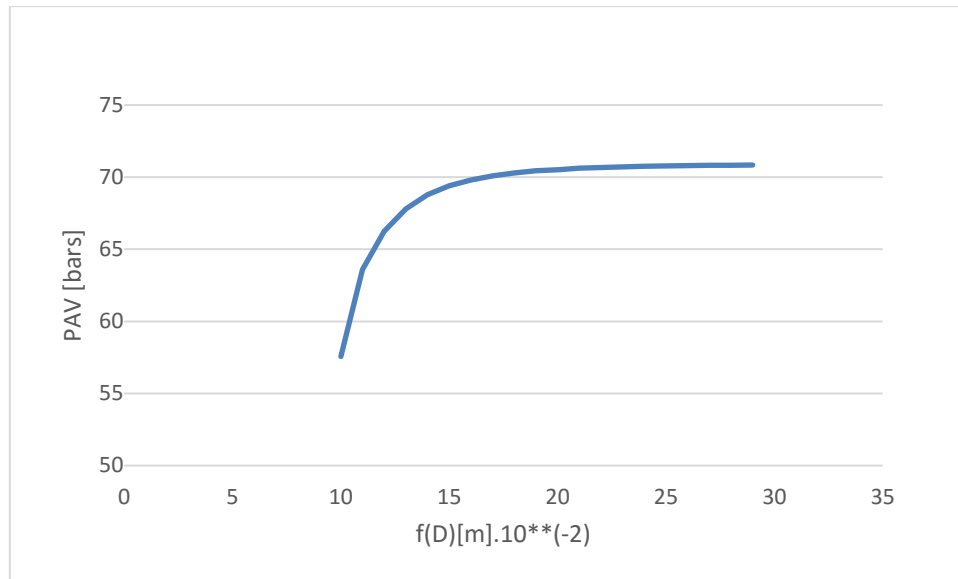


Figure IV.2 : les variations de la pression aval (PAVAL) en fonction de diamètre.

En général, lorsque le diamètre du pipeline augmente, cela entraîne une diminution de la vitesse du fluide à l'intérieur du pipeline. Une diminution de la vitesse peut réduire les pertes de charge et donc augmenter la pression aval, c'est-à-dire la pression à la sortie du pipeline. La pression aval, qui représente la pression immédiate après une perte de charge (par exemple, un coude ou une restriction du diamètre), peut également être influencée par l'augmentation du diamètre du pipeline. Cependant, il est important de noter que l'augmentation du diamètre de pipeline peut également entraîner une augmentation du volume de fluide à l'intérieur du système, ce qui peut nécessiter une augmentation de la pression d'alimentation pour maintenir le débit souhaité.

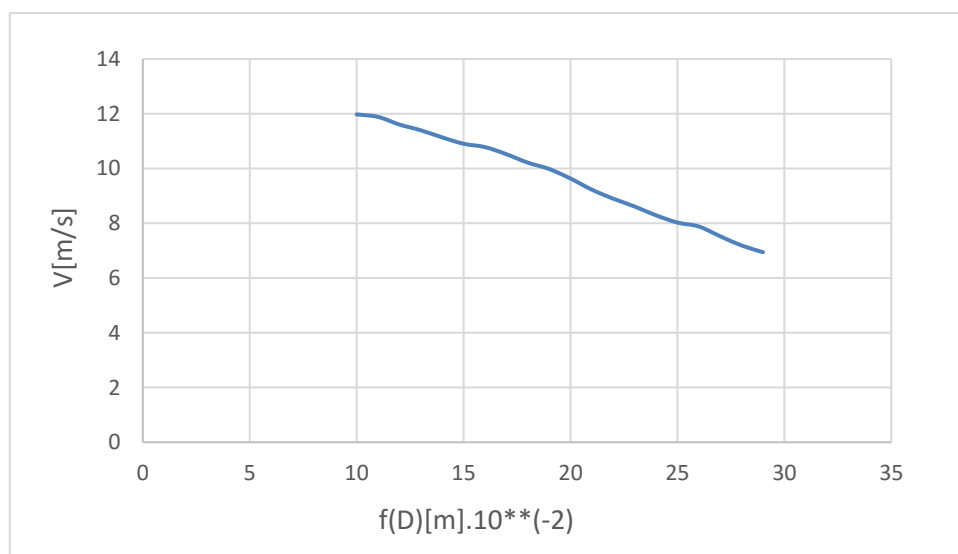


Figure IV.3 : les variations de la vitesse d'écoulement en fonction de diamètre.

Le Graphe de la vitesse en fonction de diamètre de la conduite : montre une diminution de la vitesse lorsque le diamètre de la conduite augmente. Cela peut être expliqué par le fait que l'augmentation du diamètre de la conduite permet à un plus grand volume de fluide de vitesse à laquelle le fluide de déplace.

Donc l'augmentation du diamètre de la conduite entraine une diminution de la vitesse.

D'après les résultats obtenus par le tableau IV.2, on peut tirer la valeur de diamètre qui vérifié les conditions suivantes :

- La vitesse inferieure 10 [m/s].
- Pression aval convenable.
- Le diamètre choisi d'après les résultats obtenus : $D = 20$ [cm].
- Le diamètre normaliser standard d'après [11] : $D = 20.32$ [cm] = 8 Ø"

Dans la réalisation de ce projet la SONELGAZ a utilisé un conduit de diamètre nominal de Ø8" calculé pour la seule raison, en cas des futures expansions des constructions, distributions publiques,etc. La SONELGAZ a décidé de surdimensionné le pipeline pour la satisfaction les besoins énergétiques en gaz naturel pour les clients de la ville de Tassadan Haddada (W. Mila).

Donc il y a des avantages d'utiliser une conduite de Ø8" c'est de minimiser les pertes de charges en augmentant le diamètre de la conduite.

Pour une conduite Ø 8" : $P_{AMONT} = 70.9$ [bars] $\Rightarrow P_{AVAL} = 70.51$ [bars].

IV.3.3 La contrainte maximale agit sur la paroi de la conduite :

Pour déterminer la valeur de la contrainte maximale il faut voire à quelle zone la conduite appartienne :

Dans notre étude la conduite alimentant la ville de Tassadane Haddada appartienne à la zone 2. Donc le calcul de la contrainte est égal à la plus petite des deux expressions :

$$\begin{cases} 0,73 \cdot E \\ 0,55 \cdot R \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0,73 \times 28,9 = 21[\text{hectobars}] \\ 0,55 \times 41,3 = 22,71[\text{hectobars}] \end{cases} \Rightarrow T = 2109,7[\text{bars}]$$

IV.3.4 L'épaisseur de la conduite :

L'épaisseur du conduit est généralement normalisée, il est fixé en fonction de facteurs suivants :

- La rigidité des conduites et la résistance aux pressions extérieures dues au mouvement du terrain.
- La résistance à la pression intérieure du gaz.

A ce point de vue, l'épaisseur minimale d'une conduite est donnée par une formule de la résistance des matériaux dont la plus simple est celle de **BARLOW** :

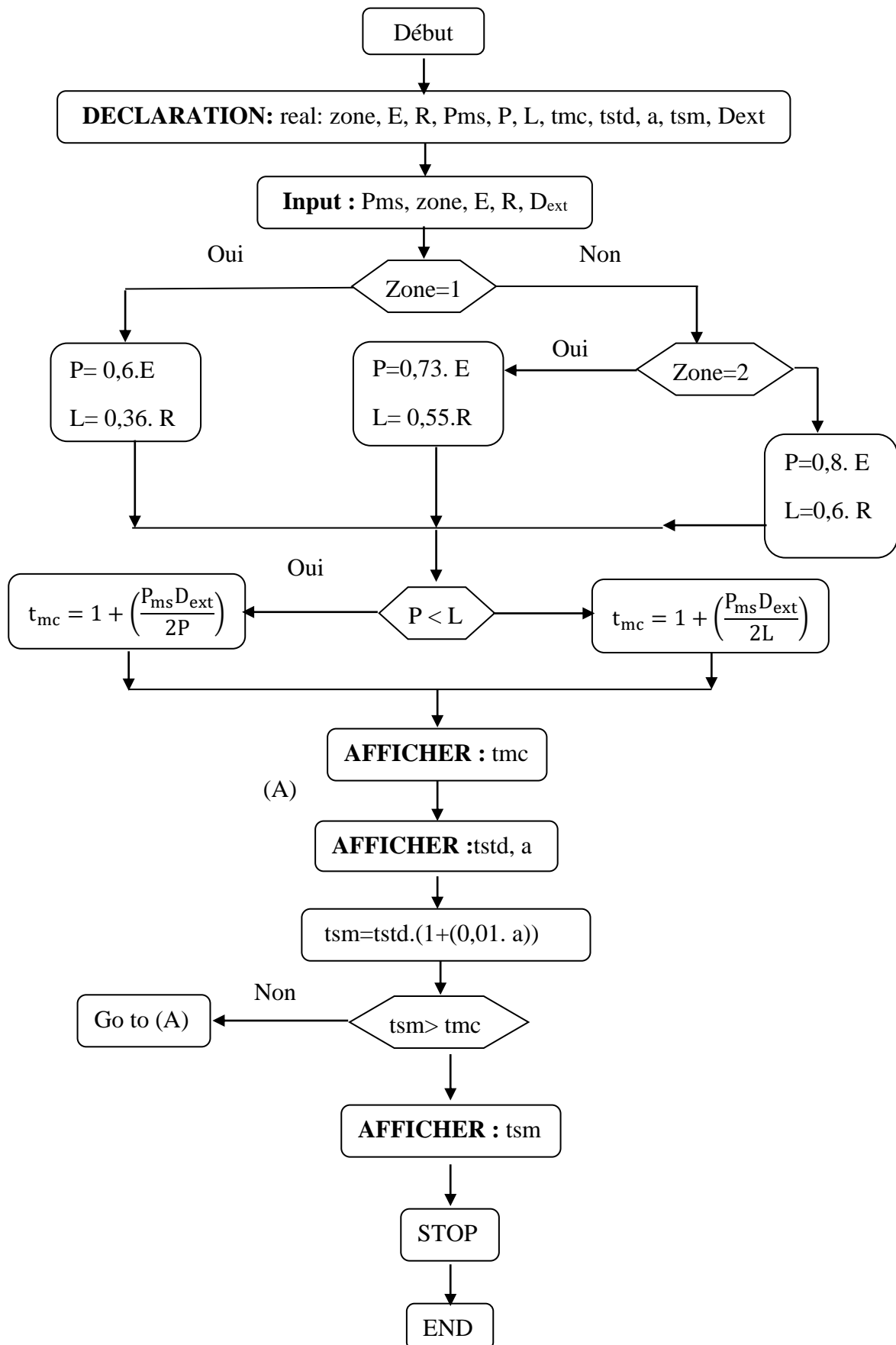
$$e = \frac{P_{MS} D_{ext}}{2T} + C \quad (35)$$

Pour résoudre le problème on a établi un programme en Fortran qui calcul l'épaisseur minimale et on a utilisé l'épaisseur standard suivante $e_{std} > e_{min}$ qui doit être tolérée de (+b %) et (-a %) d'où l'épaisseur minimale sera : $e_{std}(min) = e_{std}(1 - a\%)$

Et l'épaisseur maximale : $e_{std}(max) = e_{std}(1 + b\%)$

La tolérance qui nous intéresse est la tolérance négative (-a %) car on doit vérifier dans le calcul l'inégalité suivant : $e_{std}(1 - a\%) > e_{min}$, sinon on prend l'épaisseur standard suivante et on refait la même procédure.

Organigramme : Epaisseur de la conduite



Les résultats de ce programme sont présentés dans le tableau IV.3

Tableau IV.3 : calcul de l'épaisseur minimale de la conduite.

Zone	D _{ext} [mm]	E [bars]	R[bars]	P _{Ms} [bars]	t _{sm} [mm]
2	209.4	2890	4130	70.9	6.39

IV.3.4.1 1 Calcul l'épaisseur pour le diamètre Ø 8" : [11]

1. $e_{min} = t_{mc} = \frac{70,9 \times (209,4)}{2 \times (2109,7)} = 3,5186 \text{ [mm]}$

2. On ajoute 1 [mm] à l'épaisseur minimale comme un surépaisseur de sécurité

$$t_{mc} = t_{mc} + 1 = 4.5186 \text{ [mm]}$$

D'après la table [11] : dimensions, poids et pression d'épreuve on tire :

- D_{ext} = 209.4 [mm]
 - t_{std} = 3.18 [mm]
3. Les tolérances admissibles sont :

$$t_{sm} = t_{std}(1 + 43.09\%) = 3,18 \times (1 + 0.4309) = 4.5502 \text{ [mm]} > t_{mc} = 4.5186 \text{ [mm]}$$

Vérifier donc l'épaisseur adéquate c'est : 3,18 [mm]

L'épaisseur considérée actuellement est : $t_{sm} = 6.39 \text{ [mm]}$

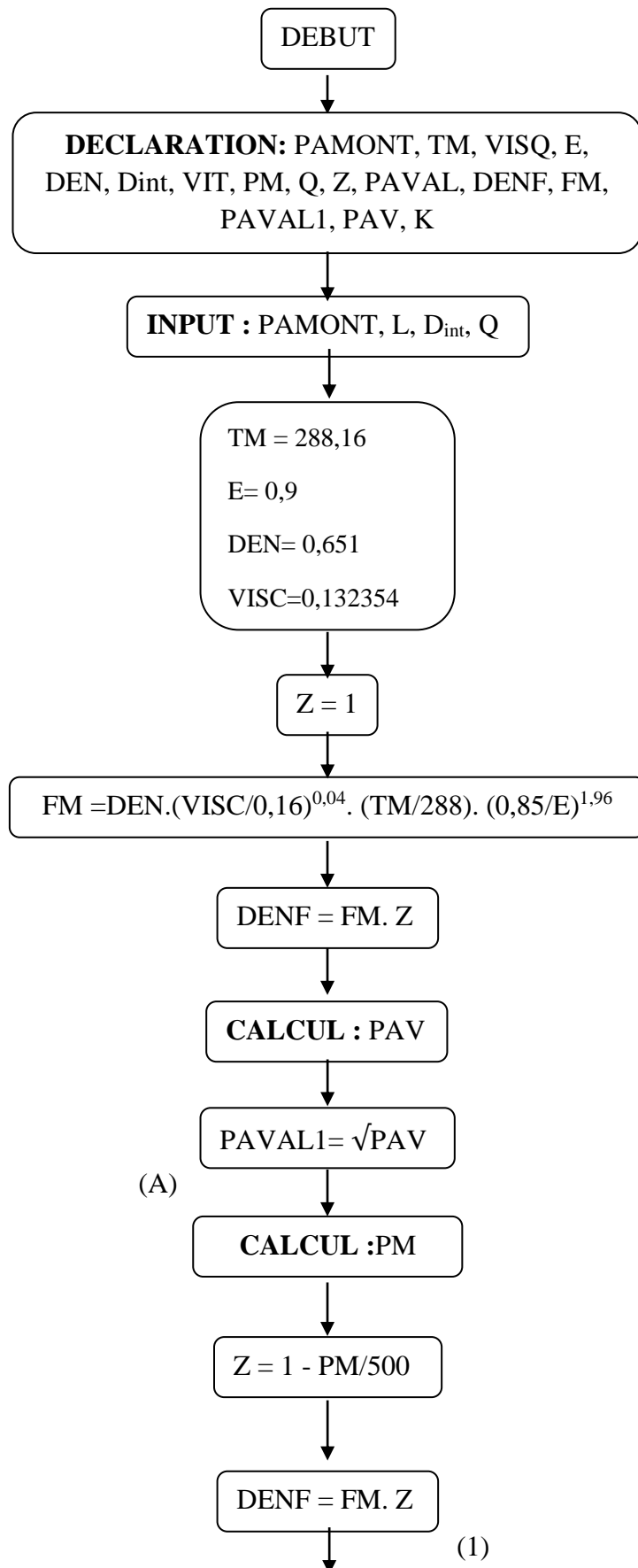
IV. 3.5 La capacité maximale du pipeline :

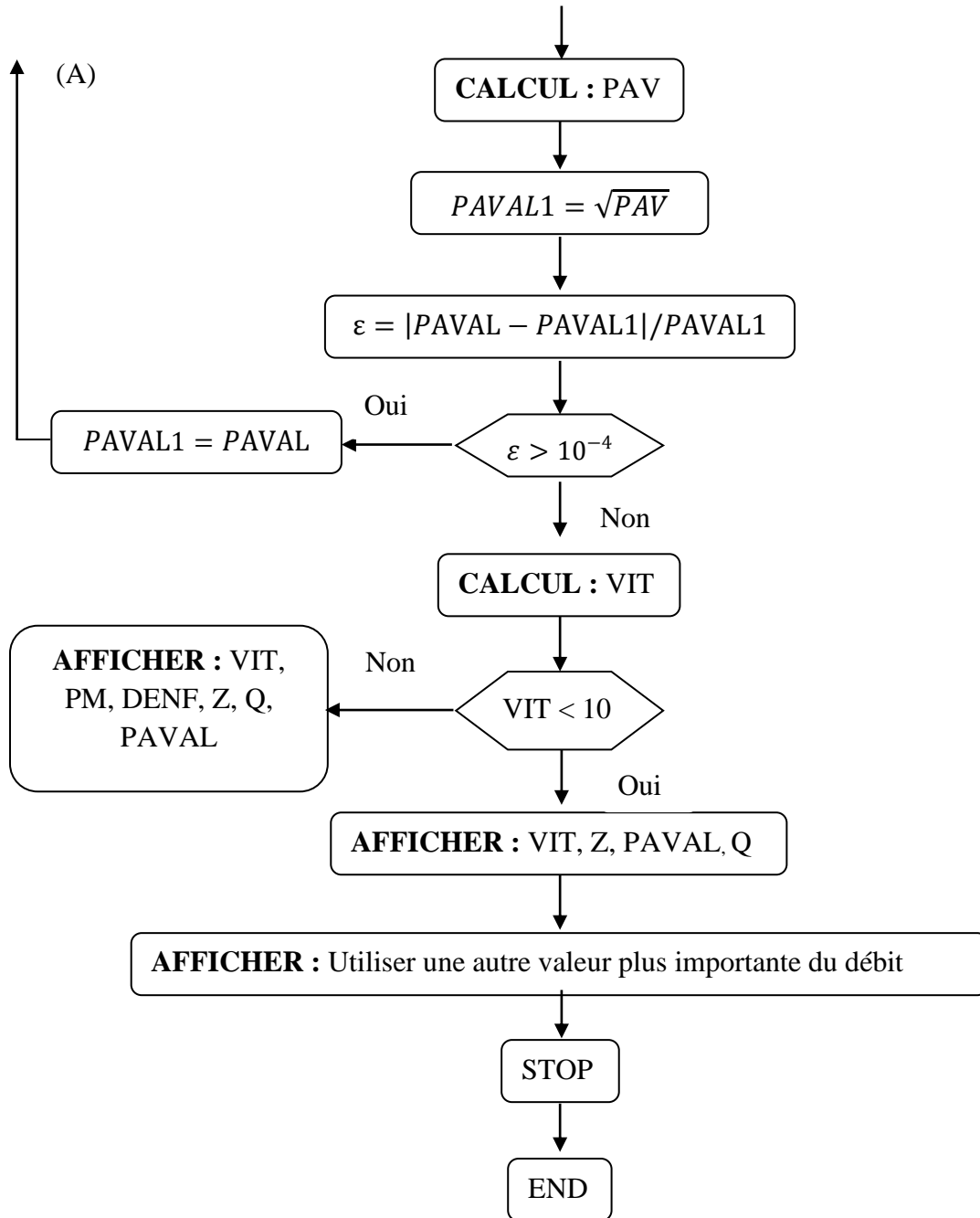
La capacité maximale du pipeline :

Notre but est de connaître le débit maximal qu'on peut atteindre à condition que la vitesse soit inférieure à 10 [m/s].

Pour résoudre ce problème on introduit un programme en Fortran qui permette de varier le débit maximal $Q > 4150 \text{ [Nm}^3/\text{h]}$ et contrôler en même temps la condition de vitesse $V = 10 \text{ [Nm}^3/\text{h]}$.

Organigramme : La capacité maximale du pipeline





IV.3.5.1 Capacité maximale pour un diamètre de Ø 8" :

- La pression de départ $P_{AMONT} = 70,9$ [bars].
- Le débit volumique maximale demandé $Q_{max} = 4150$ [Nm^3/h].
- Le diamètre intérieur : $D_{int} = 20.32$ [cm].

Les résultats obtenus ce programme pour un diamètre de Ø 8" sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Calcule la capacité maximale de la conduite de Ø 8".

P_{AMONT} [bars]	L [Km]	Q_{max} [Nm ³ /h]	$D_{int} 10^{-2}$ [m] (8")	V [m/s]	Z [10 ⁻¹]	σ	PAV
70.9	7 400	4150	20.32	8.5504	8.5891	5.86	68.516
70.9	7 400	4200	20.32	8.5782	8.5893	5.87	68.022
70.9	7 400	4250	20.32	8.7973	8.5901	5.87	68.521
70.9	7 400	4300	20.32	8.8925	8.5911	5.87	68.015
70.9	7 400	4350	20.32	9.1191	8.5917	5.88	68.004
70.9	7 400	4400	20.32	9.2321	8.5923	5.88	68.460
70.9	7 400	4450	20.32	9.3478	8.5944	5.88	68.008
70.9	7 400	4500	20.32	9.4832	8.5957	5.90	68.281
70.9	7 400	4550	20.32	9.5356	8.5965	5.90	68.870

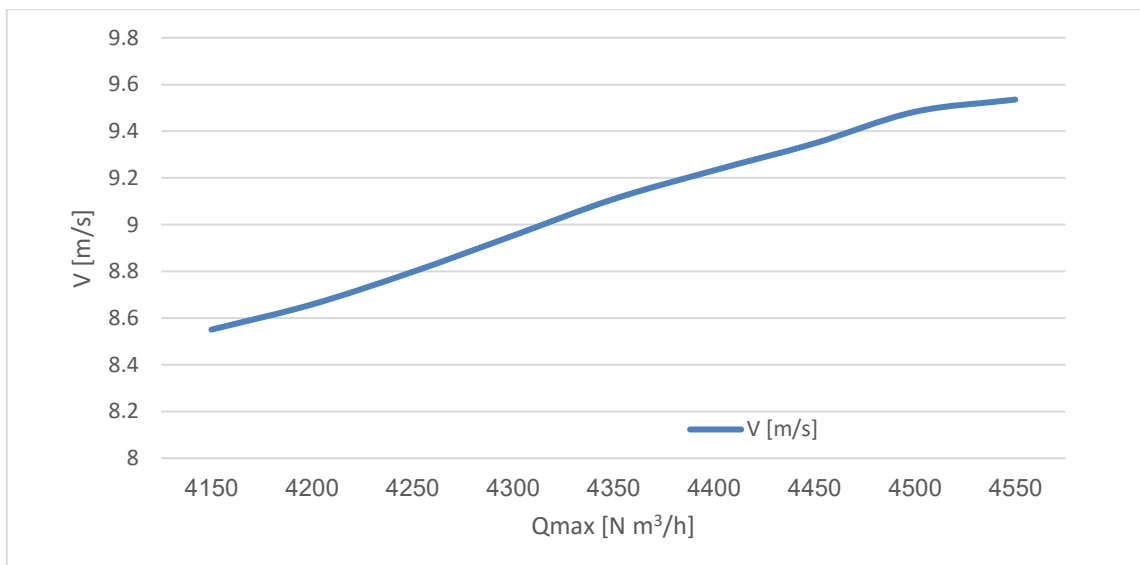


Figure IV.4 : la variation de la vitesse d'écoulement V en fonction de débit Q.

Si nous augmentons le débit tout en maintenant le diamètre du conduit constant, cela entrainera une augmentation de la vitesse du fluide à l'intérieur de la conduite. Cela peut être expliqué par le principe de conservation de la masse, selon lequel le débit reste constant dans un système fermé. Lorsque le débit augment, cela signifie qu'une plus grande quantité de fluide dans le conduit en une période donnée. Puisque le diamètre de la conduite reste le

même, la seule façon pour cette quantité supplémentaire de fluide de passer à travers est augmenter la vitesse à laquelle il se déplace.

IV.4 Les différentes traversées de notre réseau de transport gaz (HP) :

L'artère de transport de gaz alimentant la ville de Tassadane Haddada présente sur son parcours, un certain nombre de points spéciaux tels que :

- **Points spéciaux N°01 (Pk : 2+009.24) :** Traversé de route Macheta Bouchakouf avec un canal des égouts.
- **Points spéciaux N°02 (Pk : 2+627.00) :** Traversé d'oued El-Kabir.
- **Points spéciaux N°03 (Pk : 7+155.07) :** Croisement avec un conduite d'eau et d'une piste forestière.

IV.4.1 Points spéciaux N°01 (Pk : 2+009.24) :



Figure IV.5 : Traversé de route Mechta Bouchakouf avec un canal des égouts (Pk : 2+009.24).

Dans ce point spécial, la conduite est exposée à la contrainte due à la charge des véhicules et les différentes machines agricoles qui traversent cette route, cela nécessite une protection selon le règlement. Voir la figure IV.5.

Règlement de traversée de route :

- La gaine de conduite traversée la route horizontalement et sous la conduite d'égout à une profondeur 0.5 ml.
- Une prise potentielle sera installée si la longueur de la gaine excède 50[ml].
- Pour un enfilage aisé de la conduite, il convient de choisir le diamètre de la gaine supérieur de 15 à 20[cm] de celui de tube.
- La conduite sera enfilée dans une gaine en acier à une profondeur de 2[ml] minimum.

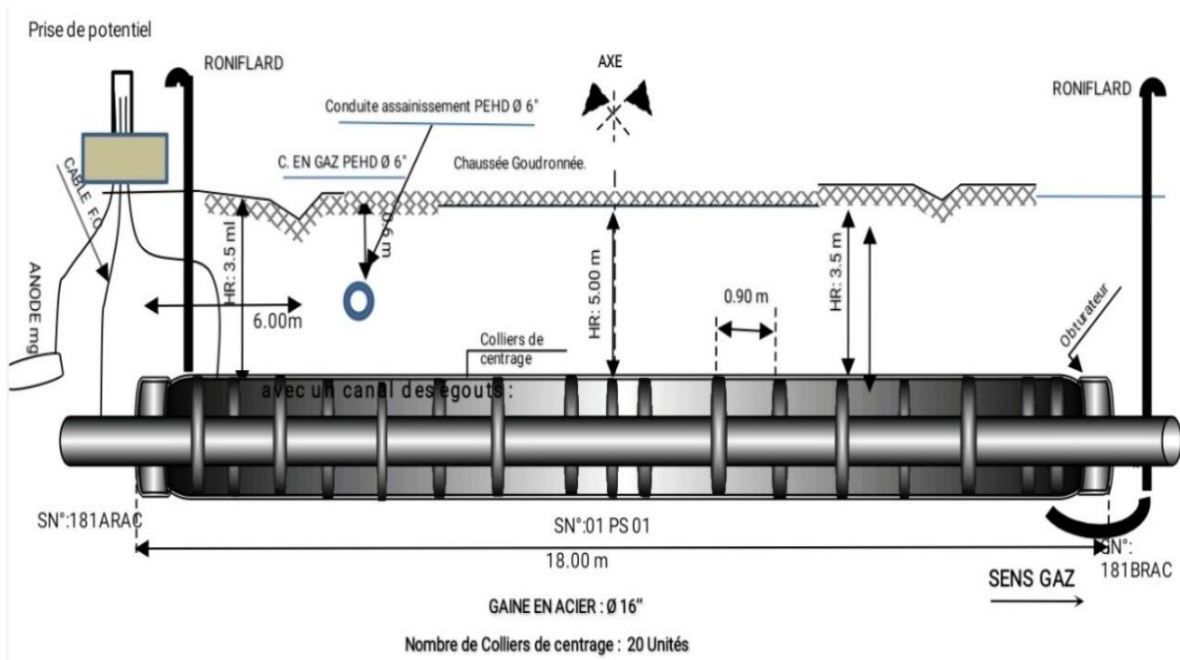


Figure IV.6 : Croquis de traversée de route et croisement de canal d'égout (Pk : 2+009.24).

IV.4.2 Points spéciaux N°02 (Pk : 2+267.00) :



Figure IV.7: Traversée d'oued el-Kabir (Pk : 2+267.00).

Dans notre étude on a la traversé d'Oued el-Kabir d'une largeur de 60 ml, la réalisation de la protection s'effectue comme suit :

- Le tube protégé par néoprène 8 mm, double treille à souder et fer 12 [mm].
- Béton armé dosé 350 Kg/m^3 de l'épaisseur égal à 10 cm.
- Gabionnage de trois étages, positionné après la conduite (sens d'écoulement d'eau).
- La profondeur du conduit environne de 1,80 jusqu'à 2,00 ml.

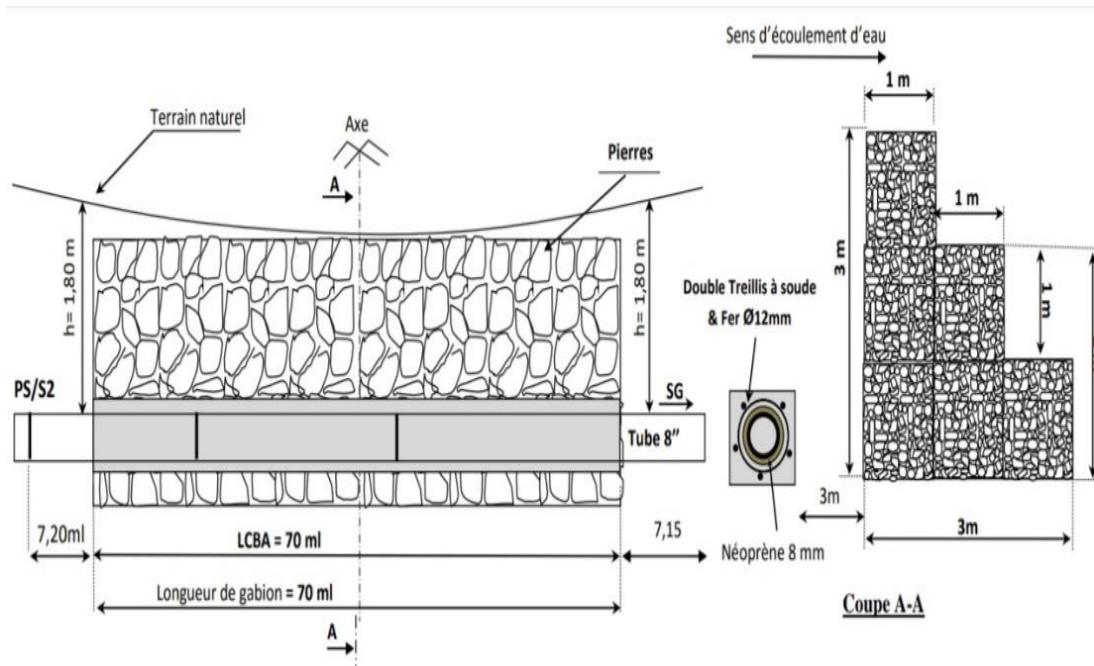


Figure IV.8 : Croquis de listage et gabionnage de traversée d'oued el-Kabir (PK : 2+267.00).

IV.4.3 Points spéciaux N°03 (Pk : 7+155.07) :



Figure IV.9 : Croisement gazoduc avec conduite d'eau et d'une piste forestière (Pk : 7+155.07).

Pour protéger notre conduite dans ce croisement, on a utilisé les dalles on béton armé (fer 12 mm), ces derniers illustrés dans la figure ci-dessous :

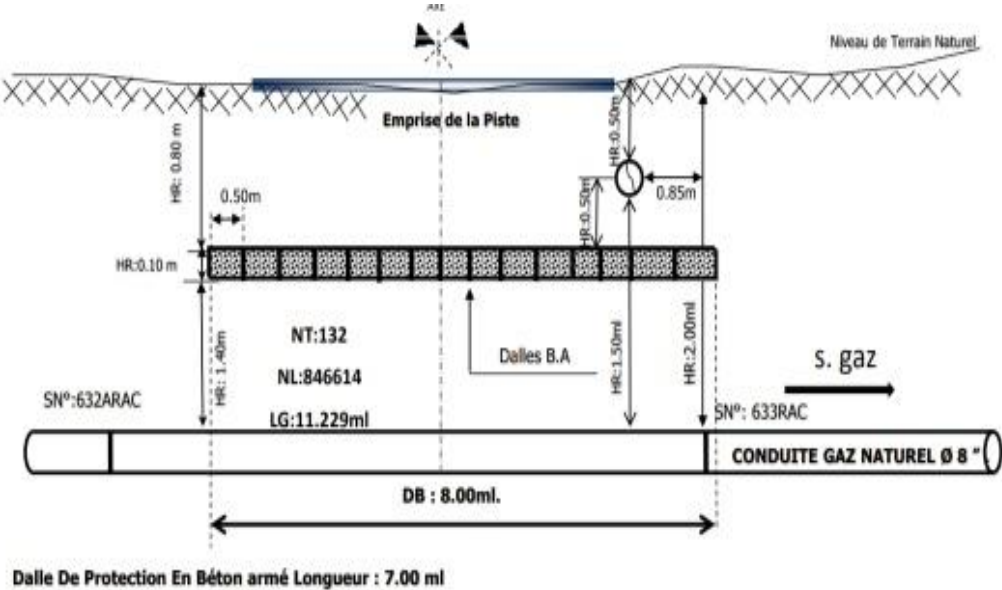


Figure IV.10 : Croquis de croisement de gazoduc avec conduite d'eau et piste forestière.

CHAPITRE V

DETENTE DE GAZ NATUREL ET DIMENSIONNEMENT DE POSTE DE DETENTE

V.1 Principe de détente :

V.1.1 Principe pour abaisser la pression :

Sur les réseaux pour abaisser la pression, on place un dispositif qui fait obstacle à l'écoulement normal du gaz. Ce dispositif a pour but de créer une chute de pression en limitant le passage des molécules de gaz.

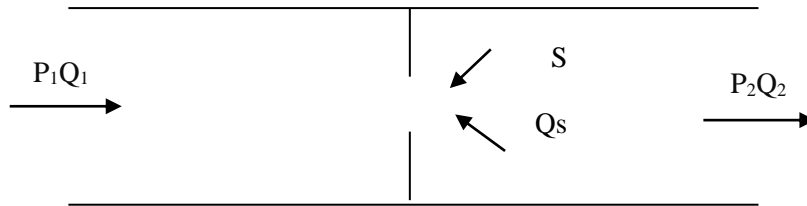


Figure V.1 : chute de pression en fonction d'une surface S et de débit Q_s .

Toute perturbation sur le parcours du gaz créer une chute de pression $\Delta P = P_1 - P_2$, si les P_1 et P_2 sont stable, ΔP est constant, donc le débit Q_s est égal au débit Q_2 , nous obtenons un régime permanent, le débit est identique en tout point pour une section donnée Q_s variera en fonction de ΔP .

V.1.2 Etude des variations de P_2 avec S constante :

1. P_1 constante, Q_2 variable

Si $Q_2 \nearrow \longrightarrow Q_2 > Q_s$ donc $P_2 \searrow$
 Si $Q_2 \searrow \longrightarrow Q_2 < Q_s$ donc $P_2 \nearrow$

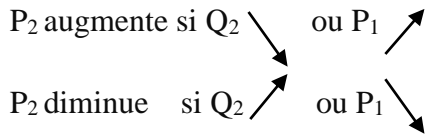
2. P_1 variable, Q_2 constant

Si $P_1 \nearrow \longrightarrow Q_s \nearrow Q_s > Q_2 \longrightarrow$ donc $P_2 \nearrow$
 Si $P_1 \searrow \longrightarrow Q_s \searrow Q_s < Q_2 \longrightarrow$ donc $P_2 \searrow$

Pour une section donnée de l'orifice (S) une variation de débit ou de pression amont modifier la valeur de la pression avale P_2 .

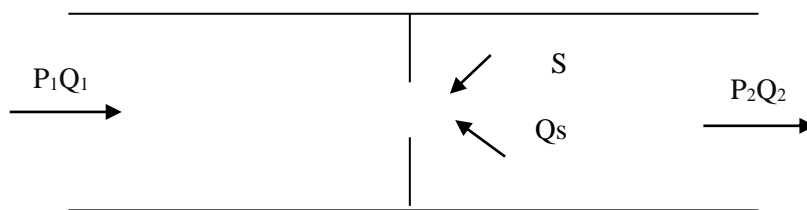
V.1.3 Principe pour maintenir la pression aval constant :

Dans les postes de détente, on cherche à maintenir la pression aval constante quelle que soient les variations de débit ou de pression amont :



Pour que P_2 reste constante, il faudrait que Q_s augmentent comme Q_2 , P_2 constante si $Q_s = Q_2$. Ce qui implique de faire varier le débit de l'orifice, donc de modifier la section de passage du gaz pour chaque variation de débit ou de pression amont.

V.2 Etude l'écoulement de gaz travers un orifice :



Supposons un écoulement permanent de gaz dans une conduite avec détente de P_1 à P_2

a) Pression critique :

Maintenant P_1 et S constante, si nous augmentant le débite Q_2 la pression P_2 va diminuer. Il arrivera un moment où Q_s va atteindre un maximum que l'on ne pourra pas dépasser. Cette pression est appelée pression critique P_c .

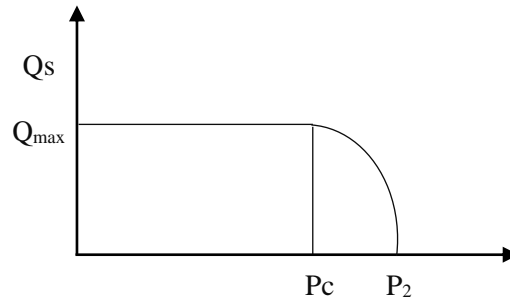


Figure V.2 : variation du débit en fonction de la pression aval.

Dans un écoulement adiabatique est permanente la grandeur $\left(h + \frac{V_2}{2}\right)$ sur un tube de courant est invariante : $\left(h + \frac{V_2}{2}\right) = \text{cte}$ donc :

$$h_c + \frac{V_c}{2} = H_1 \quad (32)$$

$$c_p \cdot T_c + \frac{V_c^2}{2} = c_p \cdot T_1 \quad (33)$$

En divisant (Eq.33) sur $C_p \cdot T_c$:

$$\frac{T_1}{T_c} = \frac{V_c^2}{2c_p T_c} + 1 \quad (34)$$

Nous avons : $c_p = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}$

$$\text{(Eq. 34)} \Rightarrow \frac{T_1}{T_c} = \frac{V_c^2}{2 \frac{\gamma R}{\gamma - 1} T_c} + 1 \quad \text{avec :} \quad a = \sqrt{\gamma R T}$$

$$\frac{T_1}{T_c} = 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_a^2 \quad \text{puisque : } M_a = \frac{V}{a}$$

$$\frac{T_1}{T_c} = \frac{\gamma - 1}{2} \quad (35)$$

L'écoulement est adiabatique donc : $PV^\gamma = \text{cte}$, ou : $P^{(1-\gamma)} \cdot T^\gamma = \text{cte}$

$$P_c^{1-\gamma} T_c^\gamma = P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma \Rightarrow \frac{P_1}{P_c} = \left(\frac{T_1}{T_c}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

$$\frac{P_1}{P_c} = \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \Rightarrow p_c = \frac{p_1}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}} \Rightarrow P_c \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} P_1$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.27$$

Pour le cas de gaz de **Hassi R'Mel**

$$P_c = \left(\frac{2}{1.27 + 1}\right)^{\frac{1.27}{0.27}} P_1 = 0.551p_1$$

L'augmentation de débit Q_2 se traduira par une baisse de la pression P_2 sur le réseau aval.

Nous aurons alors $P_2 < P_c$, ceci indique que le gaz continue à se détendre par augmentation de la section après l'orifice, on appelle cet état (phénomène de jet) ou double détente lorsque

$P_2 < P_c$, Q_s indépendant de P_2 la seule façon d'augmenter le débit Q_s et pour une section d'orifice donnée d'augmenter la pression P_1 .

b) Vitesse critique :

Lorsque P_2 est inférieur à P_c à l'orifice, la vitesse d'écoulement du fluide atteint à l'orifice une limite appelée la vitesse critique V_c du son :

$$M = \frac{v}{a} \text{ et } M = 1 \text{ donc } v = a, a = \sqrt{\gamma RT} = \sqrt{\frac{\gamma P_c}{\rho_c}}, [\mathbf{8}]$$

A l'aval de l'orifice nous aurons trois cas à envisager :

$P_2 > P_c$: vitesse d'écoulement subsonique.

$P_2 = P_c$: vitesse d'écoulement sonique.

$P_2 < P_c$: vitesse d'écoulement supersonique.

Nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_2 > P_c \Rightarrow (P_2 > 0.551P_1) \Rightarrow \text{écoulement subsonique} \\ P_2 \leq P_c \Rightarrow (P_2 \leq 0.551P_1) \Rightarrow \text{écoulement sonique ou supersonique} \end{array} \right.$$

V.3 Classification des détendeurs :

Suivant leur mode de fonctionnement on peut classer les détendeurs en deux catégories :

- Les détendeurs à action directe.
- Les détendeurs à action indirecte.

a) Les détendeurs à action directe :

Si l'écart de la pression par rapport à la valeur de consigne conduit à des variations de pression suffisantes pour commander mécaniquement et directement les variations de la section de passage S .

b) Les détendeurs à action indirecte :

C'est les plus fréquents dans le transport du gaz, la puissance nécessaire pour modifier la section de passage S demandera l'action d'un dispositif appelé pilot (permettre de varier la pression de consigne) ce dernier est l'intermédiaire par lequel agit la pression aval sur la soupape. L'avantage de ces détendeurs c'est la réduction du temps de réponse avec la rapidité de renforcé l'action de correction proportionnelle à la ΔP enregistré à l'aval. C'est dans ce but, que les détendeurs à action indirecte ont été conçus, ils sont appelés couramment détendeur-régulateur.

V.4 Phénomène de givrage :

V.4.1 Teneur en eau :

De fait de sa formation en terrain sédimentaire, le gaz naturel est normalement saturé d'eau dans les conditions de gisement. Après traitement une partie de cette eau se condense, et le gaz reste saturé en eau, cette eau peut avoir deux inconvénients principaux pour le transport ou le changement de condition du gaz (pression, température du gaz) :

- Elle peut se condenser et former des bouchons d'eau générateurs de perte de charge.
- Elle peut aussi former avec les hydrocarbures des corps solides durs comme de la glace (des hydrates d'hydrocarbures).

V.4.2 Hydrates :

Les hydrates d'hydrocarbures sont des produits solides, composés d'hydrocarbures et d'eau, qui ne se forment qu'en présence d'eau à l'état liquide, dans le gaz il se forme d'autant plus facilement que :

- La pression est plus élevée.
- La température est plus basse.
- La teneur en hydrocarbure plus lourde et plus grande.
- La turbulence est plus forte.

Dans le poste de détente, la détente de gaz naturel à haute pression à une basse pression crée le problème de givrage, car il est admis que la détente du gaz provoque un refroidissement de 0.5 [°c] par un bar de pression. On suppose que l'ossature des hydrates est formée de molécules d'eau dont les vides sont occupés par des hydrocarbures.

Exemple :

- Hydrates de propane : $C_3H_8, 17H_2O$.

- Hydrates de méthane : $CH_4, 6H_2O$.

H_2S, CO_2 : donnent également des hydrates et comme ils sont plus solubles que les hydrocarbures, ils accélèrent la formation d'hydrates. Les hydrates croissent comme des cristaux, une forte turbulence réduit leur formation, ils auront donc tendance à se former à tous les endroits où l'écoulement est freiné, l'hydrates conduit aux conséquences suivantes :

- La destruction des appareils.
- La corrosion.
- Le bouchage de la conduite.

V.4.3 Les méthodes de prévention de la formation d'hydrates :

Trois méthodes de prévention de la formation d'hydrates sont utilisées :

- **Introduction des inhibiteurs** : On introduit dans le gaz des inhibiteurs dans le but de diminuer la température de formation d'hydrates. Les inhibiteurs les plus utilisés sont : l'ammoniac, le méthanol.
- **Double détente** : Cette opération consiste à empêcher la formation d'hydrates. La 1^{ère} détente assure la détente jusqu'à 20 [bars], par suite la 2^{ème} détente abaisse la pression de

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

20 [bars] à 4 [bars], la distance entre les deux stations de détente doit être calculée afin d'avoir à la sortie de 2^{ème} détente une température supérieure à la température de formation d'hydrates.

On hiver, les hydrates se forment pendant la première détente, par exemple à l'entrée du régulateur le gaz est à 70 [bars], 5 [°C] et sa sortie il sera 20 [bars], -15 [°C], par contre la température de formation d'hydrates à 20 [bars] et 7 [°C] donc la température du gaz après la première détente est bien inférieure à celle de la formation d'hydrates. Par conséquent cette opération ne peut résoudre complètement le problème.

- **Inhibition thermique** : c'est la méthode la plus utilisée actuellement dans le poste de détente pour résoudre le problème de givrage par le chauffage du gaz avant sa détente pour enfin une température supérieure à la température de formation d'hydrates à la sortie du régulateur. Le réchauffeur est placé en dérivation, juste après filtration le gaz de chauffage est prélevé du gaz de haute pression préchauffé au niveau de réchauffeur et réduit, dans l'armoire de commande, à la pression du brûleur. Il existe deux types de réchauffeurs :

- 1) Réchauffeur direct.
- 2) Réchauffeur indirect.

Les réchauffeurs sont directs lorsque l'enceinte contenu le fluide à chauffer est en contacte directe avec le tube à feu à l'intérieur duquel se trouve la flamme du brûleur. Leurs caractéristiques sont les suivantes :

-Faible inertie thermique, mais risque d'accident en cas de rupture de la cloison de séparation.

Les réchauffeurs sont indirects quand un bain (eau, sel, vapeur) est interposé entre le tube à feu et le tube contenant le fluide à réchauffer. Leur caractéristique est la suivante :

- Présence des meilleures garanties de sécurité, par contre leur inertie thermique est plus grande et l'élévation de température est limitée par le fluide constituant le bain.



Figure V.3 : Plan de situation du poste détente DP TASSADANE HADDADA (W. Mila).

V.5 Rôle de poste de détente :

Les pressions élevées qui règnent dans les artères de transport de gaz à grande distance ne peuvent être maintenues dans les réseaux de distribution acheminant le gaz vers les points de consommation. Bien que le règlement des ouvrages de transport de gaz autorise, moyennant certaines précautions, la pénétration de conduite à pression très élevée dans les zones habitées,

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

on baisse généralement la pression dans ces zones pour des raisons de sécurité, pour cela on installe un poste de détente qui comporte en série :

- Une nourrice amont, sur laquelle sont branchées deux lignes de détente automatique et un by-pass, chaque ligne comprend :
 - * un clapet de sécurité.
 - * un détendeur de régulation.
- Un by-pass comprend deux vannes de barrage et une vanne de laminage.
- Une vanne d'entrée de poste (vanne de barrage).
- Un joint isolant.
- Des filtres.
- Un réchauffeur.

Les deux lignes et by-pass sont connectées à une nourrice aval à la suite une ligne de comptage qui comprend :

- Un compteur isolé par deux vannes de barrage.
- Une soupape de sécurité isolée par la vanne de barrage.



Figure V.4 : poste de détente DP Tassadane Haddada capacité 5000Nm³/h (W. Mila).

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

Pour le dimensionnement nous avons :

V.6 La nourrice amont :

Généralement le dimensionnement de la nourrice amont est de $\varnothing 4''$, dans notre projet la ligne est de $\varnothing 8''$ mais au cours de la réalisation de projet de TASSADANE HADDADA ils proposent d'utiliser le diamètre de $\varnothing 4''$ pour la nourrice amont.

V.7 La nourrice aval :

On obtienne après la détente une pression égale à 4 [bars] constante donc le diamètre de la conduite à l'aval du détendeur doit être recalculer en utilisant l'équation de la vitesse sachant que la vitesse maximale est 18 [m/s].

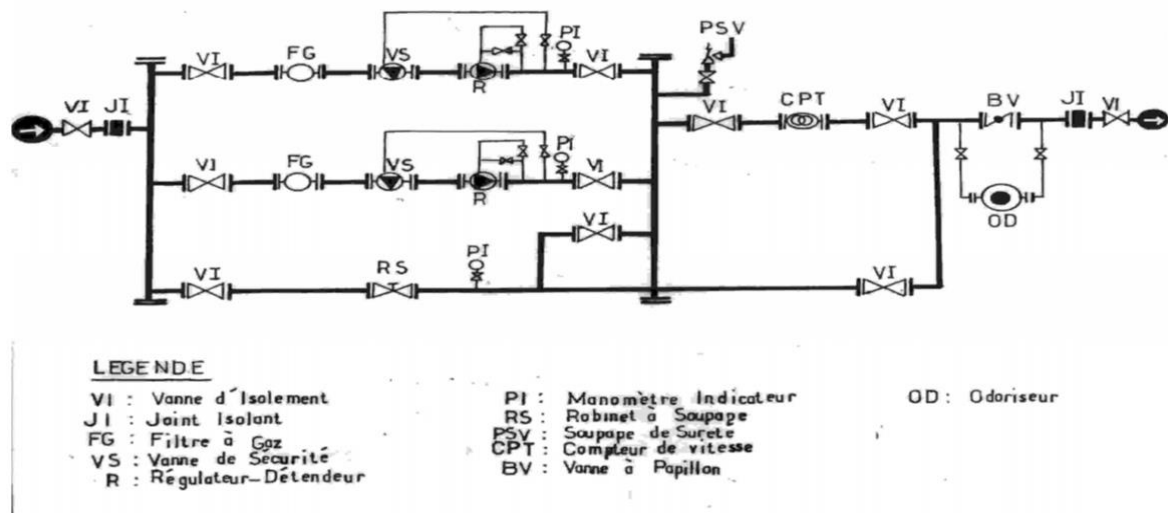


Figure V.5 : Schéma des composants du poste de détente capacité : 5000 [Nm²/h].

V.8 Les filtres :

Les filtres sont destinés à recueillir les poussières diverses apportée par le gaz et éviter soit des bouchages, soit une usure par abrasion de métal du poste et des installations qui le suivent, pour éviter tout ennui de marche de matériel de détente exposé au courant gazeux (Exemple : vanne de laminage, clapet et buse de détendeur). Cette nécessité d'évacuer en permanence les poussières, véhiculées par le gaz, conduit à utiliser des filtres dépoussiéreur, qui sont de différents types :

- Les filtres séparateurs : pour séparer la gazoline, les condensas, l'eau libre.

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

- Les filtres à gaz (dépoussiéreur) dans le but d'empêcher le passage des poussières véhiculées par le gaz.

Les filtres ont feutre sont les filtres choisis par SONELGAZ vu les avantages qu'il possédé par exemple :

- Maintenance facile.
- Prix abordables.
- Convenance de gaz naturel.

V.8.1 Principe de fonctionnement :

Ce filtre est constitué d'une SAS en feutre aux traverses du quel passe le gaz en abandonnant la poussière qu'il contient, le sens du courant se fait généralement de l'extérieur vers l'intérieur.

Ce filtre a le gros avantage de rester efficace quelle que soit la vitesse de passage du gaz, avec ces filtres a feutres la filtration est limitée à 5 [μ].

En présence d'eau dans le gaz, le feutre peut être remplacé par tissus synthétique à fibres.

Ces filtres son réalisés pour les pressions suivantes : 25-40 et 70 [bars].

- La perte de charge admissible : 1.5 [bars].
- La température maximale de fonctionnement : 70[°C].

Pour savoir le modelé de ce filtre et par suite ces dimensions on utilise l'abaque GAZ-FILCO avec les données suivantes :

- $Q_{max} = 4150$ [Nm^3/h].
- Pression de service 70 [bars].

V.8.2 Choix d'un filtre :

On détermine la surface filtrante de façon à avoir une vitesse de 0.20 [m/s].

$$\Omega = \frac{Q_{max}}{720 \cdot P} = \frac{4150}{720 \times 70} = 0.08234 [m^2] = 82340 [mm^2]$$

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

Le diamètre d'entrée et de sortie des filtres (d) sera déterminé pour une vitesse d'environ $V = 10[m/s]$.

$$d = 5.95 \sqrt{\frac{Q_{max}}{P}} = 5.95 \sqrt{\frac{4150}{70}} = 45.8133[mm]$$

Le filtre GLA 10 choisi dans ce poste de détente est présenté dans la figure suivante :

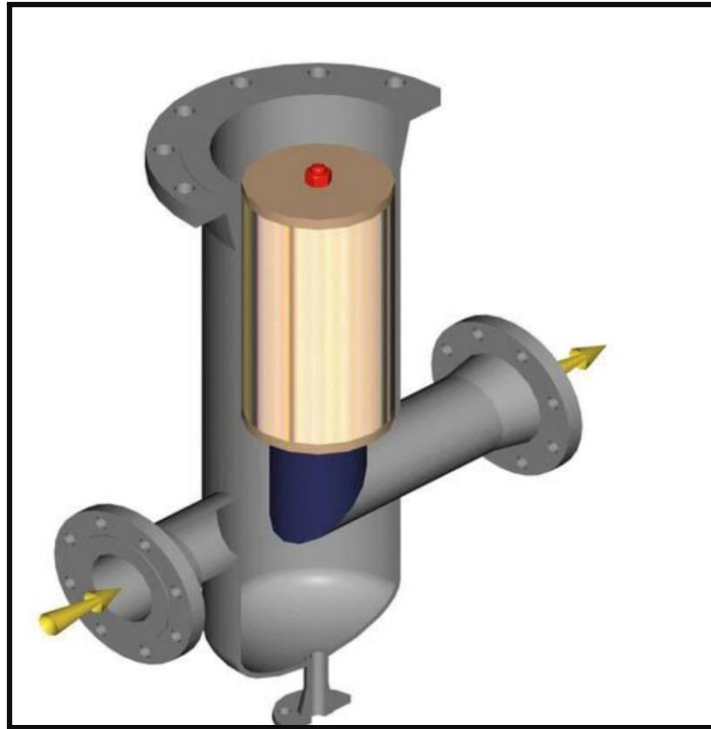


Figure V.6 : Filtre de gaz naturel d'un poste de détente DP TASSADANE HADDADA

(W. Mila).

V.9 Le détendeur régulateur de pression :

Un détendeur est un appareil qui est chargé d'abaisser une pression et maintenir la pression aval légèrement constant. Le détendeur régulateur de pression utilisé dans notre poste est de marque PIETRO-FIORENTINI série REFLUX 819. Ces régulateurs détendeurs sont des appareils à action pilotée pour moyen et haut pression. Ils permettent d'obtenir une pression aval constant quelle que soit la variation de la pression amont et du débit à assurer.

Les caractéristiques principales de cette série de régulateur sont les suivantes :

- Bonne précision de régulation.

- Temps de réponse rapide.
- Simplicité de manipulation.
- Possibilité de démontage sans débrider l'appareil.

V.9.1 Domaine d'utilisation :

- Gaz non corrosif.
- Pression amont maximal 102 [bars].
- Pression aval maximale 42 [bars].
- Pression aval minimale 0.7 [bars].
- Perte de charge minimale 0.2 à 0.5 [bars] selon le calibre, la pression amont et débit.
- Température ambiante – 10 [°C] + 50 [°C].

V.9.2 Description du fonctionnement de REFLUX 819 :

Le REFLUX 819 est un régulateur piloté, qui par manque de pression pilote sur la membrane de récepteur est en position de fermeture. Le clapet mobile (5) est en contact avec le joint par l'action du ressort (54), la pression amont même variable n'a aucune influence sur la pression de réglage. Le clapet est commandé par la membrane (50) sur laquelle agissent les forces suivantes :

- Dans le sens de la fermeture : le ressort (54), la pression aval dans la chambre (D) et le poids de l'ensemble mobil.
- Dans l'autre sens : la pression pilot agissant sur la membrane dans la chambre (E).

La pression nécessaire à l'ensemble de pilotage est prélevée sur la pression amont par l'intermédiaire d'un piquage sur le corps. Le gaz prélevé est filtré à travers la cartouche et détendu par l'intermédiaire d'un pré-détendeur composé des clapets d'un ressort et la pression aval. La pression ainsi pré-détendue est amenée jusqu'au clapet pointeau qui a traversé l'orifice régule l'admission de pression pilote dans la chambre (E) du récepteur. La régulation de la pression pilot obtenue par la force exercée par le ressort du pilot et par l'action de la pression aval sur la membrane du pilot.

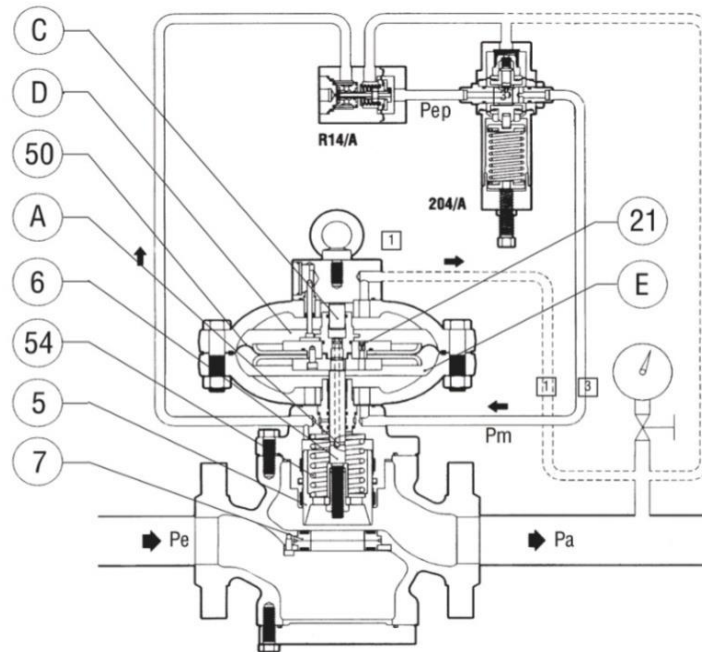


Figure V.7 : Régulateur détenteur PIETRO-FIORENTINI REFLUX 819.

V.9.3 Choix de détenteur régulateur Poste détente DP Tassadan Haddada :

- Les caractéristiques techniques :

Avec les données suivantes : un débit de 4150 [Nm³/h], la pression amont P₁ = 61 [bars] absolus et la pression aval P₂ = 5 [bars] absolus.

On peut déduire la nature de la vitesse d'écoulement en calculons la grandeur :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{5}{61} = 0.0819 < 0.551 \text{ Donc la vitesse de l'écoulement est supersonique.}$$

Le débit est défini par la formule suivante :

$$P_2 \leq \frac{P_1}{2} , \quad Q = 0.5525 C_g p_1 \Rightarrow C_g = \frac{Q}{0.525 P_1} \Rightarrow C_g = \frac{4150}{0.525 \times 61} = 129.586$$

Tableau V.1 : Désignation du détenteur régulateur (PIETRO-FIORENTINI REFLUX 819) utilisé.

Calibre	1"	2"	3"	4"	6"	8"
Coefficient de débit C _g	575	2220	4937	8000	16607	25933

Chapitre V : Détente de gaz naturel et dimensionnement de poste de détente.

Du tableau ci-dessus ont choisi la valeur du coefficient de débit supérieure à 129.586 qui est 575 d'où :

Donc le régulateur utiliser dans notre poste est : PIETRO-FIORENTINI série REFLEX 819 de calibre 1" de diamètre nominale 25.4 [mm].

V.10 Le clapet de sécurité :

Le clapet de sécurité est un dispositif de sécurité qui sert à interrompre rapidement le passage du gaz, lorsque pour quelque anomalie que ce soit, la pression aval rejoint la valeur de tarage prédéterminée. Ainsi le clapet protège les dispositifs placés en aval d'une surpression éventuelle les caractéristiques de la vanne de sécurité type **SBC** installée dans le poste sont les suivant :

- Précision de plus ou moins 0.5 des valeurs de tarage.
- Etanchéité absolue a débit nul.
- Commande locale à poussoir.
- Réarmement manuel avec le manœuvre car le clapet ne s'ouvre pas automatiquement.
- Encombrement réduit.
- Simplicité de maintenance.

V.10.1 Description de fonctionnement du clapet de sécurité :

Le dispositif de sécurité **SBC** est constitué d'un obturateur A, d'un complexe de levier L, d'une tête de commande B et d'un système de réarmement commandé manuellement au moyen de levier C la pression de sécurité à contrôlée agit sur la tête de commande B à membrane, cette membrane solidaire d'un axe de commande D reçoit une force contraire par l'intermédiaire de ressort E, F, tarés a des valeurs prés fixées. Le décrochage peut être commandé aussi manuellement au moyen du poussoir M, pour réarmer le dispositif on agit sur le levier C.

V.10.2 Choix du clapet de sécurité :

Le clapet de sécurité installer dans ce poste est le **SBC 103** avec un diamètre de 25 [mm] c'est le même calibre que le régulateur détenteur.

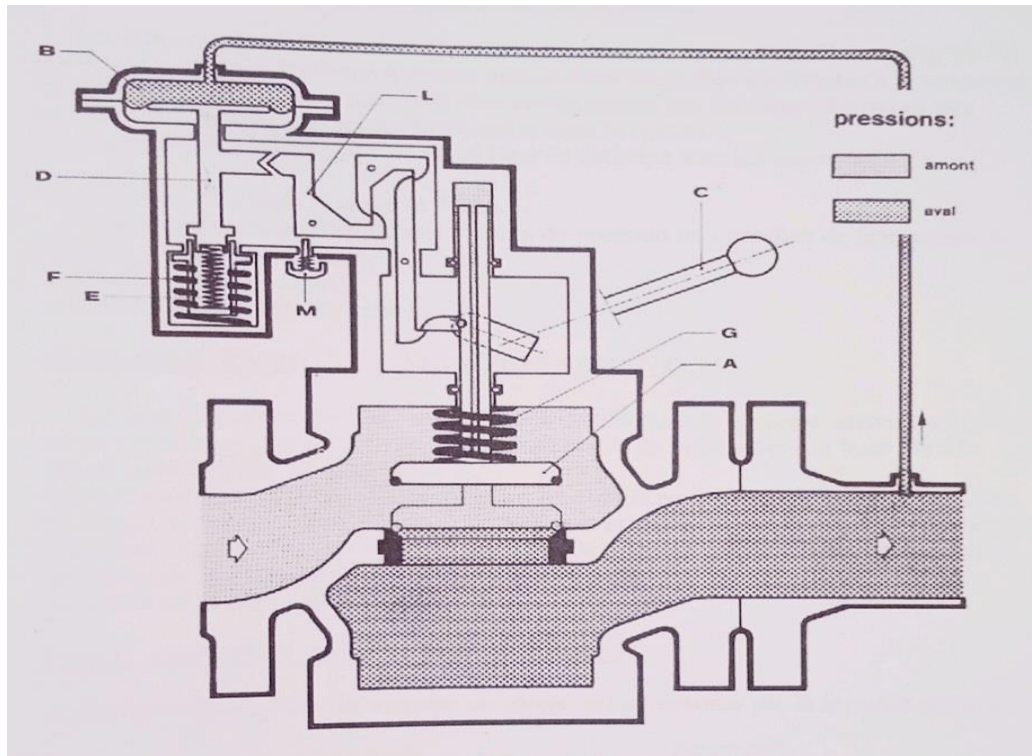


Figure V.8 : Le clapet de sécurité SBC 103.

V.11 La soupape de sureté pilotée :

La soupape de sureté utilisée dans notre poste est de type **PVS**, c'est une vanne de décharge à action pilotée dans laquelle les fonctions d'ouverture et de fermeture du clapet principal sont commandées par un dispositif piloté très sensible à toutes les variations de pression dans le réseau.

Les caractéristiques principales de ce type de soupape sont les suivantes :

- Extrême précision et rapidité d'action.
- Fermeture parfaite jusqu'à des valeurs de pression très proche de la pression de tarage.
- Encombrement réduit.
- Débit de décharge important.

V.11.1 Description du fonctionnement :

La pression contrôlée c'est-à-dire celle d'entrée dans la soupape, arrive par le tube de raccordement (1) et le filtre (2) à la chambre (A) du pilot et par la buse (3) à la chambre principale de soupape (B). Sur la membrane (4) du pilot agissent, d'un côté la pression à contrôler et de l'autre la charge du ressort de tarage (5), sur le clapet principal de la soupape (6) agissent, d'un côté la pression à contrôler et le ressort de position (7), de l'autre coté la

même pression, mais appliquée sur une section inférieure correspondant au diamètre principal de passage de la soupape.

V.11.2 Choix de la soupape de sûreté :

Le débit que traverse la soupape de sûreté est déterminé par la formule suivante :

$$Q = (0.9 K) \cdot (387.2 C) P_1 A \sqrt{\frac{M}{Z_1 T_1}}$$

P_1 = pression de tarage + surpression de 10 % P_{aval} .

$$P_T = 1.25 P_{\text{aval}}$$

$$P_1 = P_T + 0.10 P_{\text{aval}} \Rightarrow P_1 = P_{\text{aval}}(1.25 + 0.10) = 5(1.35) = 6.75[\text{bars}]$$

Aux conditions $T_1 = 288.16$ [K], $P_1 = 6.75$ [bars]

$$\text{On a la température réduite : } T_r = \frac{T_1}{T_{\text{cm}}} = \frac{288.16}{201.482} = 1.4302$$

T_{cm} : température critique de mélange, $T_{\text{cm}} = 201.482$ [K].

$$\text{On a la pression réduite : } P_r = \frac{P_1}{P_{\text{cm}}} = \frac{6.75}{44.67} = 0.1511, \text{ donc on a : } Z_1 = 0.99.$$

K : exposant de l'équation de l'expansion isentropique aux conditions P_1 , T_1 , $K = 1.27$ pour le gaz naturel.

$$SE = \sqrt{K \left(\frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}} \Rightarrow C = \sqrt{0.56 \left(\frac{2}{0.56+1} \right)^{\frac{1.27+1}{1.27-1}}} = 2.126$$

D'où la surface de calcul égale :

$$A = \frac{Q}{(0.9 K) \cdot (387.2 C) \cdot P_1 \sqrt{\frac{M}{Z_1 T_1}}} = \frac{3311.7}{(0.9 \times 0.56) \cdot (387.2 \times 2.126) \times 6.75 \times \sqrt{\frac{18.884}{0.99 \times 288.16}}} = 4.603[\text{cm}^2]$$

CONCLUSION GENERALE

Nous signalons que ce sujet nous a permis une occasion pour aborder les champs d'applications de certains concepts et formules que nous avons acquis dans cette étude pratique. Spécialement dans le domaine de la mécanique des fluides où on a confronté les différents états et comportements du gaz tels que la pression, la vitesse du gaz, la chute de pression...etc.

De plus, nous constatons que cette étude a atteint ces objectifs que nous avons visés on cite parmi ceux-ci :

- Evaluation du débit de gaz nécessaire pour l'alimentation de la ville de Tassadane Haddada (W. Mila), soit la capacité maximale est $4550 \text{ [Nm}^3\text{/h]}$.
- L'étude a prouvé aussi la nécessité d'installer un réchauffeur pour combattre le problème de givrage.
- L'installation des filtres pour la purification du gaz est exigée dans le but de protéger les appareils : compteur, détendeur...etc.

Il est recommandé pour des raisons économiques d'utiliser à titre d'exemple le détendeur régulateur, le clapet de sécurité et le filtre ayant le diamètre d'entrée et de sortie déterminé par l'étude de dimensionnement plutôt que d'utiliser un diamètre surdimensionné et pour la même raison de précision et de rapidité, on a utilisé un programme en Fortran au lieu de se référer à des tableaux ou des abaques.

Finalement, vu l'agressivité du terrain, nous avons procédé à une protection cathodique par anodes réactives, cela nous permet de protéger notre conduite contre la corrosion.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aubert, Conception des postes de détente (1998).
- [2] ÇENGEL YUNUS.A, Introduction to thermodynamics and heat transfer, New York, MC GRAW-HILL (1997).
- [3] COMOLET R, Mécanique expérimental des fluides, dynamique des fluides réels Tome 2. 3ème édition, PARIS : MASSON (1982).
- [4] J. Paulbailon, J. Mariedorlot. « Des matériaux », 3ème édition (2001).
- [5] Manuel pour transport et la distribution du gaz. Paris : association technique de l'industrie du gaz en France, RENAULDON A (1968).
- [6] Protection cathodique des canalisations et ouvrage enterrés : cours d'enseignement de la lutte contre la corrosion (1999).
- [7] PERRY ROBERT H, perry's chemical engineer Hand Book, 6ème édition New York, MC GRAW-HILL (1984).
- [8] RENAULDON A, Manuel pour le transport de la distribution du gaz 8ème édition Paris : association technique de l'industrie du gaz en France (1968).
- [9] Spécification et prescription technique (canalisation de transport gaz), direction de transport gaz région Est Constantine (2001).
- [10] SLIMANI ABDELKADER, traitement du gaz naturel, Mémoire de fin d'études, Institut algérienne du pétrole (2018).
- [11] TROUVAY & CAUVIN, matériel pétrole paris (1985).
- [12] Technique de l'ingénieur, génie énergétique ; Combustible Gazeux, B1750, Gaz Naturel, B1542 transfert thermique par convection.

ANNEXE


```
PROGRAM Calcul_Diametre_Pipeline
```

```
c  IMPLICIT NONE
```

```
parameter (il=250)
```

```
c  open(1,file='résultats.dat')
```

```
real :: D
```

```
REAL :: TM, VIT, Z, L, DEN, DENF, VISC, FM, PAMONT, E
```

```
REAL :: PM,PAV1, PAV2, Q, Re, PAVAL1 ,PI, TB, PAVAL2
```

```
REAL :: eps,Re_min,Re_max
```

```
! Lecteur des entrées
```

```
INTEGER il
```

```
c  print*,'Entrez la pression amont (PAMONT), la longueur (L):'
```

```
c  print*,'le débit (Q) : '
```

```
PAMONT=70.9
```

```
L=7400.
```

```
Q= 1.27
```

```
pi=4.0*atan(1.0)
```

```
c  ! les valeurs par défaut des des contactes
```

```
E = 0.9
```

```
DEN = 0.651
```

```
VISC = 132.354
```

```
Tm = 288.16
```

```
TB = 288
```

```
c  Do 10 i=10,il,5
```

```
c10 D(i)=10
```

```
cccccccccccccccccc
```

```
eps=1.e-4
```

```

Re_min=2.1E6
Re_max=1.08e8
c ! calcul des premiers valeurs
Z = 1.
FM = DEN*(VISC/0.16)**(0.004)*Z*(Tm/288.16)*(0.85/E)**(1.96)
print*, 'FM=', FM
DENF = FM*Z
print*, 'DENF =', DENF
cccccccccccccc
C   PAVAL = 0.0
! boucle calcul
D=0
DO 10 i=10,250,1
D=i
print*, 'D =', D
c ! calcul de la pression aval (PAV)
PAV1=SQRT(PAMONT**2-22100*DENF*L*((Q**1.96)/(D**4.96)))
print*, 'PAV1 =', PAV1
c ! Condition de sortie si PAV <0
IF (PAV1.LT.0) THEN
print*, 'PAV1<0. Arret du programme. '
c EXIT
else
c ! Comparaison avec la valeur précédent de PAV
PAVAL1 = SQRT(PAV1)
c ! Calcul de Pm
PM = (PAMONT+PAVAL1)/2

```

```

c  ! Mise à jour de Z
    Z = 1-Pm/500.
print*,'Z =', Z
c  ! Calcul de la densité fictive (DENF)
    DENF = FM*Z
c  ! Calcul de la pression aval PAV
    PAV2 = SQRT(PAMONT**2-22100*DENF*L*((Q**1.96)/(D**4.96)))
c  ! Calcul la pression AVAL2
    PAVAL2 = SQRT(PAV2)
print*,'PAV1=', PAV1, 'PAV2=',PAV2
print*,'PAVAL1=', PAVAL1, 'PAVAL2=',PAVAL2
    EPS = ABS(PAVAL2-PAVAL1)/PAVAL2
    IF (EPS.LT.1.e-4) THEN
c  EXIT CONTINUE_PAV
c  ! Mise à joure de DENF
    DENF = FM*Z
c  ! Calcul de la vitesse (VIT)
    VIT = (4*Q*3600)/(Pi*D*VISC)
c  !Calcul de reynolds
    Re = (3537*Q*3600)/(VISC*D/100)
    print*,'Vitesse (VIT) : ', VIT
    print*,'Re : ', Re
    END IF
    END IF
c  !Condition de sortie si Re est dans la plage souhatée
    IF (Re.GE.Re_min.AND.Re.LE.Re_max) THEN
c  EXIT CONTINUE_VIT

```

```
c  ! Affichage des valeurs intermédiares
    print*, 'Vitesse (VIT) : ', VIT
    print*, 'Facteur (Z) : ', Z
c  ENDDO CONTINUE_VIT
    END IF
10 CONTINUE
END
```

Programme Calculs Epaisseur Conduite

implicit none

real :: Pms, Dext, a, b, E, R, P, L, tmc, tstd, tsm

integer :: zone

! Saisie des données nécessaires

write(*,*) "Entrez la pression maximale de service (Pms) : "

read(*,*) Pms

write(*,*) "Entrez le diamètre externe de la conduite (Dext) : "

read(*,*) Dext

write(*,*) "Entrez le pourcentage de tolérance négative (a) : "

read(*,*) a

write(*,*) "Entrez le pourcentage de tolérance positive (b) : "

read(*,*) b

! Initialisation des variables

zone = 1 ! Calcul de l'épaisseur minimale

if (zone == 1) then

E = Pms / (2 * 0.73) ! Calcul de l'épaisseur minimale avec $P = 0.73 * E$

tmc = 1 + (Pms / (2 * 0.73)) ! Calcul de l'épaisseur standard tolérée m

if (tmc > E) then

zone = 2 ! On passe à la zone 2

endif

endif

if (zone == 2) then

R = Dext / 2 ! Calcul du rayon

L = 0.55 * R ! Calcul de L avec $R = 0.55 * R$

P = 0.6 * E ! Calcul de P avec $E = 0.6 * E$

L = 0.36 * R ! Calcul de L avec $R = 0.36 * R$

```

P = 0.8 * E ! Calcul de P avec E = 0.8 * E
L = 0.6 * R ! Calcul de L avec R = 0.6 * R
tmc = 1 + (Pms / (2 * P)) ! Calcul de l'épaisseur standard tolérée minimale
if (tmc > E) then
    zone = 1 ! On revient à la zone 1
endif
endif

tstd = (1 + b/100) * E ! Calcul de l'épaisseur standard tolérée maximale
tsm = tstd * (1 + (0.01 * a)) ! Calcul de l'épaisseur standard tolérée maximale
if (tsm > tmc) then
    goto 10 ! On revient au point A
endif

write(*,*) "?paisseur standard tolérée minimale : ", tmc
write(*,*) "?paisseur standard tolérée maximale : ", tstd
write(*,*) "?paisseur standard tolérée maximale avec a : ", tsm
10 continue

stop

End

```

Program Calculs capacité conduite

implicit none

! Déclaration des variables

real :: PAMONT, TM, VISQ, E, DEN, Dint, VIT, PM, Q, Z, PAVAL

real :: DENF, FM, PAVAL1, PAV, eps, L, D

real, parameter :: MAX_VELOCITY = 10.0, MIN_DIFF = 1E-4

! Entrée des valeurs

write(*,*) "Entrez la pression de départ PAMONT : "

read(*,*) PAMONT

write(*,*) "Entrez le diamètre inférieur Dint : "

read(*,*) Dint

write(*,*) "Entrez le débit volumique maximal Q : "

read(*,*) Q

! Initialisation des variables

PAMONT = 70.9

TM = 288.16

E = 0.6

DEN = 0.651

VISQ = 0.132354

Z = 1

D = 20

L = 7400

! Calcul des variables intermédiaires

FM = DEN * (VISQ / 0.16)**0.04 * (TM / 288) * (0.85 / E)**1.96

DENF = FM * Z

! Boucle de calcul

do while (.true.)

! Calcul de PAV

$PAV = \sqrt{PAMONT^{**2} - 22100 * DENF * L * ((Q^{**}(1.96) / D^{**4.96}))}$

$PAVAL1 = \text{sqrt}(PAV)$

! Calcul de PM

$PM = (PAMONT + PAVAL1) / 2$

$Z = 1 - PM / 500$

$DENF = FM * Z$

! Calcul de l'écart relatif

$\text{eps} = \text{ABS}(PAMONT - PAVAL1) / PAVAL1$

if (eps <= MIN_DIFF) then

! Calcul de VIT

$VIT = \text{sqrt}(2.0 * (PAMONT - PM) / DENF)$

! Vérification de la vitesse maximale

if (VIT >= MAX_VELOCITY) then

write(*,*) "Utiliser une autre valeur plus importante du débit."

exit

else

! Affichage des résultats

write(*,*) "Vitesse : ", VIT

write(*,*) "Pression moyenne : ", PM

write(*,*) "Densité du fluide : ", DENF

write(*,*) "Facteur de compressibilité : ", Z

write(*,*) "Débit volumique : ", Q

write(*,*) "Pression aval : ", PAVAL

end if

exit

else

PAVAL1 = PAVAL

End if

End do

End