

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université m'hamed bougara-boumerdes
Faculté des hydrocarbures et de la chimie
Département transport et équipements des hydrocarbures



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Domaine : Sciences et technologies.

Filière : Hydrocarbures.

Spécialité : Génie mécanique : Transport et Distribution des Hydrocarbures.

Thème

**Modélisation de la dispersion atmosphérique du gaz
naturel provoquée par une fuite dans un gazoduc**

Présenté par :

- ✓ MOKHEFI Abderrahim
- ✓ ERROUANE Abderrahmane

Encadré par :

- ✓ Mr. TIKOBAINI Mourad

Année universitaire : 2015-2016

Dédicaces

Je remercie Allah le tout puissant de m'avoir aidé à l'élaboration de ce modeste travail, ainsi que les personnes qui ont contribué de près ou de loin qu'ils trouvent ici le témoignage de nos gratitude

Ce mémoire est dédié à :

A ma mère Merien

A mes sœurs Fatiha et Ahlem

A mon frère Samir

A tous la famille

A tous mes amis

En fin, nous demandons à Dieu le Tout-Puissant d'avoir pitié de mon père, qui, s'il était vivant, il serait heureux de ce travail

Abderrahim MOKHEFI

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes parents pour leur
soutien indéfectible.*

A Mon frère et à mes sœurs.

Ainsi qu'à toute la famille ERROUANE.

A mon collègue et binôme Abderrahim.

A tous mes amis d'Oran.

A tous mes amis de L'INH.

*Aux camarades et collègues du groupe MATH11 et à
toute la promotion 2011.*

A tous ceux que j'aime et je respecte.

ABDERAHMANE ERROUANE

Remerciement

Ce projet n'aurait pas abouti sans la bénédiction du Bon Dieu, et nos familles Qui nous ont donné le courage et la volonté, et nos enseignants qui nous ont donné le bagage nécessaire pendant le parcours universitaire.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et nos gratitude envers ceux qui ont contribué de près ou de loin aux bonnes démarches de ce travail. Et spécialement nous tenons à remercier notre encadreur Mr. Mourad TIKOBAINI pour ses conseils et ses aides.

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui nous ont aidé dans ce travail et spécialement nous tenons à remercier Mr. Khlifi Touhami et Mr. Redha Saifi et Mr. Karim Younsi pour ces aides ces conseils.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements spécialement pour Mr. Pr. Taher Abess Miloud pour ses efforts consacrés de nous aider dans le domaine des Mathématiques et les méthodes numériques.

Abderrahim MOKHEFI

Abderrahmane ERROUANE

Résumé

الملخص

قمنا من خلال هذا العمل بنمذجة ثم محاكاة ظاهرة الانتشار الجوي للغاز الطبيعي الناجم عن تسرب في خطوط أنابيب نقل الغاز وفق النموذج الغوصي في مناطق تعتبر أفقية، حيث قمنا بعرض المعادلة التي تمكن من استخراج مختلف تراكيز الغاز المنتشر في الجو والتي تعرف باسم معادلة "حركة الهواء الأفقية والحلول" وتعرف كذلك بمعادلة "باسكيل وجيفورد"، ثم قمنا بعرض الطريقة المتبعة للوصول إلى الحل المضبوط في مجال صلاحية محدود بدلالة الاستقرار الجوي، ثم عرض طريقة رقمية تمكن من الوصول إلى التراكيز الجوية.

وقد توصلنا إلى تمثيل النموذج المحاكى حسب غوص لهذا الانتشار في مستويات عدة في النظام الدائم انطلاقاً من سطح الأرض، والذي مكنا من معرفة الطريقة الرياضية التي تتطور من خلالها تراكيز الغاز في الجو والمتأثرة بشروط استقراره التي تمثل دالة لسرعة الرياح ونسبة أشعة الشمس أو ضبابية الجو ونسبة تدفق الغاز من خطوط الأنابيب.

Résumé

Dans ce travail nous avons modélisé puis simulé le phénomène de la dispersion atmosphérique du gaz naturel provoqué par une fuite dans un gazoduc, dans des zones supposées horizontales selon le modèle gaussien. Nous avons présenté l'équation d'advection-diffusion ou de Pasquill-Gifford qui permet par sa résolution de tirer les concentrations du gaz déchargées dans des différents points de l'atmosphère avec une certaine incertitude en fonction de la stabilité atmosphérique, et de donner une méthode numérique de résolution de cette équation.

On est arrivé à simuler cette dispersion selon le modèle gaussien dans des différentes hauteurs en commençant par le sol dans un régime permanent, ce qui nous permet de connaître la manière avec laquelle la concentration de gaz évolue dans l'atmosphère et l'influence de certains variables sur cette évolution comme la stabilité atmosphérique, la vitesse horizontale du vent, le rayonnement solaire, la nébulosité de la nuit et le taux de la fuite.

Abstract

In this work we modeled and simulated the phenomenon of atmospheric dispersion of natural gas caused by a leak in a gas pipeline in supposedly horizontal zones according to the Gaussian model. We presented the advection-diffusion equation or Pasquill-Gifford enabling its resolution to draw the concentrations of the gas unloaded at different points of the atmosphere with some uncertainty depending on the atmospheric stability then we give a numerical method of solving this equation.

We happened to simulate the dispersion of the Gaussian model in different heights, starting with the ground in a permanent regime, which allows us to know the manner in which the gas concentration is changing in the atmosphere and the influence of some variables on this development as atmospheric stability, horizontal wind speed, solar radiation and the leak rate.

Liste des figures

Chapitre 01

Causes et conséquences de fuites de gaz naturel dans les gazoducs

Figure 1.1 : Processus de la corrosion

Figure 1.2 : perte de métal due à la corrosion interne dans une paroi d'un gazoduc

Figure 1.3 : perte de métal due à l'érosion par le sable

Figure 1.4 : perte de métal due à la corrosion interne

Figure 1.5 : fissure dans une paroi d'un pipeline

Figure 1.6 : feux torche accidentelle

Figure 1.7 : schématisation d'une flamme d'une diffusion

Chapitre 02

Détection de fuites du gaz naturel sur les gazoducs

Figure 2.1 : Détection de fuites dans un gazoduc enterré

Figure 2.2 : Organigramme de détections de fuites selon la classification technique

Figure 2.3 : Avion de détection optique de fuites

Figure 2.4 : Une image thermique d'une fuite de gaz

Chapitre 03

L'influence de l'atmosphère sur la dispersion d'un gaz

Figure 3.1 : dispersion atmosphérique de nuages gazeux

Figure 3.2 : variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur

Figure 3.3 : le gradient thermique suivant la stabilité de l'atmosphère

Figure 3.4 : distribution typique de la température d'air en fonction de l'altitude

Figure 3.5 : le mouvement de l'air dans des atmosphères instables et stables

Figure 3.6 : le gradient thermique et le comportement des panaches continus

Figure 3.7 : Description d'une inversion thermique

Figure 3.8 : dispersion d'un nuage humide

Figure 3.9 : Processus de l'advection

Figure 3.10 : Processus de la diffusion

Figure 3.11 : Schéma expliquant le flux de diffusion

Liste des figures

Figure 3.12 : modèle de panache

Figure 3.13 : Fuite de fumée utilisée comme un analogue de gaz naturel

Chapitre 04

Le Taux de fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Figure 4.1 : Diagramme de standing-Katz pour le calcul de Z

Figure 4.2 : fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Figure 4.3 : écoulement de gaz déchargés à travers de l'orifice

Figure 4.4 : écoulement de gaz déchargés à travers de l'orifice

Figure 4.5 : schéma d'un tronçon de gazoduc supposé

Figure 4.6 : Le profil de la pression de la conduite supposée

Figure 4.7 : fuite de gaz naturel dans une position définie

Figure 4.8 : Organigramme de taux de fuite

Figure 4.9 : Variation du taux de fuite en fonction le diamètre de l'orifice

Figure 4.10 : Variation du taux de fuite en fonction le diamètre de l'orifice

Figure 4.11 : Variation du taux de fuite en fonction de la température

Chapitre 05

Modélisation et simulation de la dispersion d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Figure 5.1 : répartition gaussienne de la concentration dans un panache de gaz passif.

Figure 5.2 : schéma de fuite du gaz naturel dans un gazoduc (panache)

Figure 5.3 : projection du nuage du panache dans les trois plans

Figure 5.4 : Distribution de la concentration dans un panache

Figure 5.5 : La distribution gaussienne de la concentration dans des ellipses du panache

Figure 5.6 : schéma d'un gazoduc aérien à l'état d'une fuite

Figure 5.7 : schéma d'un gazoduc enterré à l'état d'une fuite

Figure 5.8 : l'effet du sol sur un panache

Figure 5.9 : les graphes d'estimation des écarts types dans les panaches et les bouffées gaussiennes suivant Pasquill.

Figure 5.10 : les graphes d'estimation des écarts types dans les panaches et les bouffées gaussiennes suivant Pasquill

Figure 5.11 : Le domaine d'étude de la dispersion de la fuite

Liste des figures

Figure 5.12 : Maillages du problème

Figure 5.13 : Les étapes de la méthode ADI

Figure 5.14 : Variation de la concentration du nuage en fonction de la position x dans classes différents de stabilités dans les conditions rurales

Figure 5.15 : Variation de la concentration du nuage en fonction de x et y . (classe A)

Figure 5.16 : Variation de la concentration du nuage vue de face de la figure 5.16.

Figure 5.17 : Variation de la concentration en fonction de taux de fuite (classe A)

Figure 5.18 : Variation de la concentration en fonction de taux de fuite (classe D)

Figure 5.19 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe A)

Figure 5.20 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 6.4 kg/s (classe A)

Figure 5.21 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

Figure 5.22 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

Figure 5.23 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

Figure 5.24 : Courbes iso-concentration pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

Figure 5.25 : Courbes iso-concentration du au plan $z = 0 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.26 : Courbes iso-concentration au plan $z = 3 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.27 : Courbes iso-concentration au plan $z = 7 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.28 : Courbes iso-concentration au plan $z = 10 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.29 : Courbes iso-concentration au plan $z = 14 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.30 : Courbes iso-concentration au plan $z = 16 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.31 : Courbes iso-concentration au plan $z = 22 \text{ m}$ (classe D)

Figure 5.32 : schéma simplifiant le domaine d'étude

Figure 5.33 : Variations de la concentration en fonction de la position x

Figure 5.34 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 5 kg/m^3

Figure 5.35 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 50 kg/m^3

Figure 5.36 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 100 kg/m^3

Figure 5.37 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 150 kg/m^3

Figure 5.38 : Contours du panache pour une vitesse du vent 0.1 m/s

Figure 5.39 : Contours du panache pour une vitesse du vent 1 m/s

Liste des Tableaux

Chapitre 02

Détection de fuites du gaz naturel sur les gazoducs

Tableau 2.1 : comparaison entre les différents techniques de détection de fuites

Chapitre 03

L'influence de l'atmosphère sur la dispersion d'un gaz

Tableau 3.1 : Valeurs du α suivant la stabilité atmosphérique

Tableau 3.2 : rugosité de l'atmosphère suivant différentes situations

Tableau 3.3 : définition de classes de stabilité

Tableau 3.4 : la classe de stabilité en fonction du gradient vertical de température

Tableau 3.5 : la classe de stabilité en fonction de la direction de fluctuations du vent

Tableau 3.6 : classe de stabilité en fonction de vitesse (vent) et rayonnement solaire

Chapitre 04

Le Taux de fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Tableau 4.1 : composition chimique de gaz naturel de Hassi-Rmel (janvier 2016)

Tableau 4.2 : la moyenne de la composition chimique de gaz naturel

Tableau 4.3 : Caractéristiques du gaz naturel (données)

Tableau 4.4 : Propriétés du gaz naturel (calculées)

Tableau 4.7 : Variation du taux de fuite en fonction de diamètre de l'orifice

Chapitre 05

Modélisation et simulation de la dispersion d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Tableau 5.1 : les écarts types du panache dans des conditions rurales

Tableau 5.2 : Les écarts types du panache dans des conditions urbaines

Tableau 5.3 : Les écarts types des bouffées dans des conditions rural et urbain

Table des matières

Introduction.....	01
Chapitre 01	
Causes et conséquences de fuites de gaz naturel dans les gazoducs	02
1.1. Introduction.....	02
1.2. Les causes de fuites dans les gazoducs.....	03
1.2.1. Les facteurs influençant sur l'état des pipelines.....	03
1.2.1.1. Facteurs mécanique.....	03
1.2.1.2. Facteurs liés à l'environnement.....	03
1.2.1.3. Facteurs humains.....	03
1.2.2. Dégradations des pipelines.....	04
1.2.2.1. Dégradations des pipelines par corrosion.....	04
1.2.2.1.1. Le processus de la corrosion.....	04
1.2.2.1.2. La perte de métal due à la corrosion interne.....	05
1.2.2.1.3. La perte de métal due à la corrosion externe.....	06
1.2.2.2. Dégradations des pipelines par dommages mécaniques.....	07
1.2.2.2.1. Définition.....	07
1.2.2.2.2. Les causes de ces dommages.....	07
1.2.2.2.3. Topologie des dommages mécanique.....	08
1.2.2.2.4. Conséquences des dommages mécaniques.....	09
1.2.3. Les percements et les fuites.....	09
1.2.3.1. Définition des percements.....	09
1.2.3.2. Causes de percements.....	09
1.2.3.3. Conséquences des percements.....	09
1.3. Les conséquence de fuite de gaz naturel.....	10
1.3.1. Les conséquences d'une fuite de gaz naturel à l'air libre.....	10
1.3.1.1. Le feu torche.....	10
1.3.1.1.1. Généralités.....	10
1.3.1.1.2. Description du phénomène.....	11
1.3.1.1.3. Origines.....	11
1.3.1.1.4. Conditions d'occurrence d'un feu torche.....	11
1.3.1.1.5. Les conséquences d'un feu torche.....	13
1.3.1.2. Les risques liés au gaz naturel.....	13
1.3.1.2.1. Risques directs.....	13

Table des matières

1.3.1.2.2. Risques indirects.....	14
Chapitre 02	
Détection de fuites du gaz naturel sur les gazoducs	15
2.1. Introduction	15
2.2. Classification des méthodes de détection des fuites.....	16
2.2.1. Classification selon le degré d'intervention humaine.....	16
2.2.2. Classification technique.....	16
2.3. L'organigramme de la classification technique.....	17
2.4. La classification technique de méthodes de détection de fuites.....	18
2.4.1. Les méthodes non techniques.....	18
2.4.1.1. Les chiens de détection de fuites.....	18
2.4.1.2. Dépistage du savon à bulle.....	18
2.4.2. Les méthodes à base de matériel.....	18
2.4.2.1. Les méthodes acoustiques.....	18
2.4.2.2. Les méthodes optiques.....	19
2.4.2.2.1. Les méthodes optiques actives.....	20
2.4.2.2.2. Les méthodes optiques passives.....	21
2.4.2.3. Les capteurs de câble.....	23
2.4.2.4. La surveillance des sols.....	23
2.4.2.5. Échantillonnage de vapeur.....	24
2.4.2.6. Les débitmètres à Ultrason.....	24
2.4.3. Les méthodes à base de logiciels.....	24
2.4.3.1. Le bilan « Masse/Volume ».....	24
2.4.3.2. La modélisation transitoire en temps réel.....	25
2.4.3.3. L'onde négative de la pression.....	26
2.4.3.4. L'analyse du point de pression.....	26
2.4.3.5. Les méthodes statistiques.....	27
2.4.3.6. Traitement des signaux numériques.....	27
2.5. Comparaison entre les techniques de détection de fuites.....	28
2.6. Conclusion.....	30
Chapitre 03	
L'influence de l'atmosphère sur la dispersion d'un gaz	31
3.1. La dispersion atmosphérique des nuages toxique ou inflammable.....	31
3.1.1. Introduction.....	31
3.1.2. Structure de l'atmosphère.....	32

Table des matières

3.1.3. Les variables atmosphériques (météorologiques).....	32
3.1.3.1. Le vent.....	33
3.1.3.2. Le gradient thermique vertical.....	35
3.1.3.3. La stabilité atmosphérique.....	37
3.1.3.4. L'inversion thermique.....	40
3.1.3.5. L'humidité relative.....	41
3.1.3.6. Unités de mesure de la dispersion.....	41
3.2. Processus de dispersion d'un nuage du gaz.....	42
3.2.1. Introduction.....	42
3.2.2. Phénomène d'Advection.....	42
3.2.3. Phénomène de la Diffusion.....	42
3.2.4. La différence entre l'advection et la diffusion.....	44
3.3. Les modèles de dispersion.....	44
3.3.1. Dispersion de gaz selon modèle de « panache ».....	45
3.3.2. Dispersion sous forme d'une « Bouffée ».....	46
Chapitre 04	
Le Taux de fuite de gaz naturel dans un gazoduc	47
4.1. Propriétés du gaz naturel.....	47
4.1.1. Généralités sur le Gaz Naturel.....	47
4.1.2. Calcul de quelques paramètres du gaz naturel.....	48
4.1.2.1. Calcul de la masse molaire.....	48
4.1.2.2. Calcul de la température pseudo-critique.....	48
4.1.2.3. Calcul de la pression pseudo-critique.....	48
4.1.2.4. Calcul de la température et la pression pseudo-réduite.....	48
4.1.2.5. Calcul de facteur de compressibilité.....	49
4.1.2.6. Calcul de la viscosité du gaz.....	50
4.1.2.7. Calcul de la masse volumique du gaz.....	50
4.2. Calcul de Taux de fuite.....	51
4.2.1. Définition de taux de fuite.....	51
4.2.2. Le bilan énergétique d'un écoulement dans un petit orifice.....	51
4.2.3. Le débit massique du gaz à travers l'orifice.....	54
4.2.4. Le débit massique dans le cas d'un écoulement critique.....	55
4.2.5. Le Taux de fuite selon les régimes d'écoulement.....	55
4.3. Résultats et discussion.....	58
4.3.1. Les caractéristiques du gaz naturel.....	58

Table des matières

4.3.1.1. Composition chimique du gaz naturel considéré.....	58
5.3.1.2. Les caractéristiques du gaz naturel.....	59
4.3.1.3. Calcul de propriétés du gaz naturel considéré.....	59
4.3.2. Caractéristique de taux de fuite.....	60
4.3.2.1. Lien avec le transport du gaz naturel.....	60
4.3.2.2. Organigramme de taux de fuite.....	61
4.3.2.3. Variation de taux de fuite selon le diamètre de l'orifice.....	62
4.3.2.4. Variation de taux de fuite en fonction de la pression.....	64
4.3.2.5. Variation de taux de fuite en fonction de la température.....	65
Chapitre 05	
Modélisation et simulation de la dispersion d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc	66
5.1. Modélisation de la dispersion atmosphérique.....	66
5.1.1. La modélisation.....	66
5.1.2.1. Le modèle gaussien.....	66
5.1.2.2. L'équation d'advection-diffusion.....	67
5.1.3. Conditions de l'utilisation du modèle gaussien.....	68
5.1.4. Les types de modèle gaussien de la dispersion atmosphérique.....	70
5.2. Etude mathématique de l'équation d'advection-diffusion.....	70
5.2.1. Obtention de l'équation d'advection-diffusion.....	70
5.2.1.1. La concentration du gaz dispersé.....	70
5.2.1.2. Le flux de transport de fluide.....	70
5.2.1.3. Equation d'advection pure.....	71
5.2.1.4. Equation de diffusion pure.....	72
5.2.1.5. Equation d'advection diffusion.....	72
5.2.2. Mathématique de la dispersion.....	74
5.2.2.1. Simplification du modèle gaussien.....	74
5.2.2.2. Analyse totale du problème.....	75
5.2.2.3. La solution analytique de l'équation d'advection-diffusion.....	76
5.2.2.3.1. Le changement de la variable x par une variable r	76
5.2.2.3.2. La séparation des variables.....	77
5.2.2.3.3. Introduction de la transformée de Laplace.....	78
5.2.2.3.4. La solution du problème.....	80
5.2.2.4 Analyse du « Pasquill-Gifford ».....	81
5.2.2.4.1. La solution dans le cas de « panache ».....	82

Table des matières

5.2.2.4.2. La solution dans le cas de « Bouffée ».....	84
5.2.2.4.3. Estimation des écarts types par la méthode graphique.....	85
5.2.3. Etude numérique.....	87
5.2.3.1. Simplification.....	87
5.2.3.2. Formulation du problème.....	87
5.2.3.3. Résolution du problème en utilisant les différences finies.....	88
5.2.3.3.1. Le schéma des directions alternées implicites –ADI –.....	88
5.2.3.3.2. écriture matricielle des équations ADI.....	91
5.2.3.3.3. Stabilité du schéma.....	95
5.2.3.3.4. Analyse de la consistance.....	96
5.3. Résultats et discussions.....	97
5.3.1. Variations de la concentration « résultats analytiques ».....	97
5.3.1.1. Variations de la concentration selon les classes de stabilités.....	97
5.3.1.2. Variations de la concentration dans un plan horizontal.....	98
5.3.1.3. Variations de la concentration selon le taux de fuite.....	99
5.3.1.4. Les courbes d'iso-concentration dans le plan ($z = 0$).....	100
5.3.1.5. Variation de la concentration du gaz déchargé à différentes hauteurs...	105
5.3.2. Variations de la concentration « résultats numérique ».....	110
5.3.2.1. Formulation du problème.....	110
5.3.2.2. Variation de la concentration en fonction de la position x	111
5.3.2.3. Les courbes des iso-concentration.....	112
5.3.2.4. Variation de la concentration en fonction des vitesses du vent.....	114
Conclusion et perspective.....	116
Références bibliographiques.....	117

Introduction

Le domaine de transport des hydrocarbures est le plus important dans l'industrie des hydrocarbures, car il assure leur arrivée aux installations de traitement, et donc il assure la commercialisation des hydrocarbures.

Le transport par canalisation de gaz naturel est le mode le plus utilisé grâce à son continuité, en plus il est le plus économique et le plus sûr, mais comme toute activité industrielle ce dernier peut exposer à des dangers qui empêchent son propre déroulement, et parmi les dangers qui conduisent aux pertes du gaz transportée sont les fuites. Celles-ci généralement provoquées par des attaques agressives sur la paroi des canalisations. Plusieurs facteurs de risque influent directement sur les canalisations, en particulier, les facteurs mécaniques, les facteurs liés à l'environnement et les facteurs humains.

La démarche adoptée pour le présent travail, consacré à l'étude de la dispersion du gaz naturel suite à une fuite dans un gazoduc, vu que celle-ci peut présenter des dégâts considérables sur tous les plans dont le feu torche est un problème majeur.

C'est pourquoi il nous a semblé intéressant d'étudier la concentration du gaz naturel dans l'atmosphère en fonction des paramètres d'espace.

La présente étude a porté dans un premier temps sur les causes qui provoquent la fuite du gaz naturel à partir des gazoducs, les méthodes de détection de cette fuite présente le long des gazoducs, En outre, on a cité les risques associés à la fuite d'un gaz naturel dans un gazoduc et l'influence de l'atmosphère sur la dispersion du gaz résultante de cette fuite.

Dans la deuxième partie de notre travail nous nous sommes intéressés aux calculs de taux de fuite dans les conduites.

Notre majeur travail était la modélisation de la dispersion atmosphérique d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc en résolvant l'équation « **advection-diffusion** » analytiquement en se basant sur la séparation des variables et numériquement par la méthode de différences finies « schéma de directions implicites ». Enfin nous sommes arrivés à faire une simulation de la concentration du gaz naturel dans l'espace, selon le modèle Gaussien (panache).

Chapitre 01

Causes et conséquences de fuites de gaz naturel dans les gazoducs

1.1. Introduction

Le domaine de transport des hydrocarbures est le plus important dans l'industrie de ces ressources énergétiques, car il assure leur arrivée aux installations de traitement, et donc, il assure la commercialisation des hydrocarbures.

Le transport par canalisation de gaz naturel engendre plus que 75% du transport total grâce à sa continuité, en plus il est le mode de transport le plus économique et le plus sûr, mais comme toute activité industrielle le transport de gaz naturel par canalisation (gazoduc) est exposé à des dangers qui empêchent son propre déroulement, et parmi les dangers qui conduisent aux pertes du gaz transporté, on distingue les fuites causées par des fissurations ou des pénétrations de la canalisation, et aussi les éclatements des gazoducs.

Les gazoducs doivent donc, répondre aux exigences élevées de sécurité de fiabilité et d'efficacité, si ces canalisations sont bien entretenues cela pourra prolonger leurs durées de vie et de services de quelques années, sinon s'ils sont mal entretenus alors ils seront exposés aux risques de corrosion et de fissuration de l'acier donc le danger de perte de la matière transportée. Il est nécessaire alors de faire des opérations périodiques d'inspection en ligne pour bien assurer l'acheminement des hydrocarbures.

Si les gazoducs sont subits des percements, on aura un déchargement de gaz naturel (fuite) à travers l'orifice vers l'atmosphère alors l'exploiteur devra d'abord remarquer une anomalie dans les paramètres du transport, puis il devra savoir la position dans laquelle cette anomalie était produite, depuis ces deux remarques il arrive à constater qu'une fuite de gaz naturel était produite dans cette position. Mais parfois il est difficile de savoir si une fuite est produite dans une position à partir de paramètres du transport qui donnent le manomètre (par exemple) alors dans ce cas il est nécessaire d'utiliser des moyens assez développés pour détecter la fuite de gaz naturel.

Dans ce chapitre, on va prendre soin de connaître les causes qui provoquent la fuite du gaz naturel à partir des gazoducs, autrement dit, les causes qui conduisent aux pénétrations des gazoducs, et les conséquences de ces fuites dans le milieu extérieur (l'air libre), et d'identifier les risques liés aux fuites de gaz dans les gazoducs.

1.2. Les causes de fuites dans les gazoducs

1.2.1. Les facteurs influençant sur l'état des pipelines

L'état d'un réseau de gaz serait parfait si les canalisations (gazoducs) et les installations étaient sans aucun défaut et ne subissent pas de détérioration.

Mais, nous savons que les canalisations qu'ils soient enterrées ou aériennes et leurs accessoires, sont tout le temps soumis à des contraintes et des agressions de différentes natures, internes ou externes qui entraînent leurs détériorations.

La détérioration des canalisations est provoquée par des attaques agressives sur leurs parois. Plusieurs facteurs de risque influent directement sur les canalisations. On distingue :

1.2.1.1. Facteurs mécaniques

- Caractéristiques des différentes canalisations utilisées et leurs résistances.
- Résistance au choc.
- Résistance à la flexion.
- l'usure.
- Corrosion chimique et électrolytique.
- Changement du régime de pression.

1.2.1.2. Facteurs liés à l'environnement

- Agressivité du sol.
- Variation atmosphérique.
- Mouvements et affaissement de terrain, éboulement.
- L'augmentation de trafic le poids des véhicules peut provoquer des cassures.

1.2.1.3. Facteurs humains

- Mode de stockage et de manipulation.
- Non-respect des normes de mises en œuvre.

1.2.2. Dégradations des pipelines

1.2.2.1. Dégradations des pipelines par corrosion

1.2.2.1.1. Le processus de la corrosion

La corrosion désigne une attaque agressive d'un métal sous l'action du milieu environnant (air, eau, solution aqueuse, sols) par un processus de type physicochimique.

« La corrosion est une interaction physico-chimique entre un métal et son environnement entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs ».

En ce qui concerne la corrosion des pipelines, le métal est de l'acier. La corrosion de ce dernier est un phénomène naturel et courant, où les molécules de fer sont transformées en des formes d'hydroxydes ferreux. Le processus de la corrosion peut être décomposé en deux réactions: anodique et cathodique. [1]

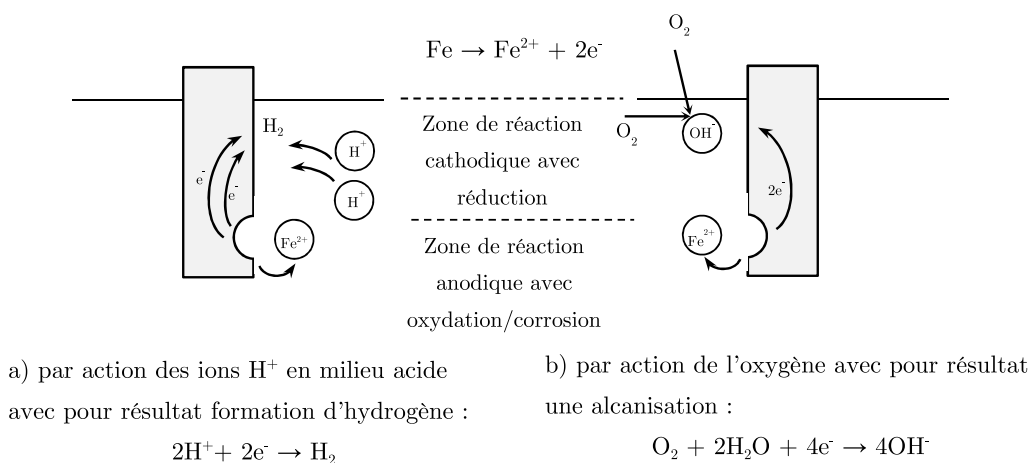


Figure 1.1 : Processus de la corrosion

La corrosion conduit aux pertes de métal des parois des gazoducs (l'acier), si l'attaque de corrosion est assez considérable, alors elle provoque la fragilisation des parois et la perte totale du métal qui conduit au percement des parois des gazoducs avec lesquels on aura une perte de la matière transportée (gaz naturel), c'est le cas d'une fuite.

1.2.2.1.2. La perte de métal due à la corrosion interne

Dans ce type de corrosion la perte de l'acier a lieu dans la surface interne de la paroi du gazoduc, elle est provoquée le plus souvent par des attaques chimiques, ce type de corrosion est favorisée par la présence de sulfure d'hydrogène et de dioxyde de carbone dans le gaz. [2]

La corrosion interne peut être définie aussi comme le résultat d'actions physiques, chimiques ou biochimiques interne dues essentiellement à la présence des effluent (dans notre cas est le gaz naturel) entraînant des pertes de matière aussi bien locales que générales. [1]



Figure 1.2 : Perte de métal due à la corrosion interne dans une paroi d'un gazoduc

Topologie de la corrosion interne

Les topologies correspondantes peuvent revêtir des aspects très différents

La corrosion généralisée : elle concerne de très larges superficies et peut être plus ou moins profonde, elle est en général due à des effluents corrosifs ou infectés par des microorganismes dont l'agressivité affecte l'ensemble des surfaces mises en contact avec le fluide. La lutte est souvent par l'injection d'inhibiteurs.

La corrosion par piqure : corrosion très localisée, très difficile à localiser.

La corrosion par érosion : L'érosion est une corrosion physique localisée dans des zones précises où une attaque mécanique est possible comme par exemple, dans les coudes et les changements des directions brutaux, les actions répétées aux cours du temps amène le métal à s'éroder. La présence du sable ou d'hydrates accélère le processus.

La corrosion bimétallique : corrosion localisée au niveau de contact entre au moins deux matériels ou équipements de nature électronique différenciée plongés dans un milieu électrolytique (conducteur de l'électricité), ils forment alors une pile de corrosion.

La corrosion bactérienne : corrosion due à l'action pathogène de bactéries sulfurogènes présentes dans l'effluent entraînant des corrosions plus ou moins localisées, ce type peut entraîner des percements.



Figure 1.3 : Perte de métal due à l'érosion par le sable

1.2.2.1.3. La perte de métal due à la corrosion externe

La corrosion externe des gazoducs est provoquée généralement par l'agressivité du sol (sol de faible résistivité électrique) s'il y a des défauts de revêtement de la conduite et des insuffisances du système de protection cathodique.

La perte de métal est provoquée le plus souvent par des phénomènes de type électrochimiques et chimiques de la surface externe du gazoduc.

La corrosion externe peut être définie comme le résultat d'actions physicochimiques voire biochimiques sur le pipeline entraînant des pertes de matière aussi bien locales que générales affectant l'extérieure de la canalisation. [2]

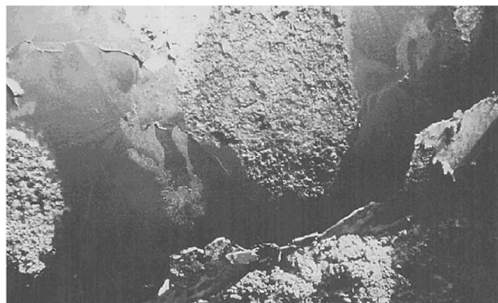


Figure 1.4 : Perte de métal due à la corrosion interne

Topologie de la corrosion externe

On peut citer par exemple :

Dans les zones aériennes :

- La corrosion atmosphérique : due à l'humidité relative de l'air, à des agents contaminants naturels (Cl^-) ou industrielles (SO_2).
- La corrosion due aux zones de marnage ou de variations de conditions d'oxydo-réduction au cours du temps.
- A l'arrachement de partie métallique.

Dans les zones enterrées :

- La corrosion électronique ou électrolytique : par courants vagabonds, telluriques ou industriels, est une corrosion très rapide et très localisée pouvant entraîner des percements.
- Corrosion galvanique : plus ou moins localisée, plus rare très précis et facilement identifiables (brides, connections, jonctions, réparations, soudures, sorties aériennes)

La corrosion bactérienne : (milieu anaérobie, chaud et en présence de soufre dans la calorifuge).

1.2.2.2. Dégradation des pipelines par dommages mécaniques**1.2.2.2.1. Définition**

Les dommages mécaniques sur les pipelines peuvent être définis comme toute modification de la structure ayant lieu après fabrication ou construction et qui peuvent mettre en cause l'intégrité de la structure.

Les dommages mécaniques peuvent être directement imputable à des cause mécaniques (chocs, chutes, déplacement, etc.) ou aux résultats d'agressions différentes et indirectes prenant par exemple des phénomènes électrochimiques qui fragilisent ainsi la structure.

1.2.2.2.2. Les causes de ces dommages

Les causes externes : correspondent à des défauts de manipulation lors des opérations de pose ou de maintenance et à l'environnement immédiat :

- Les chocs par des outils de levage et de manutention (chutes).
- La prestance de matériaux mettant la conduite sous contrainte (rocher, pierre).

- Les glissements de terrain, tremblements de terre.
- Les mauvais encrages de la conduite
- Le gel des terrains environnants
- Les alternances de périodes chaudes et froides
- L'absence de moyen de compensation thermique
- La corrosion externe
- Les erreurs opérationnelles pendant les opérations de réparation et la malveillance.

Les causes internes : correspondent à des mauvaises conditions de transit du gaz et en particulier à :

- La corrosion interne
- L'abrasion interne
- La surpression incontrôlée de montée en pression de gaz, ou à des actions incontrôlées de manutention (fermeture brutale de vannes). [2]

1.2.2.2.3. Topologie des dommages mécanique

Les dommages mécaniques présentent des topologies facilement identifiables qui permettent assez souvent de remonter à l'origine du défaut ou aux causes de l'accident :

Les dommages mécaniques ouverts

Les fissures : Elles sont présentes au sein de l'acier et dans les soudures, elles peuvent être débouchantes ou non et par conséquent dans ce dernier cas difficile à détecter, elles peuvent être par ailleurs évolutives. Le point d'équilibre et l'évolution de ses dernières en fonction des conditions d'exploitation peuvent être depuis quelques années prédites grâce à des simulations numériques.

On distingue : les fissures longitudinales, les fissures transversales, les fissures HP.

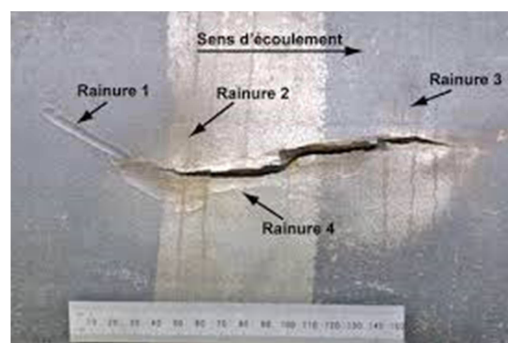


Figure 1.5 : Fissure dans une paroi d'un pipeline

Les dommages mécaniques fermés

On distingue : les enfoncements, les arrachements, les ondulations, les ovalisations de la conduite, ces dommages changent la géométrie de la conduite par des effets mécaniques qui affecte la dureté de l'acier, Ils facilitent le percement et la rupture des parois donc, elles provoquent la fuite.

1.2.2.2.4. Conséquences des dommages mécaniques

Les conséquences mécaniques et environnementales peuvent aller du simple incident comme par exemple l'enfoncement ayant aucune incidence immédiate sur l'environnement, au plus grave comme la rupture de la conduite entraînant la pollution de l'atmosphère dans des larges zones.

1.2.3. Les percements et les fuites

Les percements et les fuites représentent quelques pourcent des dégradations mais pratiquement 100% des incidents ou accidents graves. Ils sont souvent le résultat de processus antérieurs non détectés induits par d'autres types de corrosion.

1.2.3.1. Définition des percements

Le percement est une communication physique entre l'intérieur et l'extérieur de la conduite pouvant entraîner une fuite c'est-à-dire une allée et venue de fluide si un différentiel de pression existe. Dans la plupart des cas la pression régnant à l'intérieur de la canalisation étant supérieure à la pression externe, il y a par conséquent un écoulement de fluide vers l'extérieur de la conduite.

1.2.3.2. Causes de percements

Le percement correspond à une phase extrême de corrosion (perte totale de matière) due à des défauts d'isolant. Il peut être imputé à différentes causes. Très localisé, sa formation est souvent très rapide et est en général le résultat de modifications locales des conditions électrochimiques de pipe et du milieu.

L'origine peut en être proche (au niveau des soudures) ou lointaine (sortie de courant vagabond). Dans les deux cas la quantité du métal perdu suit la loi de Faraday.

1.2.3.3. Conséquences des percements

Elles vont du simple suintement sous faible pression à la fuite pouvant entraîner une explosion.

1.3. Les conséquence de fuite de gaz naturel

Les fuites de gaz naturel à partir des gazoducs forment un problème grave qui oblige la réparation immédiate. En plus d'être une perte dans le gaz transporté, il cause des dangers plus pires et mortels. Il peut provoquer des explosions et des incendies.

Le gaz naturel est un composant de plusieurs hydrocarbures dont le gaz méthane est le prépondérant qui est facilement inflammable dès son mis en contact avec une source d'étincelle, et cela peut entraîner des risques mentionnés précédemment. Ces risques représentent des fonctions de débit de gaz rejeté et de sa température et sa concentration dans milieu environnant.

Nous nous occupons dans ce chapitre de mentionner les risques les plus importants de fuites de gaz naturel à partir des gazoducs et de décrire comment cela se passe. [2]

1.3.1. Les conséquences d'une fuite de gaz naturel à l'air libre

1.3.1.1. Le feu torche

1.3.1.1.1. Généralités

Un feu torche se caractérise :

- Par son aspect chimique lié aux nombreuses réactions chimiques qui s'effectuent simultanément au cours du processus de combustion entre l'oxygène de l'air (comburant) et les gaz de combustion. Ces réactions chimiques produisent généralement du dioxyde de carbone, du monoxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des suies, et enfin des produits imbrulés.
- Par la production de chaleur qui résulte des réactions chimiques exothermiques de la combustion, chaleur transmise à l'environnement sous trois formes : la diffusion, la convection et le rayonnement.
- Par le transfert de masse qui se manifeste sous deux formes : les mouvements de convection des gaz composant la flamme et les transferts de masse par diffusion (moléculaires ou turbulentes) de certaines espèces par rapport à d'autres dans le milieu de la flamme. Ce phénomène de diffusion permet le mélange intime des espèces favorisant leur contact et par conséquent les processus de combustion.

1.3.1.1.2. Description du phénomène

Dans l'environnement industriel, les feux de torche appelés également feux chalumeau peuvent survenir suite à des fuites accidentelles de fluides inflammables ou à des évacuations intentionnelles de sous-produits par l'intermédiaire de torchères.

1.3.1.1.3. Origines

Le phénomène de feu de torche a pour origine un rejet de fluides combustibles, généralement à l'état gazeux, qui s'enflamme :

Spontanément si sa température est suffisamment élevée.

- En raison de points chauds.
- Par démarrage d'un véhicule situé à proximité (étincelle).
- Par action de la foudre.

Afin de se prémunir de tels événements, il est important de pouvoir prévoir et évaluer les conséquences associées aux feux torche. Pour ce faire, il est notamment nécessaire d'estimer les caractéristiques géométriques de la flamme et de déterminer le flux radiatif émis par la flamme.

1.3.1.1.4. Conditions d'occurrence d'un feu torche

Lorsqu'un jet de combustible gazeux ou diphasique issu d'une fuite accidentelle ou intentionnelle liée à la défaillance d'un équipement (brèche dans une canalisation ou un réservoir, ...) pénètre dans l'air ambiant au repos, le combustible se mélange à l'air par l'effet d'entraînement et de diffusion. Si ce mélange s'enflamme par l'intermédiaire d'une source d'inflammation, le feu torche prend naissance sous la forme d'une flamme de diffusion (Figure 1.6).



Figure 1.6 : Feu de torche accidentel

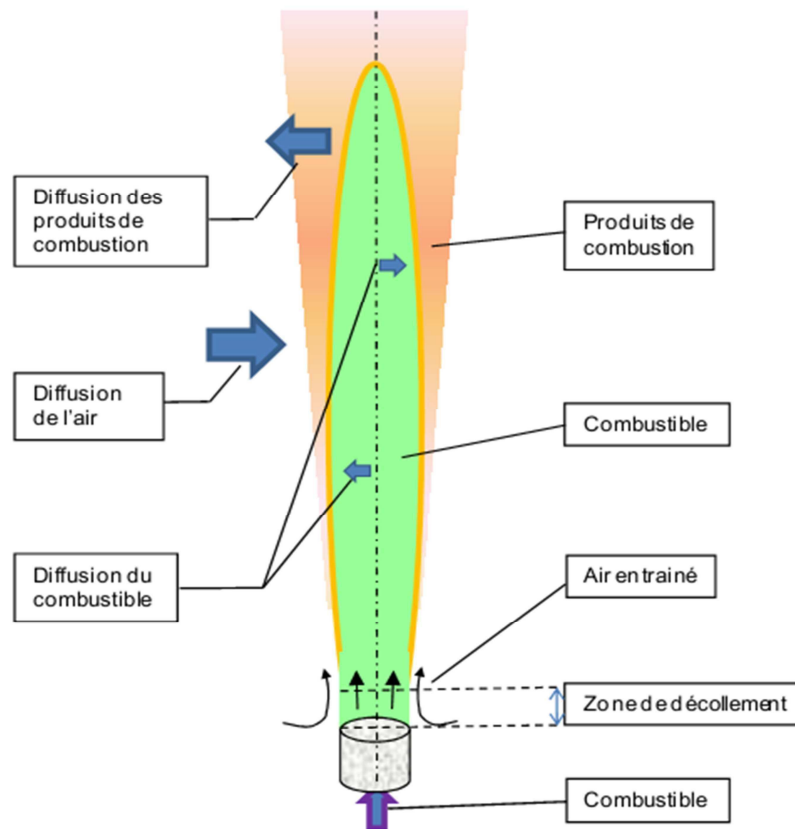


Figure 1.7 : Schématisation d'une flamme d'une diffusion

Une flamme de diffusion est définie par :

- La zone de décollement caractérisée par une absence de réaction de combustion, la concentration de combustible étant trop riche.
- La zone de diffusion du combustible dont la forme est régie par la vitesse du combustible en sortie de brèche. Cette zone est caractérisée par une concentration élevée en combustible ;
- La zone de réactions chimiques (représentées par le trait jaune sur la (Figure 1.7), qui séparent le milieu oxydant (l'air ambiant) situé à l'extérieur de la flamme, du milieu réducteur (le combustible) situé à l'intérieur de la flamme.
- Le combustible et l'air n'étant pas pré-mélangés, la combustion se produit dans la zone où le comburant et le combustible se mélangent dans des proportions adéquates, c'est-à-dire lorsque les concentrations du combustible dans l'air sont comprises dans le domaine d'inflammabilité du combustible ;

- La zone de diffusion des produits de combustion issus des réactions chimiques exothermiques. Ces gaz chauds, situés en aval de la flamme, prennent une trajectoire ascendante par effet de flottabilité.

1.3.1.1.5. Les conséquences d'un feu torche

Parmi les conséquences les plus critiques, il convient de citer des pertes humaines (ouvriers, conducteurs de camions...) et matérielles (effets dominos) pouvant entraîner également une perte de production, et plus grave une propagation à d'autres installations.

Par ailleurs, quelques éléments observés donnent une idée qualitative des conséquences des feux torche :

- Les débits de fuite qui représentent des quantités importantes de combustibles rejetés (toxicité).
- L'orientation de la flamme qui peut avoir une influence déterminante sur l'occurrence d'effets dominos (thermique). [3]

1.3.1.2. Les risques liés au gaz naturel

L'exploitation du gaz naturel comporte des risques :

- Les risques directs, pour l'homme.
- Les risques indirects, dû à son impact environnemental.

1.3.1.2.1. Risques directs

a) Incendie

Le gaz naturel est un combustible. En présence d'oxygène et d'une source de chaleur, il peut s'enflammer et exploser pour une concentration de gaz naturel dans l'air comprise entre 5 et 15%.

b) Explosion

Pour qu'il y ait explosion, en cas d'inflammation d'un mélange air/gaz, il faut que le milieu soit confiné. En milieu libre (non confiné), le gaz naturel ne détonne pas car il se dilue rapidement dans l'atmosphère ;

c) Anoxie (insuffisance cellulaire en oxygène)

À l'état libre, le gaz naturel est plus léger que l'air. Il s'élève rapidement et se disperse sans créer de nappe gazeuse ni au sol, ni dans l'atmosphère. Par contre, en

milieu confiné, si la concentration du mélange gaz-air est supérieure à 25%, le gaz naturel se substitue à l'oxygène de l'air inhalé. Il agit alors comme un gaz asphyxiant par privation d'oxygène.

d) Intoxication

Dans un lieu confiné et dans le cas d'une combustion en milieu appauvri en oxygène, il y a production de monoxyde de carbone à partir du gaz naturel. Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et inodore qui, même en petite quantité dans l'air, est immédiatement absorbé dans le système sanguin et prive le corps d'oxygène, d'où une mort rapide. Le risque d'intoxication sera plus ou moins élevé selon la dose absorbée, qui elle-même dépend de la concentration de l'air en monoxyde de carbone et de la durée d'exposition.

e) Projection

La libération d'un gaz comprimé à forte pression peut s'accompagner de projections d'objets (éclats métalliques, terre, pierres...).

f) Brûlures par le froid

Le gaz naturel liquéfié, stocké sous forme cryogénique (c'est-à-dire à de très basses températures), comporte des risques de brûlures.

1.3.1.2.2. Risques indirects

Chaque étape de l'exploitation du gaz naturel entraîne des émissions de gaz naturel dans l'atmosphère. Or, l'un des principaux composants du gaz naturel est le méthane (CH_4), dont l'effet de serre est plus de 20 fois supérieur à celui du CO_2 (avec toutefois un temps de séjour moins long dans l'atmosphère). [4]

Chapitre 02

Détection de fuites du gaz naturel sur les gazoducs

2.1. Introduction

Le réseau de transport et de distribution de gaz naturel dans le monde entier est un chantier en expansion continue. Selon l'étude présentée dans les pipelines, comme un moyen de transport, sont les plus sûrs, mais cela ne signifie pas qu'ils sont sans risque. Par conséquent, l'assurance de la fiabilité de l'infrastructure de transport de gaz est devenue un besoin vital pour le secteur de l'énergie. La principale menace considérée, lors de la recherche de moyens de fournir la fiabilité du réseau de canalisations, est l'apparition des fuites.

Quelle que soit leurs tailles, les fuites de pipelines sont une préoccupation majeure en raison des effets considérables qu'ils pourraient avoir. Ces effets vont au-delà des coûts impliqués par les dépenses de mobilisation et de réparation, et peuvent inclure des blessures humaines, ainsi que des catastrophes environnementales. Les principales causes des accidents des pipelines de gaz sont: les interférences, la corrosion, les défauts de construction, la défaillance des matériaux externes et les mouvements du sol.

Pour contrer les effets désastreux des fuites de gaz, un effort considérable a été investi, au cours de la dernière décennie, dans la conception des techniques de détection des fuites de gaz. Cependant, révélant la présence d'une fuite de gaz ne sont pas suffisants pour fournir une mesure antagoniste efficace. Avant de décider d'un ensemble d'actions correctives, d'autres informations doivent être connues telles que : l'emplacement de la fuite, sa taille, etc.

Le but principal est d'identifier l'état de l'art dans les techniques de détection des fuites de gaz et de présenter des techniques de localisation, ainsi que d'autres caractéristiques importantes, pour chacune des méthodes étudiées.

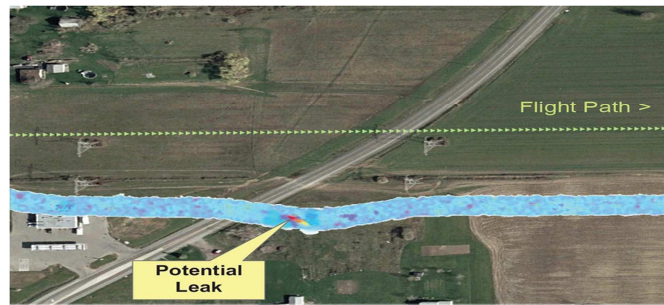


Figure 2.1 : Détection de fuites dans un gazoduc enterré [5]

2.2. Classification des méthodes de détection des fuites

Plusieurs critères sont pris en compte pour la classification de méthodes de détection des fuites, dont certains sont : le degré de l'intervention humaine nécessaire, la grandeur physique mesurée et la nature technique des méthodes.

2.2.1. Classification selon le degré d'intervention humaine

Cette classification est basée sur le degré d'intervention humaine, on distingue :

- **Détection automatique** : des systèmes de surveillance complets, peut signaler la détection d'une fuite de gaz sans la nécessité d'une intervention humaine, une fois qu'ils sont installés par exemple, câble capteurs à fibre optique.
- **Détection semi-automatisée** : qui a besoin d'une certaine intervention humaine ou d'aide dans l'exécution de certaines tâches (par exemple des méthodes de traitement de signaux statistiques ou numériques).
- **Détection manuel** : par des appareils qui ne peuvent pas être directement exploités sauf s'il y a une intervention des exploitants (par exemple : imageurs thermique ou dispositifs LIDAR).

2.2.2. Classification technique

La façon la plus courante de classer les méthodes de détection de fuites est basée sur leur nature technique. On peut ainsi distinguer deux grandes catégories de méthodes: les méthodes basées sur les matériels et les méthodes basées sur les logiciels. Ces deux catégories sont parfois mentionnées comme externe ou interne, les systèmes basés sur la détection des fuites. Bien que pas souvent présenté dans la littérature récente en tant que catégorie distincte, il y a une troisième classe qui couvre les méthodes dites biologiques. Faisant référence à ces méthodes comme non-technique.

- **Les méthodes non techniques** : sont celles qui ne font pas l'usage de tout dispositif et comptent uniquement sur les sens naturels (à savoir l'odorat et le voyant) des êtres humains et / ou des animaux.
- **Méthodes à base de matériel (Hardware Based Methods)**: reposent principalement sur l'utilisation de dispositifs spéciaux de détection de fuites de gaz. En fonction du type de capteurs et d'appareils utilisés pour la détection, ces procédés de matériel peuvent être en outre classifiés comme : capteur acoustique, câble optique, la surveillance des sols, les débitmètres ultrasoniques et échantillonnage de vapeur.
- **Méthodes à base de logiciels (Software Based Methods)**: ils ont des programmes et des logiciels à leur base. La mise en œuvre est basée sur des algorithmes qui surveillent en permanence l'état de la pression, la température, la vitesse d'écoulement ou d'autres paramètres de pipeline et peut déduire, sur la base de l'évolution de ces quantités, si une fuite est survenue. Les méthodes de logiciels peuvent utiliser des approches différentes pour détecter les fuites : les bilans massiques ou volumiques, la modélisation transitoire en temps réel, les méthodes acoustique, l'onde négative de pression, l'analyse des points de pression, les statistiques ou les traitements digitaux du signal.

2.3. L'organigramme de la classification technique

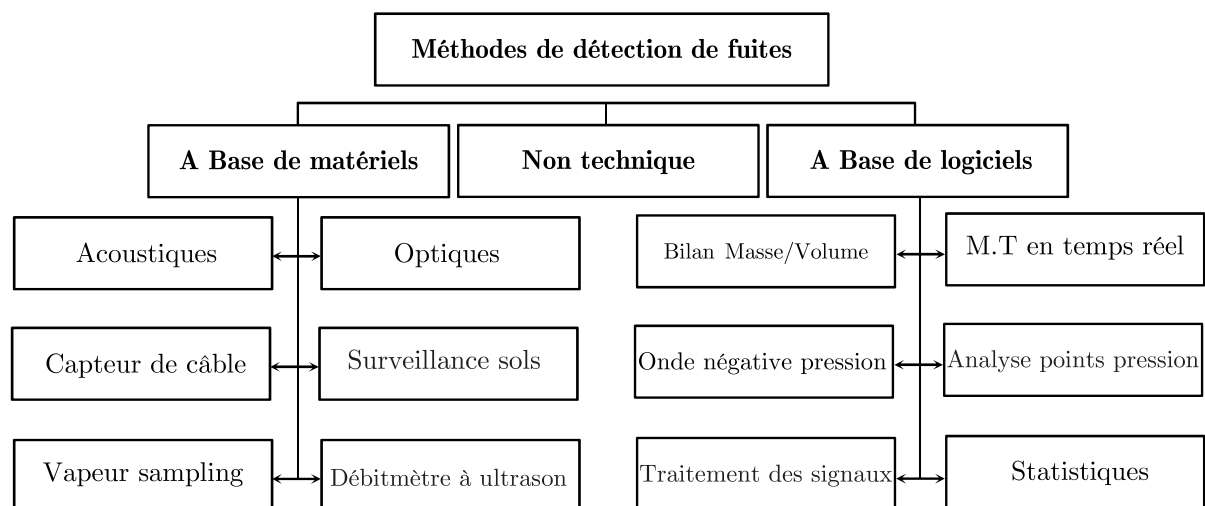


Figure 2.2 : Organigramme de détections de fuites selon la classification technique [6]

2.4. La classification technique de méthodes de détection de fuites

2.4.1. Les méthodes non techniques

Comme il est indiqué, ces méthodes impliquent l'intervention de l'agent humain patrouillant le long des pipelines à rechercher d'effets visuels d'une fuite de gaz, l'odeur des substances qui pourraient être libérées par une fuite ou écouter de sons spécifiques qui peuvent être fait par le gaz fuyant.

2.4.1.1. Les chiens de détection de fuites

Parfois les chiens formés sont utilisés car ils sont plus sensibles à l'odeur de certains gaz. Cependant, l'utilisation des chiens pour détecter les fuites présentes l'inconvénient qu'ils ne peuvent pas être efficaces pour des périodes plus longues de 30 à 120 minutes de recherche continue. En outre, la précision de cette approche peut être non effective par la fatigue et l'interprétation donnée par le gestionnaire de la réponse du chien.

2.4.1.2. Dépistage du savon à bulle

C'est une méthode peu coûteuse pour localiser les petites fuites, peut aussi être incluse dans cette catégorie. Elle consiste à pulvériser une solution de savon sur des emplacements différents du pipeline ou sur des surfaces suspectes sur le tuyau.

Habituellement, le dépistage du savon est principalement appliqué aux valves et joints de tuyauterie comme ce sont des fuites de gaz dans des endroits prédisposés. Cette méthode est rapide et à faible coût, il serait donc, utile en tant que une partie des procédures d'inspection de routine.

Cette méthode présente l'avantage qu'elle ne nécessite pas d'équipement spécial et qu'elle about à la localisation immédiate de la fuite lors de la détection.

Malheureusement l'utilisation de cette méthode ne peut pas être appliquée dans un grand espace, elle peut être efficace seulement dans un intervalle fermée (coude, branchement, joint de soudure ...etc.).

2.4.2. Les méthodes à base de matériel - Hardware Based Methods -

2.4.2.1. Les méthodes acoustiques

La fuite de gaz génère un signal acoustique comme il s'écoule à travers une brèche dans le pipeline. Ainsi, ce signal peut être utilisé pour déterminer si une fuite a eu lieu.

Pour enregistrer le bruit de la canalisation interne, les capteurs acoustiques doivent être utilisés. Ils peuvent être intégrés dans des appareils de détection portatifs utilisés par les opérateurs patrouillant le pipeline ou chez les outils intelligents qui voyagent à travers le pipeline inspecté.

Un suivi continu est également effectué par l'installation de détecteurs acoustiques à l'extérieur du pipeline à une certaine distance les uns des autres. La distance entre les deux capteurs acoustiques doit être adaptée en fonction de la sensibilité du capteur acoustique. Plusieurs types de capteurs ont été utilisés pour détecter les sons produits par le gaz échappé. Elles vont à partir de capteurs acoustiques et des accéléromètres à des microphones et des capteurs de pression dynamique.

Les techniques acoustiques de détection des fuites ont été étudiées depuis les années, ils ont utilisé des capteurs de pression pour enregistrer l'apparition des ondes acoustiques de pression provoquées par des fuites.

Avantages et désavantages

En ce qui concerne les avantages :

- Le fonctionnement en mode continu est possible et que le système peut être automatisé. Les méthodes acoustiques peuvent également aider à déterminer l'emplacement de la fuite et l'estimation de sa taille.
- Cette technique pourrait être utilisée sur les nouveaux pipelines, ainsi que sur les pipelines existants.

Comme un désavantage :

- Un bruit élevé proche de l'écoulement peut masquer le signal de fuite réelle (bruit, par exemple des véhicules passant, soupape ou bruit de la pompe).
- Le coût de l'installation de capteurs nécessaires pour les longs pipelines est élevé.

2.4.2.2. Les méthodes optiques

Les méthodes optiques utilisées pour la détection de fuite peuvent être divisées en deux catégories: active ou passive. Une approche commune est d'étudier les réseaux de pipelines de gaz naturel à l'aide des dispositifs optiques d'avions monté pour la détection des fuites. La carte résultante offre un aperçu de l'ensemble du réseau et révèle l'emplacement des fuites existantes plus rapidement.



Figure 2.3 : Avion de détection optique de fuites [5]

2.4.2.2.1. Les méthodes optiques actives

Les méthodes actives nécessitent un éclairage de la zone numérisée à l'aide d'une source de rayonnement, l'absorption ou la diffusion du rayonnement émis causés par des molécules de gaz naturel est surveillée et si l'absorption ou la diffusion significative est détectée au-dessus d'un pipeline, alors qu'une fuite est présumée existée. Parmi les méthodes actives on distingue :

a) **Les systèmes LIDAR -Light Detection and Ranging-**: utilisent un laser pulsé pour éclairer la zone et un détecteur pour surveiller l'absorption de l'énergie de laser le long du chemin. Ceci est une technique sensible qui peut être utilisée pour la surveillance à distance. Cependant, le prix élevé des lasers pulsés et la courte durée de vie du système viennent comme des inconvénients.

b) **L'absorption du laser à diode** : est similaire dans la technologie pour les systèmes LIDAR mais avec une signification différente. Au lieu des lasers pulsés coûteux, l'illumination est donnée par des lasers à diode. Cette méthode est adaptée à la fois pour les détecteurs portatifs à courte portée et détection aérienne à haute altitude. Un inconvénient de ces systèmes est la possibilité de générer de fausses alarmes.

c) **Les systèmes radar à ondes millimétriques** : sont basés sur la signature du radar de la zone au-dessus des conduites de gaz. Les gaz tels que le méthane sont plus légers que l'air et cette différence de densité peuvent produire une signature spécifique du radar qui peut être évalué afin de détecter les potentielles de fuites. Cette méthode est efficace, mais aussi coûteuse.

d) **L'imagerie par rétrodiffusion** : est une autre technique coûteuse qui implique l'utilisation d'un laser à dioxyde de carbone destiné à éclairer la scène. Comme le gaz naturel disperse la lumière laser, la signature de diffusion est capturée à l'aide d'une caméra infrarouge. Les tendances révélées par l'appareil photo peuvent alors montrer si une fuite de gaz est présente.

e) **Systèmes d'absorption de large bande** : des lampes à faible coût sont utilisées pour fournir la source. Pour réduire la probabilité de fausses alarmes, de multiples longueurs d'onde sont utilisées pour la surveillance. Ce système peut fournir une détection à longue portée, mais est toujours sujette à de fausses alarmes.

f) **La fibre optique** : peut être utilisée pour surveiller une série de propriétés physiques et chimiques. Les changements de température –par exemple- à la suite d'une fuite de gaz de la conduite seront signalés par le câble optique de détection de fibre qui doit être situé à proximité de la conduite. Ces changements dans les caractéristiques de transmission sont enregistrés par l'utilisation de lasers et détecteurs optiques.

L'emplacement de la fuite et de la concentration de fuite de gaz peuvent également être détecté en utilisant cette méthode. Un avantage significatif de l'utilisation de fibre optique est qu'il est insensible aux interférences électromagnétiques. Plusieurs inconvénients ont également été rapportés pour l'utilisation de cette technique, tels que les coûts élevés. En outre, l'application de cette méthode pour des systèmes de pipelines déjà existants peut être difficile car il faudrait dans certains cas, déterrer des tuyaux enterrés pour placer le câble fibre optique à proximité du tuyau.

2.4.2.2.2. Les méthodes optiques passives

La principale différence entre la surveillance passive et active est que la surveillance passive ne nécessite pas une source de rayonnement. Ceci est un avantage qui diminue le coût. Cependant, ce manque doit être compensé avec des détecteurs plus performants et des imageurs qui sont coûteux. Il existe plusieurs types de systèmes de détection de fuites passive :

a) **L'imagerie thermique** : utilise les différences de température entre le gaz fuité et le milieu environnant pour détecter les fuites. Cette méthode peut-être utilisée à partir du sol et de véhicules aériens, et également a été installé avec succès sur des robots

autonomes. Les imageurs thermiques nécessaires pour détecter de petites différences de température sont cependant coûteux. Un autre inconvénient est que la fuite ne peut pas être détectée si le gaz a la même température que le milieu environnant.

b) L'imagerie Multi-spectral : ou multi-longueur d'onde elle peut être utilisée en mode d'absorption ou en mode d'émission. En utilisant cette technique en mode d'émission peut conduire à la détection de fuites si la température des gaz est beaucoup plus élevée que la température de l'air ambiant. Pour l'imagerie par absorption de plusieurs longueurs d'onde, l'absorption de rayonnement de fond est enregistrée à multiples longueurs d'onde pour générer une carte de la concentration de gaz. Cette technique présente un risque négligeable de générer de fausses alarmes et peut être utilisée dans la détection à distance sans surveillance constante. Ce type de détection est aussi très coûteux.

c) Filtre de gaz à corrélation radiométrie : (GFCR) -Gas Filter Correlation Radiometry-: Utilise un échantillon de gaz cible en tant que filtre spectral. Le rayonnement entrant passe par une étroite filtre passe-bande, le faisceau est divisé le long de deux chemins : celui qui a une cellule remplie avec le gaz d'intérêt (appelé cellule de corrélation) et un autre chemin qui a une cellule vide. Le filtre spectral constitué de la cellule de corrélation est utilisée pour éliminer l'énergie entrant du faisceau aux longueurs d'onde correspondant aux lignes d'absorption du gaz. Les radiants fondants des deux chemins sont mesurés à l'aide de détecteurs infrarouges et utilisés pour décider si une fuite de gaz est présente. Instruments GFCR comme les vrais sont montés sur des avions tels que un hélicoptère et peut localiser des fuites à partir d'une altitude de 300 mètres.

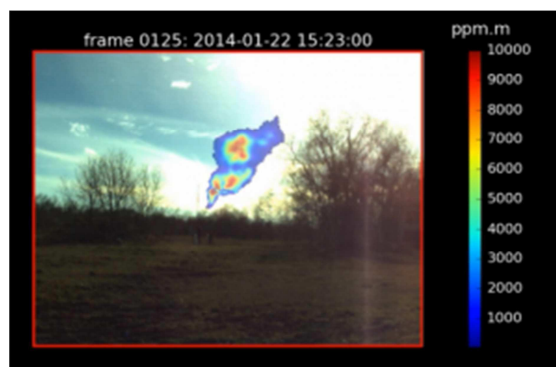


Figure 2.4 : Une image thermique d'une fuite de gaz

2.4.2.3. Les capteurs de câble

Les capteurs de câbles électriques ont été utilisés pour la détection de fuites de gaz. Les câbles sont construits avec des matériaux qui réagissent au contact de certaines substances. Cette réaction modifie les propriétés telles que la résistance ou la capacité du câble qui peuvent être surveillés pour détecter l'apparition d'une fuite. Plusieurs techniques ont utilisé un câble de détection sensible aux hydrocarbures dans un système permettant de détecter et localiser les fuites avec une précision d'environ 20 mètres.

Certains câbles contiennent deux boucles de circuit. Un circuit est connecté à une source d'alimentation et l'autre à une alarme. Lorsque les deux circuits sont en contact l'alarme sera signalée. Le contact filaire direct peut se produire lorsque le matériau de séparation des fils se dégrade, en présence de fuite de gaz, ce qui leur permet de toucher. Le même effet est réalisé en utilisant un matériau d'enrobage qui se gonfle, une fois le contact avec le gaz, ce qui oblige le deux fils d'être en contact.

Avantages et désavantages

Cette technique de détection de fuite donne une réponse assez rapide et elle est plus sensible que certaines méthodes computationnelles, cependant, les coûts de mise en œuvre d'un tel système sont assez élevés. D'autres inconvénients notables sont la difficulté de modernisation du pipeline, et l'incapacité d'estimer la taille de la fuite.

2.4.2.4. La surveillance des sols

La surveillance des sols implique inoculer le gazoduc avec une quantité de composé traceur. Ce produit chimique traceur est un gaz non dangereux et hautement volatil, il quitte le tuyau à l'endroit exact de la fuite (si cela a eu lieu). Pour détecter une fuite, l'instrumentation doit être utilisée pour surveiller la surface au-dessus du pipeline en faisant glisser les dispositifs le long ou à travers des sondes installées dans le sol à proximité des pipelines. Les échantillons prélevés sont ensuite analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse.

Avantages et désavantages

Le taux de fausse alarme très faible et une sensibilité élevée sont quelques avantages de l'utilisation de surveillance du sol pour la détection des fuites. La méthode est très coûteuse car l'état des traces de produits chimiques doit être continuellement

ajoutée au tuyau pendant le processus de détection. Le nom de la méthode provient d'un autre inconvénient, qu'il ne peut pas être utilisé pour les canalisations apparentes.

2.4.2.5. Échantillonnage de vapeur

Les fuites peuvent également être détectées par l'échantillonnage des vapeurs d'hydrocarbures à proximité de la canalisation. Cela peut être fait soit par un système de contrôle de vapeur qui comporte un tube de capteur le long de la canalisation enterrée soit à l'aide de détecteurs mobiles portés par un opérateur ou montés sur des véhicules télécommandés.

Le système de surveillance à distance utilise un tube de capteur enterré en parallèle à la canalisation. Le tube est perméable au gaz cible, de sorte que, dans le cas d'une fuite, une partie du gaz échappée sera diffusée dans le tube. Afin d'analyser le contenu du tube, on utilise une pompe pour pousser périodiquement le contenu du tube au-delà d'une unité de surveillance

Cette méthode n'est pas applicable au-dessus du sol ou de gazoducs à haute profondeur et le coût est extrêmement élevé.

2.4.2.6. Les débitmètres à Ultrason

Les systèmes basés sur les débitmètres à ultrasons peuvent également être utilisés pour la détection de fuites de gaz. La canalisation est constituée d'une série de segments. Chaque segment est délimité par deux stations de sites qui sont constitués d'un dispositif de mesure de débit à pince, un capteur de température et une unité de traitement. Chaque station de site permettra de mesurer ou de calculer les taux volumétriques de débit de gaz et la température de l'air ambiant, la vitesse de propagation du son et des conditions du site de diagnostic. Cette technologie permet de localiser la fuite avec une précision de 150 mètres. En revanche, la modernisation de canalisations enterrées serait difficile.

2.4.3. Les méthodes à base de logiciels - Software Based Methods –

2.4.3.1. Le bilan « Masse/Volume »

La technique de détection des fuites par la méthode de bilan de masse ou de volume est basée sur le principe de la conservation de la masse. Un déséquilibre entre l'entrée et la sortie de masse ou de volume de gaz peut révéler l'existence d'une fuite. Le

volume de gaz sortant d'une section de la canalisation est soustrait du volume de gaz entrant dans cette section, et si la différence est supérieure à un certain seuil, une alarme de fuite aura lieu. La masse ou le volume peut être calculé en utilisant les lectures de certaines variables de processus couramment utilisés : débit, pression et température.

La performance de cette méthode dépend essentiellement de la taille de la fuite, la fréquence d'équilibre calculée et la précision des instruments de mesure. Il peut être facilement installé dans les pipelines existants car il repose sur l'instrumentation qui est disponible sur tous les pipelines et il est facile à utiliser. Le coût relativement faible est un autre avantage de cette méthode. Si les petites fuites se produisent, il faut beaucoup de temps pour les détecter. Par exemple, une fuite de 1% a besoin plus ou moins 60 minutes à détecter. Cette méthode ne peut pas être utilisée pour localiser la fuite et elle est sujette à de fausses alarmes.

2.4.3.2. La modélisation transitoire en temps réel

Certaines techniques de détection des fuites travaillent sur des modèles de débit de la canalisation obtenus en utilisant des équations comme : conservation de la masse, la conservation du moment, la conservation de l'énergie et de l'équation d'état du fluide. La différence entre la valeur mesurée et la valeur calculée du débit est utilisée pour déterminer la présence de fuite, les mesures de débit, de pression et de température sont requises par cette technique. Les niveaux de bruit et les événements transitoires sont surveillés en permanence afin de minimiser les fausses alarmes.

Un observateur avec une adaptation à friction a été conçu, dans l'éventualité d'une fuite, va générer une sortie différente que celle obtenue à partir de mesures, ce qui conduit à la détection de la fuite. Une autre proposition utilise un modèle linéarisé discrétisé d'écoulement sur une grille N- nœud et une banque d'observateurs. Les observateurs ont été construits de telle sorte que dans le cas d'une fuite vont réagir sauf un. La position de l'observateur non réactif conduit à la localisation de la fuite, tandis que les sorties des autres observateurs peuvent être utilisés pour quantifier la fuite.

Cette méthode permet de détecter les petites fuites (moins de 1% du débit), mais elle présente l'inconvénient d'être très coûteux, car elle nécessite une instrumentation

pour la collecte de données en temps réel. Les modèles utilisés sont complexes et nécessitent un utilisateur formé.

2.4.3.3. L'onde négative de la pression

Une fuite se produisant dans un pipeline est associée à une chute brutale de la pression, à l'endroit de la fuite, qui se propage comme une onde à la fois en amont et en aval. Cette onde est appelée une onde de pression négative et peut être enregistrée à l'aide des capteurs de pression installés aux deux extrémités de chaque segment de tuyau.

L'algorithme de détection de fuites doit interpréter les lectures obtenues à partir des capteurs de pression et de décider si une fuite est présente. L'emplacement de la fuite peut être identifié en utilisant la différence du temps entre les moments où les deux capteurs de pression des extrémités des pipes détectent l'onde de pression négative. Si la fuite est près d'une extrémité du tuyau, le transducteur de cette extrémité sera le premier à recevoir l'impulsion, et le temps nécessaire pour recevoir l'impulsion à l'autre extrémité peut être utilisée pour détecter l'emplacement de la fuite avec une bonne précision.

Une autre façon d'utiliser les ondes de pression pour détecter les fuites consiste à générer volontairement les ondes de pression transitoires, en fermant et en ouvrant périodiquement les vannes. Si une fuite est présente, ces ondes de pression reflètent partiellement alors elles permettent la détection et la localisation de la fuite. Cependant, en utilisant des ondes de pression pour détecter les fuites est peu pratique pour les pipelines à longue portée.

2.4.3.4. L'analyse du point de pression

L'analyse du point de pression est une technique de détection de fuite rapide basée sur l'hypothèse que la pression dans la canalisation tombe en cas de fuite.

Cette technique nécessite des mesures continues de la pression dans des différents points le long du pipeline. En utilisant une analyse statistique de ces mesures, la présence d'une fuite est déclarée lorsque la valeur moyenne des mesures de la pression décroît au-dessous d'un seuil prédéfini.

2.4.3.5. Les méthodes statistiques

Une manière plus simple de détecter les fuites de gaz, sans la nécessité d'un modèle mathématique consiste à utiliser l'analyse statistique. Cette analyse est effectuée sur les paramètres mesurés comme la pression et le débit à plusieurs endroits le long du pipeline. Le système génère une alarme de fuite uniquement si elle se heurte à certains schémas comprenant des variations relatives de la pression et du débit.

Les seuils de fuite sont fixés après une période de réglage au cours de laquelle le paramètre de variance est analysé sous différents états de fonctionnement en absence d'une fuite. Ce processus de réglage doit être fait sur une longue période de temps est nécessaire afin de réduire les fausses alarmes.

Si une fuite est présente dans le système pendant la période, cela affectera les données initiales recueillies, le comportement du système sera considéré comme normal si les paramètres de fuite n'atteindra plus le seul considéré.

Les méthodes statistiques peuvent également estimer l'emplacement de la fuite. La technique est aussi facile à utiliser, robuste et facile à adapter à différentes configurations du pipeline. Certains des principaux inconvénients de l'utilisation de cette approche sont la difficulté dans l'estimation du volume des fuites et des coûts élevés.

2.4.3.6. Traitement des signaux numériques

Une autre façon de détecter des fuites en utilisant des mesures des autres paramètres de la conduite : le débit, la pression, ou d'utiliser un traitement de signal numérique. Pendant la phase de mise en place, la réponse fournie par le système à une variation connue du débit est mesurée.

Cette mesure est utilisée conjointement avec le traitement du signal numérique pour détecter des changements dans la réponse du système. Le traitement numérique du signal permet la réponse de fuite d'être reconnue à partir des données bruitées. Cette méthode n'a pas besoin d'un modèle mathématique, son objectif principal étant celui de l'extraction d'informations à partir des données de fuites bruyantes. Comme l'approche statistique, si au cours de la phase de mise en place d'une fuite est déjà présent dans le système, il ne sera jamais détecté à moins que sa taille augmenterait

considérablement. En outre, en plus d'avoir un coût élevé, cette technique de détection des fuites est difficile à mettre en œuvre.

2.5. Comparaison entre les techniques de détection de fuites

Le niveau de performance d'un système de détection de fuites peut être établi par une série de facteurs. Certains critères sont habituellement utilisés pour évaluer les performances des systèmes de détection de fuites et qui sont : la possibilité de déterminer l'emplacement de la fuite, la vitesse de détection et de la capacité d'estimer la taille de la fuite. Dans le tableau, nous avons résumé les caractéristiques les plus importantes offertes par chaque technique de détection étudiée, y compris également ces critères. Les abréviations suivantes ont été utilisées pour le remplissage de ce tableau: oui (Y), non (N), lent (S), moyen (M), rapide (F), faible (L) et haute (H).

En ce qui concerne la capacité de localisation des fuites, seules des techniques basées sur le bilan massique et d'analyse de point de pression. La précision de localisation aussi diffère de méthode à une autre. Certaines peuvent déterminer l'emplacement d'une fuite avec une grande précision tandis que d'autres telles que les méthodes basées sur les logiciels ne peuvent donner une des positions estimées. Dans ces cas, d'autres méthodes telles que la ligne de patrouille doivent être utilisées pour trouver la localisation exacte de la fuite.

Pour évaluer la vitesse de détection, nous avons examiné les systèmes de détection en fonction du temps. [6]

Estimation de la taille de	Localisation de fuite	Facile d'utilisation	rééquipement facile	Vitesse de détection	Coût	Caractéristiques	Méthodes de détection de fuites																	
							Inspection visuelle	dépistage du savon	Acoustique	LIDAR	Absorption de laser à diode	Radar à ondes millimétriques	Imagerie rétrodiffusion	Broad Band Absorption	Câble de fibre optique	Imagerie thermique	Imagerie multi-spectrale	Filtre à gaz Corrélation radiométrie	Câble de capteur	Surveillance du sol	Echantillonnage de vapeur	Débitmètres à ultrasons	Mass/Volume Balance	modèle transitoire en temps réel
Y	Y	Y	-	S	L																			
Y	Y	Y	-	S	L																			
Y	Y	Y	Y	F	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	M																			
Y	Y	Y	-	M	M																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	L																			
Y	Y	Y	N	F	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			
Y	Y	Y	-	M	H																			

Tableau 2.1 : Comparaison entre les difirents techniques de détection de fuites [6]

2.6. Conclusion

L'estimation de taille des fuites est disponible dans la plupart des systèmes de détection. Capteur de câble, la surveillance des sols, débitmètres à ultrasons, analyse des points de pression et de traitement de signal numérique ne possèdent pas cette capacité.

Une grande variété des techniques de détection de fuites est disponible pour les gazoducs. Certaines techniques ont été améliorées depuis leur proposition première et quelques nouveaux ont été conçus à la suite des progrès réalisés dans la fabrication de capteurs et de puissance de calcul. Cependant, chaque méthode de détection comporte ses avantages et ses inconvénients.

Les techniques de détection des fuites dans chaque catégorie partagent certains des avantages et des inconvénients. Par exemple, toutes les techniques externes qui impliquent la détection effectuée à partir de l'extérieur de la canalisation par observation visuelle ou par des détecteurs portables sont capables de détecter de très petites fuites et l'emplacement de la fuite, mais le temps de détection est très long. Les méthodes basées sur le modèle mathématique de la conduite ont de bons résultats à des débits élevés cependant pour des faibles débits le système de détection basées sur la masse serait plus approprié. Si l'on considère les coûts engendrés par l'utilisation de chaque système de détection, le résumé du tableau 2.1 montre que la plupart des techniques disponibles sont coûteux. Cet inconvénient est sujet à disparaître pour certaines de ces techniques en raison des progrès technologiques à venir.

La combinaison de plusieurs systèmes de détection de fuite est une pratique courante et également une recommandation afin de lutter contre ces inconvénients présentés.

Chapitre 03

L'influence de l'atmosphère sur la dispersion d'un gaz

3.1. La dispersion atmosphérique des nuages toxiques ou inflammables

3.1.1. Introduction

Dans les installations industrielles la plupart des accidents se produisent en raison de la perte de confinement dans le tuyau et les unités qui sont utilisées pour le transport de gaz ou liquides.

Comme ils le font dans le transport routier ou ferroviaire de ces substances, la plupart de ces substances ont une menace pour la santé et l'environnement. Clairement, si la substance libérée peut donner lieu à un nuage gazeux ou de vapeur, la prédiction de son évolution est une question importante. Prévoir le comportement d'un rejet toxique ou inflammable donne la variation de la concentration de la substance à différents moments en fonction du temps. Ce qui permet une estimation raisonnable des effets de l'accident sur les êtres humains, sur les équipements et sur l'environnement, et fournit des informations qui sont cruciales dans la conception de mesures de sécurité et les plans d'urgence. Ce chapitre contient des informations fondamentales pour la modélisation de l'évolution du nuage gazeux ou de vapeur résultant de rejets accidentels d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc. [7]



Figure 3.1 : Dispersion atmosphérique de nuages gazeux

3.1.2. Structure de l'atmosphère

L'atmosphère est composée de différentes couches qui sont chacune dotées de propriétés particulières. Les changements de température et de pression marquent les limites entre les couches successives. L'atmosphère est partagée en trois zones :

L'atmosphère inférieure – la troposphère

L'atmosphère moyenne – la stratosphère

L'atmosphère supérieure – la mésosphère et la thermosphère

La troposphère est la couche inférieure de l'atmosphère dont l'épaisseur est d'environ 12 km. Étant donné le phénomène de la gravité, elle contient 75% de tous les gaz de toute l'atmosphère ainsi qu'une grande partie de la vapeur d'eau et de la matière. La troposphère est la partie la plus importante de l'atmosphère pour la vie de la planète parce que les régimes météorologiques et les changements climatiques y trouvent leur origine, de même que tous les vents et la circulation atmosphérique pour la diffusion de la chaleur, de l'humidité et des matières polluantes. [8]

3.1.3. Les variables atmosphériques (météorologiques)

Le terme dispersion est utilisé dans la modélisation des accidents pour décrire l'évolution d'un nuage de gaz ou de vapeurs toxiques ou inflammables dans l'atmosphère. La dispersion d'un tel nuage a lieu par diffusion et, essentiellement, transporté par le vent : le nuage se déplace dans la direction du vent, mais aussi perpendiculairement au vent, à la fois verticalement et horizontalement. Dans le cas des gaz qui sont plus lourds que l'air, la dispersion peut procéder même contre la direction du vent. Il est donc un phénomène complexe, qui, pour la modélisation mathématique, nécessite diverses hypothèses simplificatrices.

Différentes variables météorologiques influencent sur la dispersion atmosphérique des gazes. La vitesse et la direction du vent et de la turbulence atmosphérique affectent de manière significative sur la dispersion des nuages de gaz. L'humidité, la température et l'inversion thermique ont moins d'effet à une influence décisive, bien que dans des cas spécifiques. Les variables météorologiques ne sont pas constantes mais changent avec le temps, en particulier sur une base quotidienne et avec les saisons. Pour modéliser la dispersion atmosphérique d'une manière représentative, les valeurs moyennes de ces

variables sont généralement prises pour une zone donnée. Les moyennes des paramètres météorologiques sont généralement considérées comme des périodes d'une heure. Les principales variables météorologiques qui affectent la dispersion atmosphérique sont décrites dans les paragraphes suivants :

3.1.3.1. Le vent

Le vent est de l'air en mouvement, ce qui résulte essentiellement de la pression atmosphérique et la distribution de la température sur la surface de la terre. Il est fortement influencé par les caractéristiques topographiques de la zone. Îles urbaines de chaleur, les brises terre-mer, les vents de la vallée de montagne etc. Le vent a un effet d'entraînement qui conduit à la dispersion d'un nuage de gaz. Les concentrations dans un panache sont inversement proportionnelles à la vitesse du vent.

La vitesse du vent se change en fonction de la hauteur dans la couche de friction de la terre. En raison de la présence de la surface du sol, il existe une force de traînée, parallèle au sol et à l'opposé du mouvement de l'air, ce qui empêche l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et ralentit à des hauteurs près du sol en raison de l'effet de frottement de la surface de la terre. Le profil de vitesse du vent est une fonction de la rugosité de la terre et sa variation en fonction de la hauteur peut être

$$\text{exprimée en utilisant l'expression suivante : } u_1 = u_2 \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha \quad (3,1)$$

u_1 : La vitesse du vent à la hauteur z_1 .

u_2 : La vitesse du vent à la hauteur z_2 .

α : Un coefficient qui dépend de la stabilité atmosphérique et la rugosité de surface.

Classe de stabilité	α pour zone urbaine	α pour zone rurale
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.20	0.10
D	0.25	0.15
E	0.40	0.35
F	0.60	0.55

Tableau 3.1 : Valeurs du α suivant la stabilité atmosphérique

La longueur de rugosité de surface, z_0 , permet de définir l'influence de la rugosité du sol (qui dépend de l'existence d'arbres, de bâtiments, etc.) sur le profil de vitesse et de la turbulence mécanique de l'air ; cependant, z_0 ne tient pas compte des effets des grands obstacles. Le tableau présente les valeurs de z_0 de différents types de surface du sol. Habituellement, la vitesse du vent est mesurée à une hauteur de 10 m, ce qui est la valeur généralement utilisée dans les calculs de dispersion. Les rejets les plus accidentels qui peuvent donner lieu à des nuages toxiques ou inflammables se produisent à une hauteur très faible, de sorte que cette valeur est très pratique. Mais le champ de vent a de fortes turbulences, ce qui rend parfois la détermination des valeurs exactes pour la vitesse et la direction du vent difficile.

Surface du sol	z_0 (m)
eau libre (au moins 5km)	0.0002
vasières, de la neige (pas de végétation, pas d'obstacles)	0.005
terrain plat ouvert: herbe, quelques objets isolés	0.03
cultures basses : grandes obstacles occasionnels ($x/h > 20$)	0.10
hautes cultures : obstacles grande dispersés ($15 < x/h < 20$)	0.25
parc, buissons : nombreux obstacles ($x/h < 15$)	0.5
couverture régulière d'obstacles de grande taille (banlieue, forêt)	1.0
centre-ville avec des bâtiments de haute et basse hauteur	3.0

Tableau 3.2 : Rugosité de l'atmosphère suivant différentes situations

La turbulence est constituée par des tourbillons circulaires dans toutes les directions. Il est important car il améliore la dispersion. Il existe deux types :

a) turbulence mécanique : qui est générée par le vent passant devant les éléments de rugosité de la surface du sol (bâtiments, végétation) ou par l'action de cisaillement entre les couches d'air adjacentes se déplaçant à des vitesses différentes.

b) turbulence d'origine thermique : qui est générée par le chauffage ou le refroidissement de l'air à proximité de la surface du sol; dans des conditions ensoleillées, par exemple, le sol est chauffé et transfère la chaleur à l'air au-dessus, ce qui crée de grands tourbillons vers le haut - montante appelé ascendances.

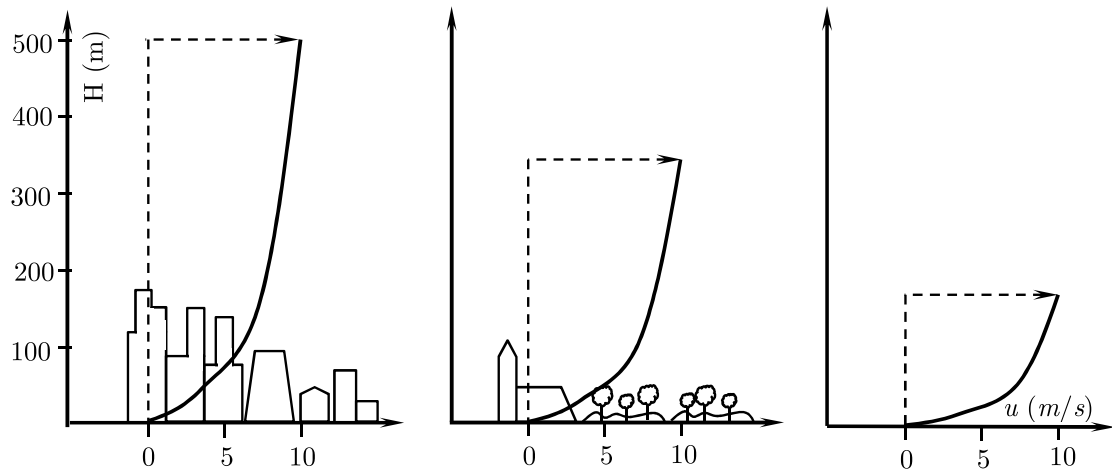


Figure 3.2 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la hauteur

3.1.3.2. Le gradient thermique vertical

Dans l'atmosphère, la température de l'air diminue généralement avec l'altitude, si une parcelle d'air monte à travers l'atmosphère (en raison de turbulences mécaniques par exemple), il fera l'objet d'un processus d'expansion, la pression diminue avec altitude. Si ce processus est supposé être adiabatique, la température de l'air à l'intérieur de la parcelle diminuera (refroidissement adiabatique), car il dépense de l'énergie à l'expansion par rapport à ses environs. La diminution de la température en fonction de la hauteur peut être établie théoriquement pour l'air sec: l'air sec expansé adiabatique refroidit à $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ par kilomètre; ceci est appelé le gradient adiabatique.

Le gradient de température peut être différent. Lorsque le gradient atmosphérique dépasse le gradient adiabatique sec, il est dit d'être super adiabatique. Si la température de l'air est constante avec la hauteur, le gradient atmosphérique est égal à zéro et l'atmosphère est isotherme. Le gradient de la température atmosphérique est très important car il établit la capacité de l'atmosphère à disperser librement.

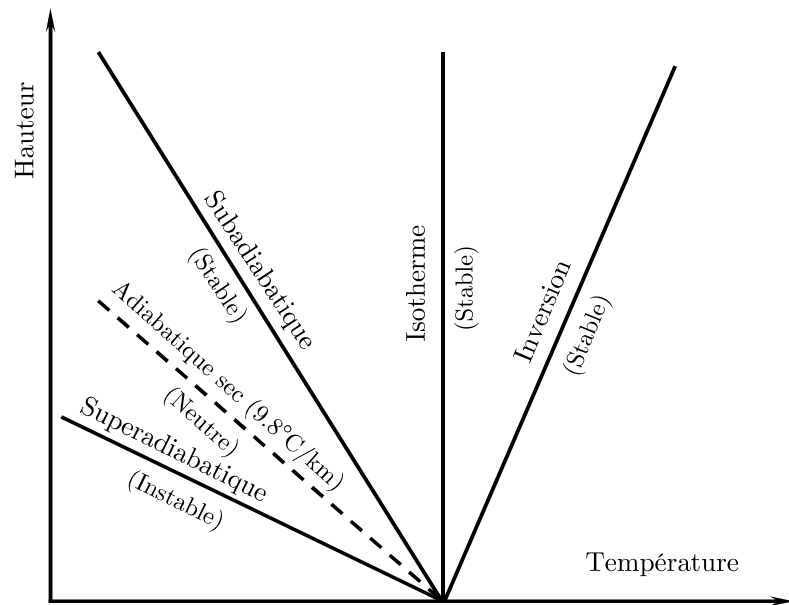


Figure 3.3 : Le gradient thermique suivant la stabilité de l'atmosphère

Enfin, dans certaines circonstances, la température de l'atmosphère augmente avec la hauteur, le taux de défaillance étant donc positive; c'est-à-dire à une certaine hauteur, la température est supérieure à celle de l'air ci-dessous. Ceci est appelé inversion thermique.

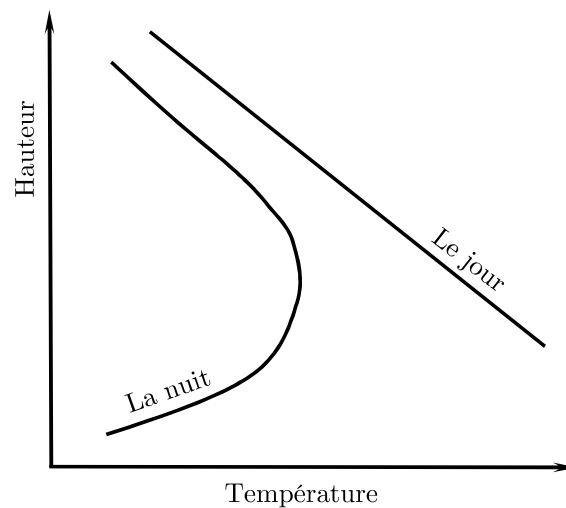


Figure 3.4 : Distribution typique de la température d'air en fonction de l'altitude durant le jour et la nuit

Du point de vue de la dispersion atmosphérique des gaz l'inversion est un phénomène très important, car il empêche la dispersion verticale et maintient toute libération dans les couches inférieures de l'atmosphère.

3.1.3.3. La stabilité atmosphérique

La stabilité atmosphérique : est la tendance de l'atmosphère à augmenter (instabilité) ou diminuer (stabilité) le déplacement vertical de l'air par l'origine des causes mécaniques (comme le vent). Elle est fonction du profil de température et elle est étroitement liée à la capacité de l'atmosphère à disperser les polluants.

La stabilité atmosphérique : est une estimation de l'état de l'atmosphère qui ne peut pas être mesurée directement comme la température ou la pression. La stabilité est généralement estimée en fonction de la vitesse du vent et le rayonnement solaire.

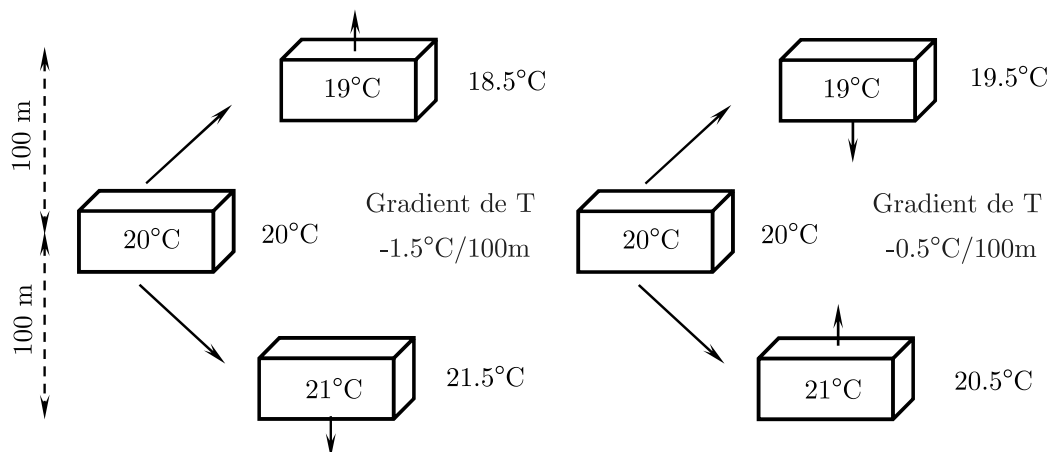


Figure 3.5 : Le mouvement de l'air dans des atmosphères instables et stables

Atmosphère instable : est caractérisée par l'existence d'un déplacement vertical significatif de l'air, un gradient vertical de température négatif (la température diminue avec l'altitude), les fluctuations fréquentes dans la direction du vent et le rayonnement solaire sont fortes.

Atmosphère stable : implique un écoulement laminaire des couches d'air (faible turbulence), gradient vertical de température positive (inversion thermique), fluctuations limitées dans la direction du vent et un peu de rayonnement solaire.

Du point de vue de la stabilité, les conditions atmosphériques sont classées conformément aux six (ou parfois sept) différentes classes de stabilité. Il y a plusieurs façons d'estimer la classe de stabilité, des principales variables météorologiques (ceci est valable pour une estimation de la stabilité sur le sol, mais pas sur la surface de la mer) ; en fonction du gradient thermique vertical, en fonction des fluctuations de la direction du vent, ou en fonction du rayonnement solaire et la vitesse du vent. [7]

Classe de stabilité	Définition
A	extrêmement instable
B	modérément instable
C	légèrement instable
D	neutre
E	légèrement stable
F	modérément stable
G	très stable

Tableau 3.3 : Définition de classes de stabilité

Estimation de la classe de la stabilité

Classe de stabilité	Gradient thermique vertical (°C/100m)
A	< -1.9 °C
B	De -1.9 °C jusqu'à -1.7 °C
C	De -1.7 °C jusqu'à -1.5 °C
D	De -1.5 °C jusqu'à -0.5 °C
E	De -0.5 °C jusqu'à 1.5 °C
F	> 1.5 °C

Tableau 3.4 : La classe de stabilité en fonction du gradient vertical de température

Classe de stabilité	Variation horizontale de direction du vent (°)
A	25
B	20
C	15
D	10
E	5
F	2.5

Tableau 3.5 : La classe de stabilité en fonction de la direction de fluctuations du vent

Vitesse du vent de surface (m/s)	Rayonnement solaire (Le jour)			Nébulosité (La nuit)	
	forte	modéré	Faible	> 50%	< 50%
< 2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	C	D	D	D

Tableau 3.6 : Classe de stabilité en fonction de vitesse (vent) et rayonnement solaire.

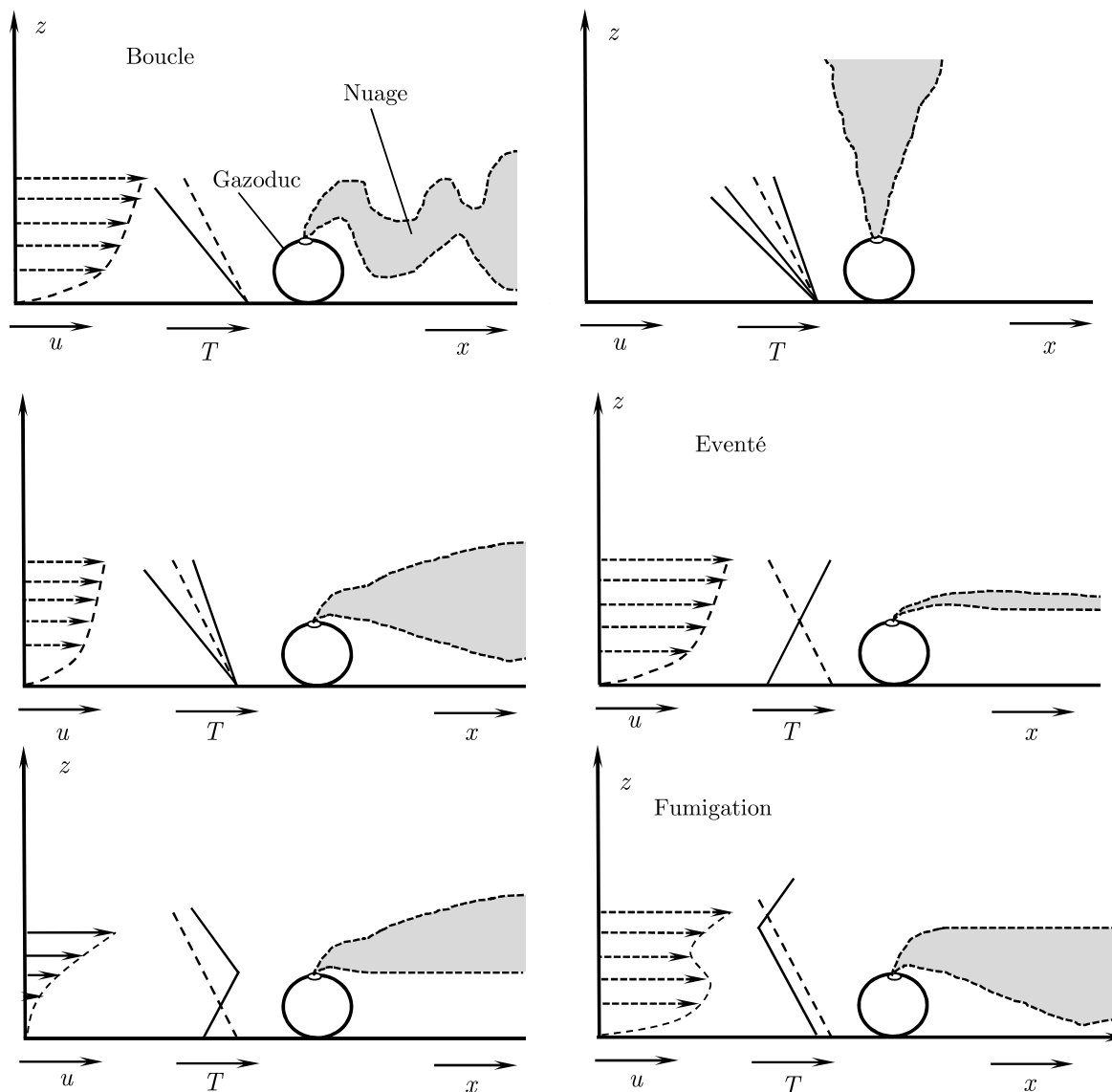


Figure 3.6 : Le gradient thermique et le comportement des panaches continus

3.1.3.4. L'inversion thermique

L'air le plus chaud est normalement le plus près du sol, mais quand il se trouve au-dessus d'une couche d'air plus froid (plus lourd) on dit qu'il y a une inversion de température. Dans ce cas, la masse d'air qui se trouve près du sol (plus froid et plus lourd) ne peut s'élever et se disperser dans l'atmosphère.

Cela peut se produire quand le sol se refroidit rapidement par perte de rayonnement infrarouge pendant une nuit claire et calme. Cela peut se produire aussi lorsqu'une couche d'air chaud provenant du sud est transportée au-dessus d'une couche d'air plus froid des latitudes moyennes. Dans tous les cas, le résultat est une masse d'air froid piégée sous une masse d'air plus chaud. Le phénomène d'inversion peut durer de quelques heures à plusieurs jours, voire des semaines.

L'inversion de température est un phénomène naturel qui habituellement n'engendre pas de conséquences néfastes. Cependant, si une inversion se produit dans une grande ville polluée, cela peut avoir des effets désastreux. Dans ce cas, les substances polluantes sont piégées et s'accumulent sous l'inversion, car il n'y a pas de brassage vertical. [9]

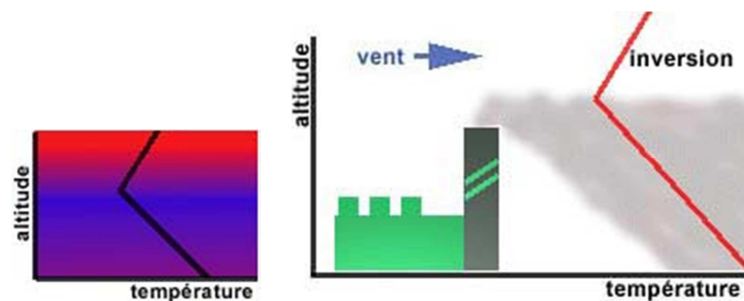


Figure 3.7 : Description d'une inversion thermique

Il arrive parfois que la température de l'air diminue avec l'altitude près du sol mais augmente avec l'altitude plus haute.

Dans ce cas, le comportement de la traînée de fumée dépend de la hauteur à laquelle se produit l'inversion.

Dans la figure ci-dessous, la cheminée se trouve sous la couche d'inversion de température. La fumée qui s'échappe de la cheminée est freinée par la couche d'air chaud et stable en altitude et se rabat vers le sol.

3.1.3.5. L'humidité relative

l'humidité de l'air a une influence significative sur la dispersion du polluant seulement s'il y a une réaction entre la vapeur de ce polluant et l'eau contenue dans l'atmosphère (comme dans le cas du fluorure d'hydrogène) également l'humidité a un autre effet si le gaz qui est dispersé est à une température inférieure à l'atmosphère : dans ce cas , le taux d'humidité modifie l'équilibre thermique de la masse d'air et de gaz et peut donner lieu à l'condensation d'eau . Les nuages froids de gaz de pétrole liquéfié, par exemple, sont de couleur blanche en raison de la condensation et l'entraînement de gouttelettes d'eau. [7]



Figure 3.8 : Dispersion d'un nuage humide

3.1.3.6. Unités de mesure de la dispersion

En ce qui concerne la concentration du gaz ou de vapeur dans l'air, les types d'unités de remorquage sont généralement utilisés : *ppm* (parties par million en volume ou ml/m^3) et mg/m^3 . Pour convertir *ppm* en mg/m^3 (à une température T) on a :

$$C_{(ppm)} = \frac{22.4}{M_w} \frac{T}{273} \frac{1}{P} C_{(mg/m^3)} \quad (3,2)$$

M_w : La masse molaire du gaz en $kg / kmol$.

P : La pression en bar .

T : La vitesse du vent à la hauteur en K . [7]

3.2. Processus de dispersion d'un nuage de gaz

3.2.1. Introduction

Différents phénomènes sont responsables du transport du gaz dans l'atmosphère. Cette matière peut être transportée par le mouvement de l'air (transport convectif), ou par diffusion de zones concentrées vers des zones de concentrations plus faibles (transport diffusif) ou par d'autres phénomènes. L'advection est toujours associée à un mouvement macroscopique des particules fluides. C'est très différent de la diffusion qui elle, est un mouvement microscopique à l'échelle des atomes et des molécules. D'où une intensité de transfert beaucoup plus importante pour l'advection que pour la diffusion. [10]

3.2.2. Phénomène d'Advection

L'advection correspond au transport d'une propriété telle que l'humidité, la température, la pollution, par un fluide, tel que l'air ou l'eau, en général selon un mouvement à dominante horizontal. Un exemple est le transport des fumées dégagées d'une usine à l'aide de l'air (vent). L'advection est due au mouvement de l'air, qui disperse le polluant. Ce phénomène est un phénomène macroscopique (mélange de masses d'air).

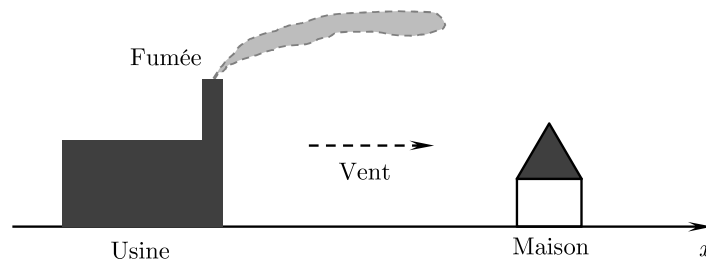


Figure 3.9 : Processus de l'advection

3.2.3. Phénomène de la Diffusion

Un processus de transport fondamental dans la mécanique des fluides environnementale est la diffusion. La diffusion est un phénomène microscopique qui désigne la tendance naturelle d'un système à rendre homogène les concentrations des espèces chimiques en son sein. Elle se diffère de l'advection parce qu'elle est un processus aléatoire dans la nature (ne suit pas nécessairement une particule

fluide). Un exemple connu est la diffusion d'un parfum dans une chambre vide. Si une bouteille de parfum est ouverte et laissée évaporer dans l'air, rapidement on va sentir ce parfum dans la chambre entière. Ainsi, La diffusion a deux principales propriétés : elle est aléatoire dans la nature, et le transport se fait des régions de fortes concentrations vers les faibles concentrations. On sait aussi par expérience que l'odeur sera plus forte près de la source et de moins en moins forte en éloignant.

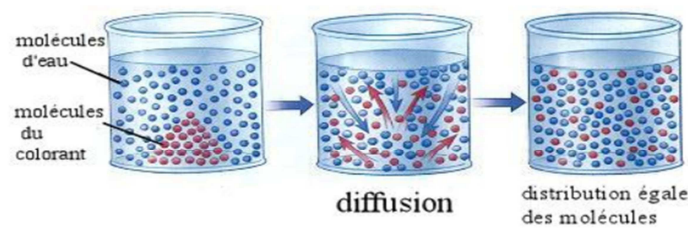


Figure 3.10 : Processus de la diffusion

La diffusion est le mécanisme de transport de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration, depuis les zones concentrées en matière vers les zones moins concentrées.

La diffusion est aussi le processus pour lequel une substance est déplacée d'un endroit à un autre sous l'action de fluctuations aléatoires. Au niveau de la turbulence, il est l'advection par les tourbillons du fluide porteur.

Considérons le système à deux milieux (la figure 3.11), et le flux fluctuant compensé par un anti flux de même grandeur dans la direction opposée.

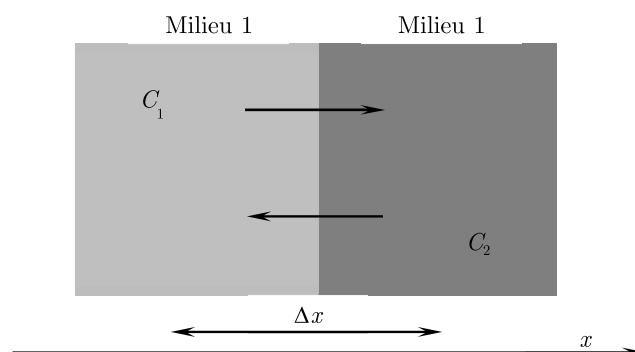


Figure 3.11 : Schéma expliquant le flux de diffusion

La loi de Fick : décrit ce phénomène en énonçant que le flux de matière, j , est proportionnel au gradient de concentration par l'intermédiaire du coefficient de diffusivité, k

$$\text{Le flux de matière : } j = u_i \cdot c = -k \frac{\partial c}{\partial x_i}. \quad (3,3)$$

3.2.4. La différence entre l'advection et la diffusion

Les deux processus advection et diffusion déplacent le gaz d'un endroit à un autre, mais chacun accomplit les choses différemment, la différence essentielle est :

- L'advection va dans un sens (en aval).
- La diffusion va dans les deux sens (indépendamment du sens du courant).

3.3. Les modèles de dispersion

Les Modèles de dispersion sont des ensembles d'équations mathématiques qui permettent, pour un scénario donné, la prédiction d'évolution d'un nuage du gaz en fonction de sa position et le temps.

Un aspect important est la durée de la libération du gaz en fonction du temps au cours de laquelle la libération a lieu, les émissions peuvent être classés en catégories de remorquage en : Rejets continus et instantanés.

Plusieurs critères différents sont utilisés pour déterminer si une libération est instantanée ou continue, par exemple :

- Une émission instantanée : lorsque le temps nécessaire au nuage pour atteindre une localisation donnée est plus longue que la durée de la libération. un exemple serait l'explosion du réservoir contenant un gaz sous pression;
- Émission continue: lorsque la durée de la libération est plus long que le temps requis par le nuage pour atteindre un endroit donné. un exemple serait le panache d'une pile.

Ou bien :

- Émission instantanée: lorsque la substance échappée dans l'atmosphère en moins d'une minute.
- Émission continue: lorsque la substance échappée pendant plus d'une minute.

Dans la pratique, la différence entre les émissions continues et instantanées est relativement arbitraires et subjectives, en effet, la plupart des émissions montrerait un comportement intermédiaire : le cours de la libération est fini, un état stationnaire est atteint au cours d'une certaine période de temps et enfin la dispersion des nuages.

L'émission instantanée du gaz donne forme un nuage (Bouffée) qui se déplace avec le vent alors qu'il se disperse dans l'atmosphère. En prenant la surface correspondant à une concentration donnée, le volume entouré par celui-ci diminue à mesure que les bouffées se déplacent du point de rejet, en conséquence, le volume du nuage (y compris les plus faibles concentrations extérieures) augmente à mesure que les bouffées se déplacent avec le vent.

3.3.1. Dispersion de gaz selon modèle de « panache »

La dispersion du gaz naturel selon le modèle de panache est causé par une génération continue du gaz traversant l'orifice (trou de la fuite) de gazoduc, c'est-à-dire, dans un intervalle de temps, à l'instant $t = 0$: on a une concentration primale du gaz qui va se varier en fonction du temps et de la position spatiale, si on suppose qu'on a un champ horizontal de vitesse du vent alors la dispersion se fera horizontalement par l'effet du vent (advection) et de diffusion, et verticalement par l'effet de la diffusion. La continuité de génération du gaz affirme que le nuage échappé prend une forme de panache. Pour ce fait elle prend l'appellation « panache ».

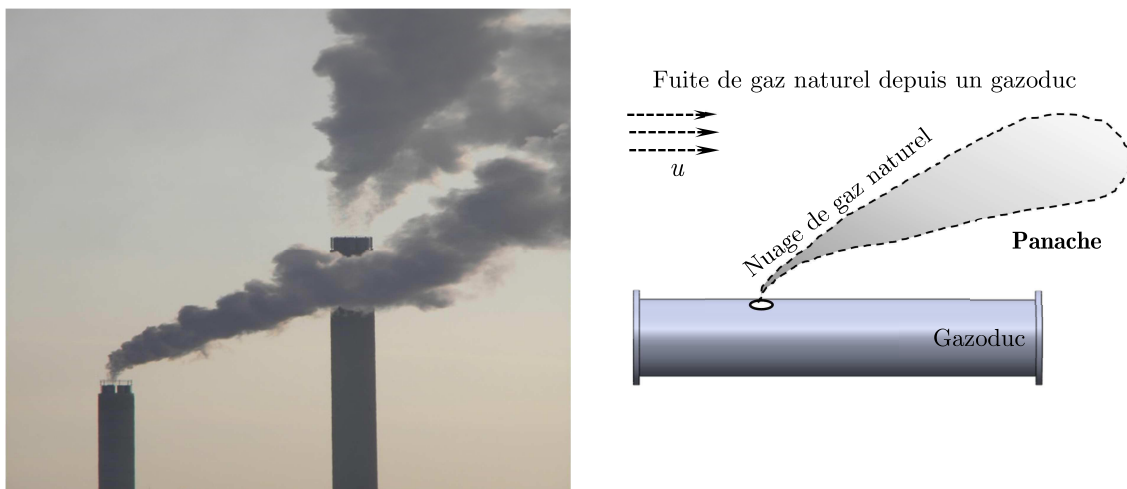


Figure 3.12 : Modèle de panache

La stabilité atmosphérique influe sur la dispersion du panache

- Des conditions stables dispersent peu du panache.
- Des conditions instables dispersent fortement du panache.

3.3.2. Dispersion sous forme d'une « Bouffée »

Un rejet accidentel instantané du gaz (éclatement d'un bac, sphère de stockage), va se produire un nuage qui va se déplacer dans l'atmosphère.

Ce nuage n'est plus en relation avec la source de génération de gaz, et sa dispersion dans l'atmosphère par l'effet du vent et de la diffusion produit une forme de « bouffée ». Alors la dispersion de bouffée est considérée non-stationnaire de fait que la concentration varie selon le temps et la position spatiale.

Dans le cas de fuite de gaz naturel dans un gazoduc, selon le modèle de bouffée on peut considérer une bouffée de gaz naturel à une telle position de l'espace à la fin de déchargement de tous le gaz qui contient le gazoduc.

Remarque

Les fuites de gaz peuvent se comporter d'une manière très variable, à la fois spatialement et temporellement, même dans des conditions contrôlées telles que la nôtre.

La distribution de la concentration de gaz naturel déchargée depuis une fuite dans un gazoduc, peut être considérée analogue à celle de fumée déchargée depuis des cheminées mais à des hauteurs plus faible si le plan de rejet est horizontal.

La figure montre une fuite de fumée qui est analogue à celle de fuite de gaz naturel dans un gazoduc ou n'importe quelle enceinte :

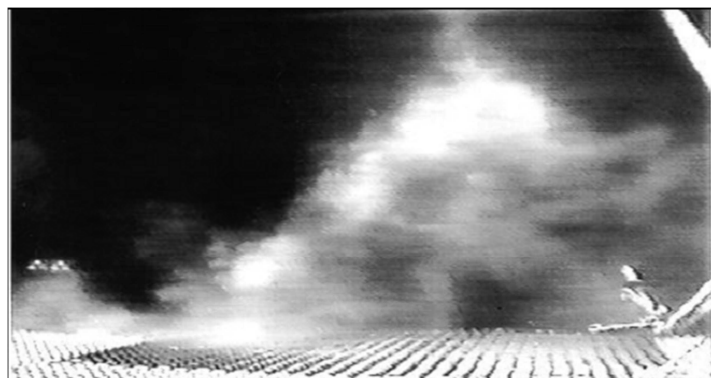


Figure 3.13 : Fuite de fumée utilisée comme un analogue de gaz naturel, présentant une concentration de fumée dans l'espace.

Chapitre 04

Le Taux de fuite de gaz naturel dans un gazoduc

4.1. Propriétés du gaz naturel

4.1.1. Généralités sur le Gaz Naturel

Le gaz naturel est un combustible fossile constitué d'un mélange d'hydrocarbures gazeux, dont le méthane (CH_4) est l'un de principaux composants.

Le gaz naturel à son état original se compose principalement du méthane, il peut contenir des proportions faibles de l'éthane et des proportions assez faibles de propane et du butane et pentane, on trouve parfois aussi parmi ses composant des traces des constituants non énergétiques comme l'azote, et le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène et même de l'eau.

Le gaz naturel a des propriétés physiques pour le calcul hydraulique pendant l'opération de transport par gazoducs, donc il est nécessaire de connaître ses propriétés.

Parmi les propriétés du gaz naturel les grandeurs suivantes :

propriétés	symbole
La masse volumique	ρ
Le volume massique	v_s
La densité relative	d
La viscosité cinématique	μ
La viscosité dynamique	η
Le facteur de compressibilité	Z

Ces paramètre son déterminer à partir de sa composition.

Dans notre travail on va supposer que l'écoulement de gaz naturel est isotherme d'où on supposera la température moyenne de ce gaz, on la symbolise par : T_{moy} .

4.1.2. Calcul de quelques paramètres du gaz naturel

On a déjà énoncé que le gaz naturel est un mélange de composant gazeux, alors pour certain calcul on va introduire les fractions gazeuses de chaque composant y_i dont $i = 1, 2, \dots, n$, est un indice qui indique l'ordre de composant dans le calcul.

4.1.2.1. Calcul de la masse molaire M_g

$$M_g = \sum_{i=1}^n y_i \times M_i \quad \text{en : } kg \quad (4.1)$$

M_i : La masse molaire de chaque composant.

4.1.2.2. Calcul de la température pseudo-critique : T_{pc}

$$T_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i \times T_{c_i} \quad \text{en : } ^\circ C \quad (4.2)$$

T_{c_i} : La température critique de chaque composant.

4.1.2.3. Calcul de la pression pseudo-critique : P_{pc}

$$P_{pc} = \sum_{i=1}^n y_i \times P_{c_i} \quad \text{en : } pa \quad (4.3)$$

P_{c_i} : La pression critique de chaque composant.

4.1.2.4. Calcul de la température et la pression pseudo-réduite : T_{pr} et P_{pr}

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}, \quad P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (4.4)$$

T et P : sont la température et la pression du gaz.

Correction des valeurs :

Pour le calcul de la pression pseudo-critique et de la température pseudo-critique on a considéré que le gaz naturel est constitué seulement des hydrocarbures, cependant dans le cas réel ce gaz contient des composants non hydrocarbures comme le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène qui influent sur ses propriétés. Donc il est bien nécessaire de corriger les valeurs de la température et la pression pseudo-critique pour mieux adapter avec le cas réel.

On introduit pour notre correction un facteur qui s'appelle : le facteur d'ajustement ε sa formule est donnée par :

$$\varepsilon = 120 \left(A^{0.9} - A^{1.6} \right) + 15 \left(B^{0.5} - B^4 \right) \quad (4.5)$$

ε : Facteur d'ajustement.

A : La somme de la fraction molaire de CO_2 et de H_2S .

B : La fraction molaire de H_2S .

D'où la température et la pression pseudo-critique corrigées sont :

$$T'_{pc} = T_{pc} - \varepsilon \text{ en } ^\circ R \quad \text{et} \quad P'_{pc} = \frac{P_{pc} \times T'_{pc}}{T_{pc} + B(1 - B)\varepsilon} \quad (4.6)$$

Et la température et la pression pseudo-réduite sont :

$$T'_{pr} = \frac{T}{T'_{pc}} \quad \text{et} \quad P'_{pr} = \frac{P}{P'_{pc}} \quad (4.7)$$

L'indice « ' » indique que les valeurs sont corrigées.

4.1.2.5. Calcul de facteur de compressibilité : Z

A. Méthode graphique :

A l'aide de la courbe de Standing-Katz on peut estimer la valeur de Z en introduisant les valeurs de T_r et P_r déjà calculées.

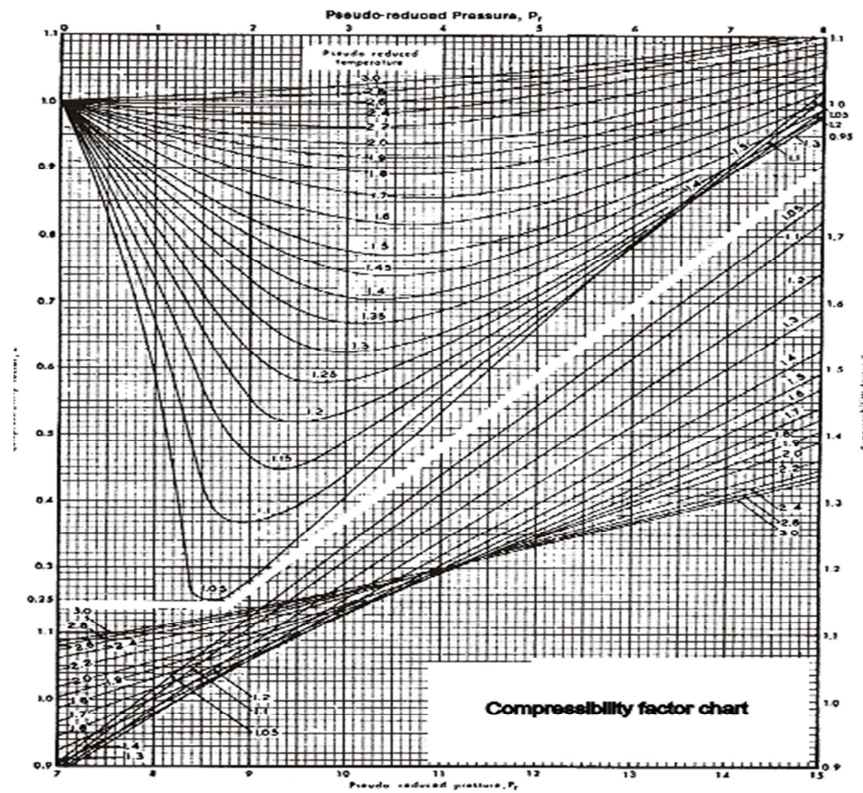


Figure 4.1 : Diagramme de standing-Katz pour le calcul de Z

B. Formule de : « California Naturel Gas »

La formule de calcul du facteur Z « California Naturel Gas » est utilisée quand on sait la température moyenne et la pression moyenne du gaz et elle valable pour une pression moyenne du gaz supérieur à 100 *psig*, et pour une pression moyenne inférieure à 100 *psig* alors on peut considérer que le facteur de compressibilité $Z = 1$.

Et voici la formule de « California Naturel Gas »

$$Z = \left[1 + \frac{P_{moy} \times 344400 \times 10^{1.785 \times d}}{T_{moy}^{3.825}} \right]^{-1} \quad (4.8)$$

T_{moy} : La température moyenne du gaz naturel en $^{\circ}R$;

P_{moy} : La pression moyenne du gaz naturel en *psig* ;

d : La densité relative du gaz naturel est calculée par : $d = M_g / 29$.

Pour le calcul de la pression moyenne :

Dans un gazoduc la pression varie le long du pipe, alors le facteur de compressibilité aussi varie. Donc on peut définir une valeur de Z pour une pression moyenne par exemple pour : $P_{moy} = (P_1 + P_2) / 2$, mais la formule qui convient permet de calculer une valeur de P_{moy} plus correcte que la moyenne arithmétique :

$$P_{moy} = \frac{2}{3} \left(P_1 + P_2 - \frac{P_1 \times P_2}{P_1 + P_2} \right) = \frac{2}{3} \left(\frac{P_1^3 - P_2^3}{P_1^2 - P_2^2} \right) \quad (4.9)$$

4.1.2.6. Calcul de la viscosité du gaz :

La viscosité dynamique :

$$\eta = (0.0316T_{moy} + 0.0175P_{moy} + 1.63) \times 10^{-6} \text{ en : } kg / m.s \quad (4.10)$$

η : La viscosité dynamique.

T_{moy} : La température moyenne en K ;

P_{moy} : La pression moyenne en *bar* .

4.1.2.7. Calcul de la masse volumique du gaz :

$$\rho = \frac{P}{ZrT} \text{ en : } kg / m^3 \quad \text{Avec : } r = \frac{R}{M_g} \quad (4.11)$$

R : La constante des gaz parfait = $8314 J / kmol.K$. [11]

4.2. Calcul de Taux de fuite

4.2.1. Définition de taux de fuite

Le taux de fuite d'un récipient ou d'une partie d'installation mesure la quantité de matière perdue par unité de temps.

Un taux de fuite surfacique mesure la quantité de matière perdue par unité de temps, et par unité de surface. Le taux de fuite global est alors le taux de fuite surfacique, multiplié par la surface concernée.

Le taux de fuite alors est le débit de gaz à travers l'orifice.

4.2.2. Le bilan énergétique d'un écoulement dans un petit orifice

On s'intéresse au cas où l'orifice avec lequel on aura une décharge de gaz est obtenu d'une fissuration au niveau d'un gazoduc ou une conduite transportant du gaz ou de la vapeur. On peut supposer que l'orifice est petit et son diamètre est inférieur à 20 mm.

Le schéma qui convient traduit ce qu'on a dit :

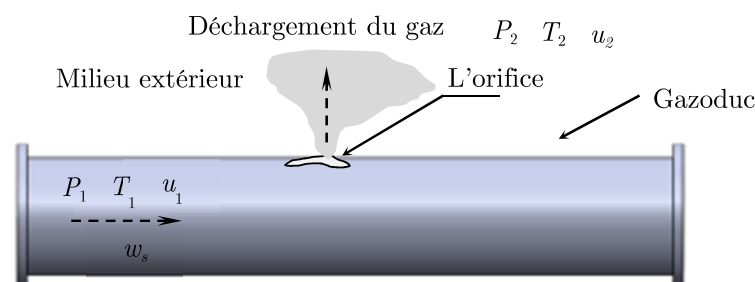


Figure 4.2 : Fuite de gaz naturel dans un gazoduc

Le percement existant dans la paroi de la conduite peut être considéré comme indique la figure ci-dessous :

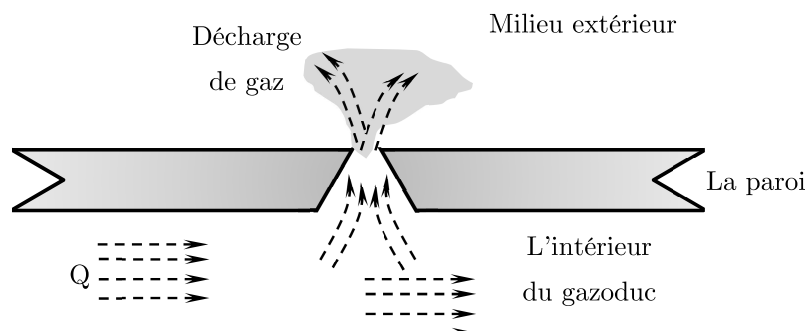


Figure 4.3 : Ecoulement de gaz déchargé à travers de l'orifice

Le but est de calculer le débit massique du gaz déchargé à l'atmosphère libre d'une fuite dans un gazoduc. Autrement dit on cherche à calculer le débit du gaz à travers un orifice, et puisque le débit du gaz dans le gazoduc est élevé on peut également supposer que l'écoulement est isentropique à travers de l'orifice, et qu'un écoulement adiabatique le long du gazoduc. [12]

Le bilan énergétique d'un écoulement du gaz dans une conduite est le suivant :

Pour un transport d'un volume élémentaire du gaz on a :

$$-dQ + dW_s + dH + d\left(\frac{u^2}{2}\right) + g dz = 0 \quad (4.12)$$

Q : La chaleur dégagée. J / kgK

W_s : Le travail extérieur. J / kgK

H : L'enthalpie. J / kgK

u : La vitesse du gaz. m / s

z : La hauteur. m

$$D'autre part on a : dH = dQ + dF + v dP \quad (4.13)$$

F : L'énergie mécanique. J / kgK

v : Le volume spécifique. m^3 / kg

En introduisant l'équation (4.13) dans (4.12)

$$dW_s + dF + v dP + d\left(\frac{u^2}{2}\right) + g dz = 0 \quad (4.14)$$

On va considérer dans ce cas-là que le travail extérieur est nul alors

$$v dP + dF + d\left(\frac{u^2}{2}\right) + g dz = 0 \quad (5.15)$$

En intégrant l'équation (5.15) entre les deux positions 1 et 2

$$\int_{P_1}^{P_2} v dP + \int_F dF + \int_{\Delta u^2} d\left(\frac{u^2}{2}\right) + \int_{\Delta z} g dz = 0 \quad (4.16)$$

$$\int_{P_1}^{P_2} v dP + F + \Delta\left(\frac{u^2}{2}\right) + g \Delta z = 0 \quad (4.17)$$

1. Expansion isentropique : On a : $P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma$ donc :

$$\begin{aligned}
\int_{P_1}^{P_2} v dP &= \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{P_1 v_1}{P} \right)^{\frac{1}{\gamma}} dP = P_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1 \int_{P_1}^{P_2} P^{-\frac{1}{\gamma}} dP = P_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[P^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]_{P_1}^{P_2} = P_1^{\frac{1}{\gamma}} v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[P_2^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - P_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \\
&= P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]
\end{aligned} \tag{4.18}$$

En remplaçant dans l'équation (4.17) et en tirant la valeur de la vitesse :

$$P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] + F + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + g \Delta z = 0 \tag{4.19}$$

$$\Delta(u^2) = -2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] - 2F - 2g \Delta z \tag{4.20}$$

$$u_2^2 - u_1^2 = -2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] - 2F - 2g \Delta z \tag{4.21}$$

$$u_2 = \sqrt{u_1^2 - 2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] - 2F - 2g \Delta z} \tag{4.22}$$

On considère la vitesse u_1 est négligeable devant u_2 alors et que $F = 0$

$$u_2 = \sqrt{2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] - 2g \Delta z} \tag{4.23}$$

En introduisant un coefficient de décharge C_d dans l'équation (4.23) :

$$u_2 = C_d \sqrt{2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] - 2g \Delta z} \tag{4.24}$$

Pour un écoulement horizontal on a :

$$u_2 = C_d \sqrt{2P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \tag{4.25}$$

2. Expansion isotherme : Pour un écoulement isotherme on a : $P_1 v_1 = P_2 v_2$ en remplaçant dans le bilan énergétique (4.17) :

$$\int_{P_1}^{P_2} v dP = \int_{P_1}^{P_2} \frac{P_1 v_1}{P} dP = P_1 v_1 \int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = P_1 v_1 [\ln P]_{P_1}^{P_2} = P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.26)$$

Alors on a :

$$P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) + F + \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) + g \Delta z = 0 \quad (4.27)$$

$$P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = -F - \Delta \left(\frac{u^2}{2} \right) - g \Delta z \quad (4.28)$$

Pour un écoulement horizontal on aura :

$$\Delta(u^2) = -P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.29)$$

$$u_2^2 - u_1^2 = -P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (4.30)$$

En prenant les mêmes hypothèses que l'écoulement adiabatique on obtient :

$$u_2 = \sqrt{P_1 v_1 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)} \quad (4.31)$$

4.2.3. Le débit massique du gaz à travers l'orifice

$$Q_m = \rho u A \quad (4.32)$$

A : La section de l'orifice. $[m^2]$

Pour une expansion isentropique du gaz :

$$Q_m = \rho_2 u_2 A = \rho_2 C_d A \sqrt{2 P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

Pour un écoulement isentropique : $\rho_2 = \rho_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$

$$Q_m = \rho_2 u_2 = \frac{1}{v_1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} C_d A \sqrt{2 P_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} = C_d A \sqrt{2 \frac{P_1 v_1}{v_1^2} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}$$

$$Q_m = C_d A \sqrt{\frac{2 P_1}{v_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4.33)$$

4.2.4. Le débit massique dans le cas d'un écoulement critique

On considère que l'écoulement du gaz est critique alors il correspond à une valeur maximale du débit à travers de l'orifice. [13]

On pose: $x = P_2 / P_1$ dans (4.33) alors on cherche la valeur de x pour avoir un débit maximal à travers de l'orifice :

$$Q_m(x) = C_d A \sqrt{\frac{2P_1}{v_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(x\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(x\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (4.34)$$

On calcule $\frac{dQ_m(x)}{dx}$ pour avoir le maximum donc

$$\frac{dQ_m(x)}{dx} = C_d A \frac{P_1}{v_1} \frac{x^{\frac{1}{\gamma}} \left(\frac{2}{\gamma-1} x^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right)}{\sqrt{\frac{2P_1}{v_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(x\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(x\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]}} \quad (4.35)$$

D'après la formule (4.42) de la dérivée il est clair que $\max Q_m(x)$ correspond à la valeur de x vérifiant l'équation $\frac{2}{\gamma-1} x^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} - \frac{\gamma+1}{\gamma-1} = 0$ donc $x = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}$ ou bien

$x = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ en remplaçant la valeur de x trouvée dans (4.34) on obtient :

$$(Q_m)_{\max} = C_d A \sqrt{\frac{2P_1}{v_1} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}} - \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]} \quad (4.36)$$

$$(Q_m)_{\max} = C_d A P_1 \sqrt{\frac{\gamma M g}{R T_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4.37)$$

On prend l'expression qui représente un écoulement critique suivante :

$$Q_{choked} = C_d A P_1 \sqrt{\frac{\gamma M g}{R T_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (5.38)$$

4.2.5. Taux de fuite selon les régimes d'écoulement [13]

1. Le nombre de Mach

$$Ma = \frac{u}{c} \quad (4.39)$$

Ma : Le nombre de Mach.

$$c : \text{La vitesse du son dans le fluide : } c = \sqrt{\gamma r T} \cdot [m / s] \quad (4.40)$$

Si $Ma < 1$ on a : écoulement subsonique.

Si $Ma = 1$ on a : écoulement sonique.

Si $Ma > 1$ on a : écoulement supersonique.

2. Discussion

Calcul de la pression « choked »

$$\text{Suivant la relation : } P_{choked} = P_1 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4.41)$$

Calcul de taux de fuite dans un gazoduc

Si : $P_2 \leq P_{choked}$ on va considérer que l'écoulement est sonique (ou supersonique) et dépend seulement de P_1 et la formule de débit de fuite utilisée est la suivante :

$$Q_{choked} = C_d A P_1 \sqrt{\frac{\gamma M g}{R T_1} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}}$$

Si non si : $P_2 > P_{choked}$ on va considérer que l'écoulement est subsonique et la formule de débit de fuite utilisée est la suivante :

$$Q_m = C_d A P_1 \sqrt{\frac{M g}{R T_1} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]}$$

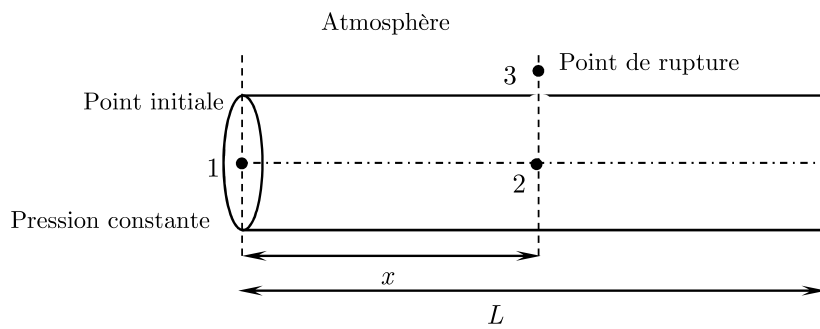


Figure 4.4 : Ecoulement de gaz déchargé à travers l'orifice [22]

Pour calculer le taux de fuite dans la position (3) il faut avoir la valeur de la pression dans la position (2). [12]

On peut avoir la valeur de la pression à n'importe quelle position en utilisant la formule suivante :

$$P(x) = \sqrt{P_1^2 - \frac{x}{L}(P_1^2 - P_2^2)} \quad (4.42)$$

P_1, P_2 : La pression aux positions 1 et 2 respectivement.

x : Une distance aléatoire de la conduite considérée.

L : La longueur du tronçon de la conduite considérée.

On a : $0 \leq x \leq L$.

4.3. Résultats et discussion

4.3.1. Les caractéristiques du gaz naturel

4.3.1.1. Composition chimique du gaz naturel considéré

On va considérer pour notre calcul un gaz naturel écoulant dans le gazoduc reliant Hassi-Rmel et Bordj-Mnail GG1-42''.

L'analyse chimique du gaz naturel au laboratoire a montré que le gaz naturel pour le mois de janvier à la composition chimique suivante :

Date	N _i	CO _i	C _i	C _i	C _i	IC _i	NC _i	IC _i	NC _i	C _i +	PCS	T.Eau	Densité
01/01/2016	5,70	0,21	83,83	7,44	1,85	0,25	0,40	0,09	0,10	0,13	9343	0	0,651
02/01/2016	5,58	0,21	83,88	7,47	1,87	0,26	0,41	0,09	0,10	0,13	9363	0	0,651
03/01/2016	5,57	0,21	83,79	7,63	1,85	0,25	0,40	0,09	0,10	0,11	9362	0	0,651
04/01/2016	5,64	0,21	83,79	7,52	1,87	0,26	0,42	0,08	0,09	0,12	9355	30	0,651
05/01/2016	5,56	0,21	83,87	7,49	1,91	0,24	0,40	0,09	0,10	0,12	9364	0	0,651
06/01/2016	5,69	0,21	83,75	7,51	1,87	0,26	0,41	0,09	0,10	0,11	9349	34	0,651
07/01/2016	5,84	0,21	83,66	7,46	1,86	0,26	0,41	0,09	0,10	0,11	9331	30	0,652
08/01/2016	5,69	0,21	83,77	7,48	1,87	0,25	0,41	0,09	0,10	0,13	9352	28	0,651
09/01/2016	5,47	0,21	83,91	7,51	1,89	0,26	0,42	0,10	0,11	0,12	9382	26	0,651
10/01/2016	5,54	0,21	83,71	7,63	1,91	0,27	0,41	0,09	0,10	0,13	9385	29	0,652
11/01/2016	5,58	0,21	83,89	7,45	1,87	0,26	0,42	0,09	0,10	0,13	9363	29	0,651
12/01/2016	5,56	0,21	83,78	7,49	1,90	0,26	0,43	0,10	0,11	0,16	9388	29	0,653
13/01/2016	5,54	0,21	83,86	7,46	1,89	0,26	0,44	0,10	0,11	0,13	9379	32	0,652
14/01/2016	5,57	0,21	83,87	7,53	1,85	0,25	0,40	0,09	0,10	0,13	9361	27	0,651
15/01/2016	5,76	0,22	83,78	7,46	1,86	0,24	0,40	0,09	0,09	0,10	9326	28	0,651
16/01/2016	5,64	0,22	83,89	7,48	1,84	0,25	0,39	0,09	0,09	0,11	9338	29	0,650
17/01/2016	5,66	0,21	83,63	7,59	1,88	0,26	0,43	0,11	0,12	0,11	9373	29	0,653
18/01/2016	5,75	0,21	83,86	7,43	1,83	0,25	0,39	0,09	0,09	0,10	9322	29	0,650
19/01/2016	5,54	0,21	83,78	7,64	1,87	0,25	0,40	0,09	0,10	0,12	9371	29	0,651
20/01/2016	5,56	0,21	83,82	7,61	1,86	0,25	0,40	0,09	0,10	0,10	9359	41	0,651
21/01/2016	5,55	0,21	83,85	7,62	1,84	0,26	0,39	0,09	0,10	0,09	9355	39	0,650
22/01/2016	5,54	0,21	83,93	7,60	1,82	0,26	0,39	0,08	0,09	0,08	9344	41	0,649
23/01/2016	5,76	0,22	83,78	7,46	1,86	0,24	0,40	0,09	0,09	0,10	9326	40	0,651
24/01/2016	5,69	0,21	83,77	7,48	1,87	0,25	0,41	0,09	0,10	0,13	9352	43	0,651
25/01/2016	5,68	0,22	83,75	7,50	1,85	0,25	0,40	0,08	0,09	0,18	9359	40	0,652
26/01/2016	5,64	0,23	83,82	7,48	1,83	0,25	0,40	0,09	0,09	0,17	9357	28	0,652
27/01/2016	5,60	0,21	83,79	7,57	1,86	0,25	0,41	0,09	0,10	0,12	9361	30	0,651
28/01/2016	5,52	0,21	83,80	7,57	1,90	0,26	0,42	0,10	0,10	0,12	9380	32	0,652
29/01/2016	5,77	0,21	83,63	7,59	1,85	0,25	0,41	0,09	0,10	0,10	9340	30	0,651
30/01/2016	5,84	0,21	83,67	7,48	1,85	0,25	0,41	0,09	0,10	0,10	9326	29	0,651
31/01/2016	5,61	0,21	83,94	7,40	1,87	0,26	0,41	0,09	0,10	0,11	9349	30	0,650
Moyenne	5,63	0,21	83,80	7,52	1,86	0,25	0,41	0,09	0,10	0,12	9355	27,77	0,651

Tableau 4.1 : Composition chimique de gaz naturel de Hassi-Rmel (janvier 2016)

On peut simplifier le tableau précédent sous la forme ci-dessous en prenant la moyenne arithmétique de chaque paramètre :

Date	N ₂	CO ₂	C ₁	C ₂	C ₃	IC ₄	NC ₄	IC ₅	NC ₅	C ₆ +	PCS	T.Eau	Densité
Moyenne	5,63	0,21	83,80	7,52	1,86	0,25	0,41	0,09	0,10	0,12	9355	27,77	0,651

Tableau 4.2 : La moyenne de la composition chimique de gaz naturel

5.3.1.2. Les caractéristiques du gaz naturel

Le tableau suivant représente la fraction molaire, la masse molaire, la pression et la température critiques et ainsi que la viscosité du gaz naturel étudié :

composition	y_i (% mol)	M (kmol/kg)	P_c (Psia)	T_c (°F)	η (cp)
N ₂	5,63	14			0.0173
CO ₂	0,21	44.01			0.0147
C ₁	83,80	16.043	666	-116.66	0.0107
C ₂	7,52	30.07	707	90.07	0.0089
C ₃	1,86	44.09	617	205.93	0.0075
IC ₄	0,25	58.123	527	274.4	
NC ₄	0,41	58.123	548.8	305.52	0.0073
IC ₅	0,09	72.15	490	368.96	
NC ₅	0,10	72.15	488	385.7	0.0066
C ₆ +	0,12	86.17	436.9	453.8	0.0063

Tableau 4.3 : Caractéristiques du gaz naturel (données)

4.3.1.3. Calcul de propriétés du gaz naturel considéré

Le calcul de propriétés du gaz naturel est basé sur les expressions théoriques déjà vues dans la partie 4.1.

Propriétés	valeurs	Propriétés	valeurs
M_g (kg)	18.030	A	0.21
P_{pc} (psia)	627.7715	B	0
T_{pc} (°F)	-83.9566	T'_{pc} (°F)	356.1365
P_{pr}	1.378287	P'_{pr}	595.0609
T_{pr}	1.430079	R	461.118
ε	19.57689		

Tableau 4.4 : Propriétés du gaz naturel (calculées)

4.3.2. Caractéristique de taux de fuite

4.3.2.1. Lien avec le transport du gaz naturel

On va considérer une conduite horizontale comme indique le schéma suivant :

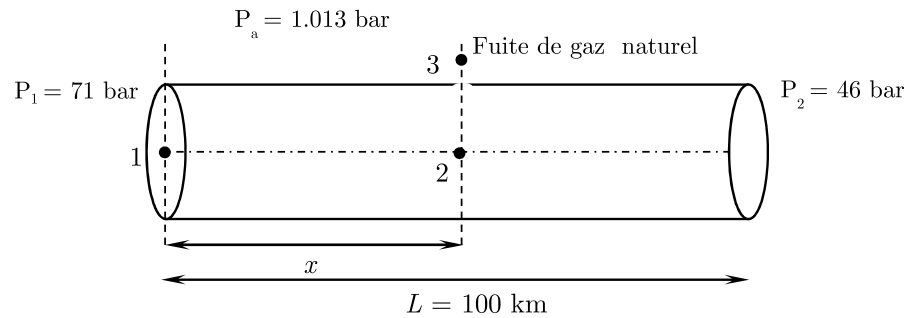


Figure 4.5 : Schéma d'un tronçon de gazoduc supposé

Supposant que cette conduite subit à un percement dans la position (3), on a bien donc un déchargement de gaz de la position (2) vers l'atmosphère (3) de fait que la pression ambiante est inférieure à celle de la position (2) de la conduite.

On prend en considération le diamètre de l'orifice est inférieur à 20mm. Cela pour que la loi (5.37) puisse être appliquée.

Pour simplifier le calcul et pour s'adapter plus tard aux conditions de la dispersion de cette fuite selon le modèle gaussien on va considérer une température moyenne égale à la température ambiante dans la position de la fuite vaut : 25 °C.

Le profil de la pression le long de la conduite

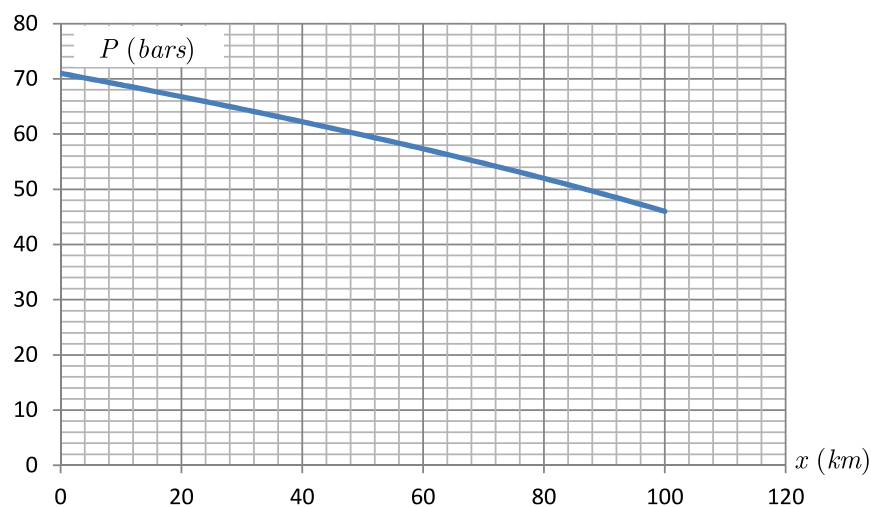


Figure 4.6 : Le profil de la pression de la conduite supposée

Si on suppose la fuite à la distance : $x = 49.265 \text{ km}$, alors la pression dans cette position vaut : $P = 60 \text{ bar}$.

4.3.2.2. Organigramme de taux de fuite

Soit le schéma suivant :

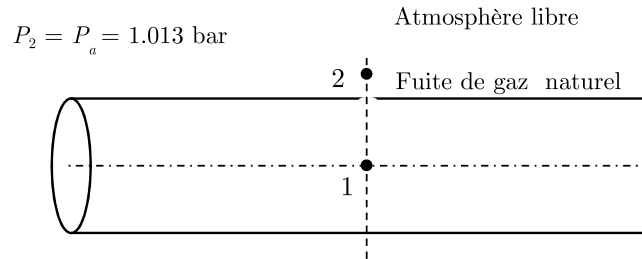


Figure 4.7 : Fuite de gaz naturel dans une position définie

La figure 4.3 montre une fuite de gaz naturel dans un gazoduc dans une position bien définie, La position (1) se trouve à l'intérieur de gazoduc et la position (2) montre l'atmosphère libre.

Avant de calculer le taux de fuite gaz naturel il faut d'abord savoir le régime de l'écoulement dans l'orifice comme on a déjà dit, s'il est (subsonique ou bien sonique) puis on calcule le taux de fuite en utilisant les formules correspondantes.

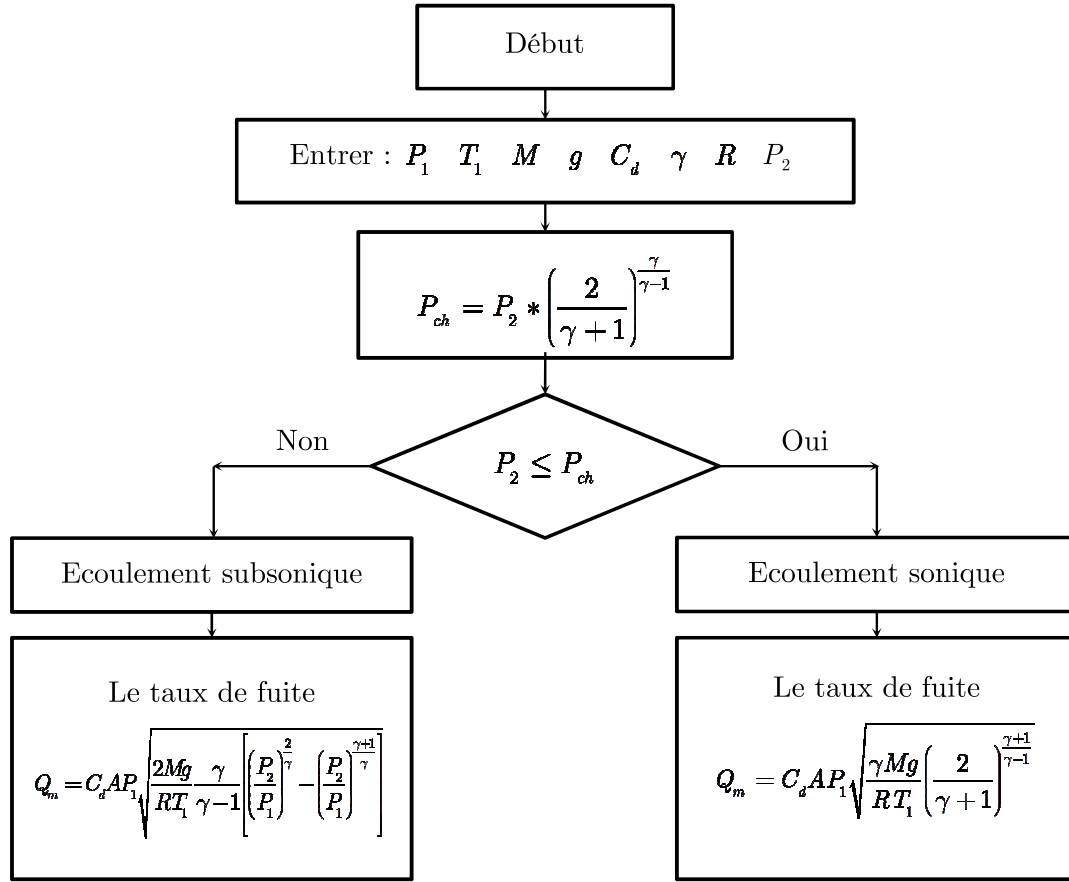


Figure 4.8 : Organigramme de taux de fuite

4.3.2.3. Variation de taux de fuite selon le diamètre de l'orifice

L'orifice est supposé comme étant circulaire alors on calcule la surface en utilisant la loi de surface de disque.

$$s = \frac{\pi}{4} D^2 \text{ Avec : } D \text{ est le diamètre de l'orifice.}$$

Dans cette partie on simule une fuite dont les conditions supposées auparavant :

$$P_1 = 60 \text{ bars.}$$

$$T_1 = 25^\circ C .$$

$$\gamma = 1.32 .$$

$$C_d = 0.6 .$$

On calcule le débit de fuite en utilisant l'équation (5.38) pour des diamètres d'orifices différents et inférieurs à 20 mm : $Q = f(D)$

Remarque :

Le taux de fuite est en kg/s

Pour le calcul de taux de fuite on suit l'algorithme suivant :

Les résultats sont mentionnés dans le tableau suivant :

$D \text{ (m)}$	taux de fuite	$D \text{ (m)}$	taux de fuite
0.001	0.01601836	0.011	1.93822195
0.002	0.06407345	0.012	2.3066443
0.003	0.14416527	0.013	2.70710338
0.004	0.25629381	0.014	3.13959919
0.005	0.40045908	0.015	3.60413172
0.006	0.57666108	0.016	4.10070098
0.007	0.7848998	0.017	4.62930697
0.008	1.02517525	0.018	5.18994968
0.009	1.29748742	0.019	5.78262912
0.01	1.60183632	0.02	6.40734529

Tableau 4.7 : Variation du taux de fuite en fonction de diamètre de l'orifice

Le graphe : $Q = f(D)$

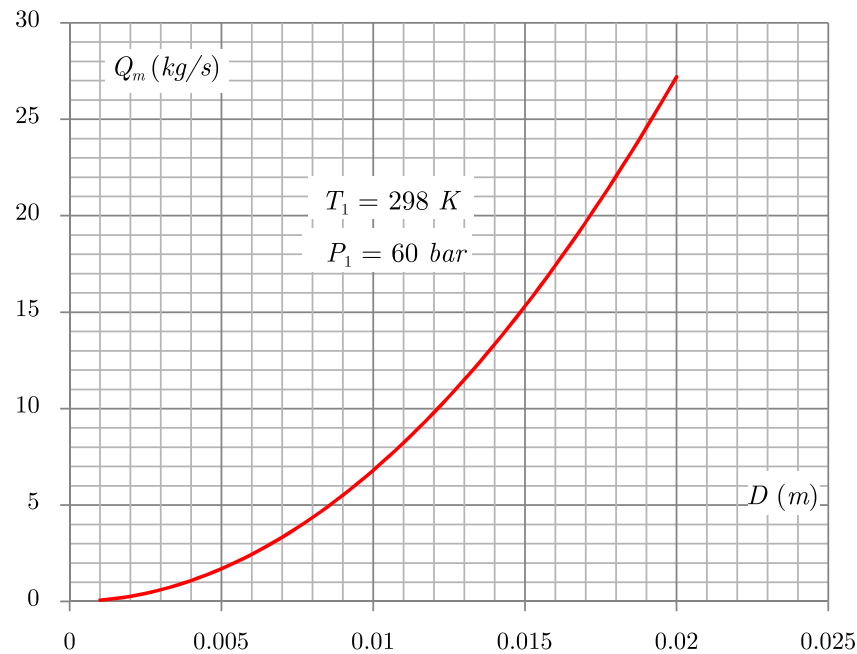


Figure 4.9 : Variation du taux de fuite en fonction le diamètre de l'orifice

Analyse du graphe

D'après la figure 4.9 on constate que le taux de fuite varie directement proportionnelle au diamètre de l'orifice.

Donc plus que le diamètre de la brèche étant important plus que le taux de fuite est considérable.

L'augmentation de taux de fuite en fonction du diamètre de l'orifice se fait d'une manière parabolique.

4.3.2.4. Variation de taux de fuite en fonction de la pression

Dans cette partie on va calculer les taux de fuite en fonction de pression de gaz naturel disponible sur la ligne montrée dans la figure 4.5, par un pas vaut 1 bar, on change les diamètres de l'orifice comme suit :

$$D = 0.0055 \text{ m}$$

$$D = 0.01 \text{ m}$$

$$D = 0.02 \text{ m}$$

On trace à chaque cas le graphe : $Q = f(P)$. A une température vaut : 25°C

Le graphe : $Q = f(P)$

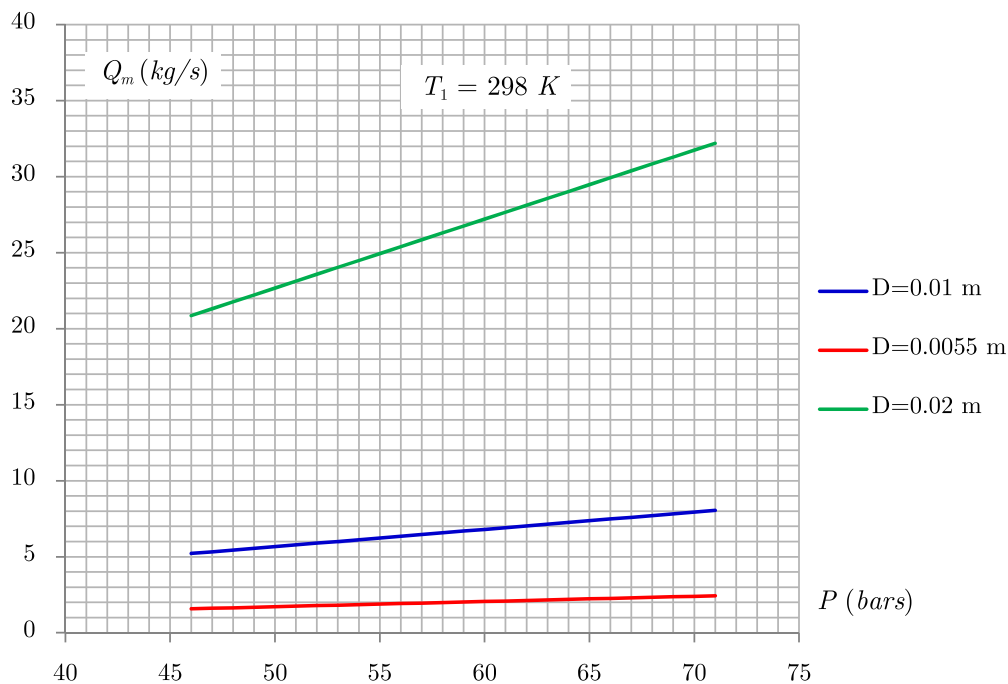


Figure 4.10 : Variation du taux de fuite en fonction le diamètre de l'orifice

Analyse du graphe

D'après la figure 4.5 on remarque que plus la pression augmente le taux de fuite devient important pour un diamètre d'orifice donné.

L'augmentation du taux de fuite en fonction de la pression se fait d'une manière linéaire.

4.3.2.5. Variation de taux de fuite en fonction de la température

Pour cette partie de calcul on trace la courbe de variation de taux de fuite en fonction de la température

On fait varier la température moyenne de 298 K jusqu'à 400 K puis on trace la courbe : $Q = f(T)$ si dessous :

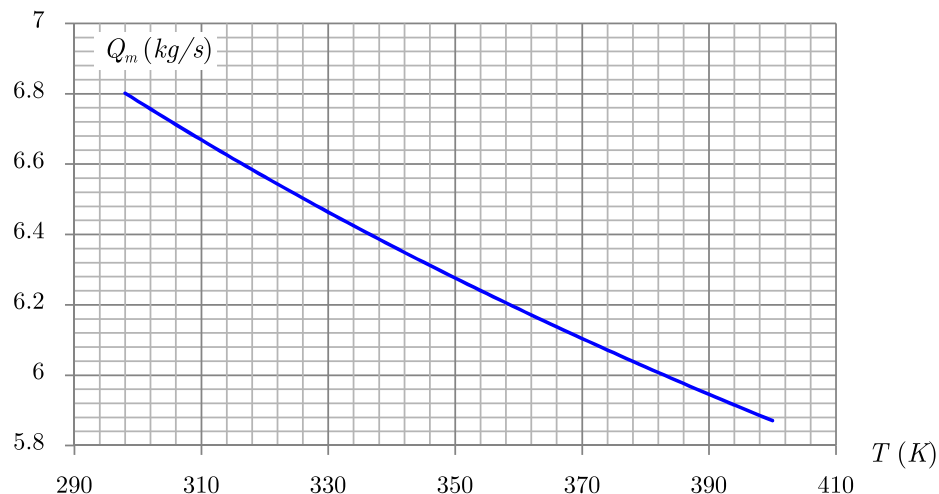


Figure 4.11 : Variation du taux de fuite en fonction de la température

Analyse du graphe

On remarque que la température influe inversement sur la décroissance du taux de fuite. Plus que la température de fluide augmente plus que le débit de fuite diminue.

Cette diminution est d'une manière hyperbolique.

Conclusion

Le taux de fuite dans les gazoducs est une fonction qui directement proportionnel dépendant au diamètre de la brèche (Orifice) avec laquelle le gaz était déchargé et de la pression du gaz naturel dans la position ou la fuite avait lieu mais, et il dépend aussi de la température qui influe inversement sur son augmentation.

Chapitre 05

Modélisation et simulation de la dispersion d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc

5.1. Modélisation de la dispersion atmosphérique

5.1.1. La modélisation

La modélisation de la dispersion atmosphérique conduit à une simulation de la dispersion de panaches ou de bouffée de gaz dans un contexte et une temporalité donné, fait à l'aide d'outils mathématiques et de logiciels informatiques et cartographiques. Les modèles cherchent à prendre en compte les conséquences directes et indirectes, dans l'espace et dans le temps des rejets (accidentels ou non) de substances (gaz, particules, aérosols, radionucléides1...) indésirables, dangereuses ou toxiques.

Concepts de base modélisation de la dispersion atmosphérique de sources d'émissions.

Il s'agit aussi parfois d'évaluer des risques induits tels que le risque d'incendie, d'asphyxie, d'explosions, de contamination ou pollution de nappe, de déversements, etc. ou encore le risque d'intoxications dus aux produits chimiques ou les problèmes de radioécologie et radiotoxicité, ou d'infection due à la dissémination d'organismes infectieux, etc. La modélisation de la dispersion atmosphérique dépasse donc le simple cadre de la prévision météorologique.

5.1.2. Description du modèle utilisé et ses équations

Il existe plusieurs méthodes pour modéliser la dispersion atmosphérique d'un gaz moins dense que l'air (dans notre cas le gaz naturel), comme les modèles empirique, lagrangiens, eulériens, on s'intéresse aux modèles empiriques dont le model gaussien fait partie. [14]

5.1.2.1. Le modèle gaussien

Les équations de dispersion gaussienne sont utilisées pour décrire la dispersion dans l'atmosphère de gaz dont la densité est semblable à celle de l'air, la température est identique à celle de l'air et dont la diffusion se fait seulement sous l'action de l'air, c'est-

à-dire sous l'action des turbulences mécaniques et thermiques, ces équations sont basées sur l'équation générale proposée par Pasquill et Gifford.

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (5.1)$$

Cette équation donne la variation de la concentration de gaz dispersé en fonction du temps et de direction de l'espace x , y et z . c'est-à-dire : $c = c(x, y, z, t)$, k_x ; k_y ; k_z sont les coefficients de la diffusivité suivant les axe indicé.

En développant le terme de la dérivée totale on aura :

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z}$$

Alors que l'équation (5.1) devient

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z}}_{\text{advection}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)}_{\text{diffusion}} \quad (5.2)$$

v_x v_y v_z : les vitesses du gaz dispersé suivant les trois directions.

5.1.2.2. L'équation d'advection-diffusion

L'équation d'advection-diffusion est une combinaison de l'équation d'advection et de diffusion, elle décrit des phénomènes physiques, où les particules, l'énergie, ou d'autres grandeurs physiques sont transférées dans un système physique en raison de deux processus: advection et diffusion. De la définition ci-dessus, il s'ensuit que l'équation d'advection -diffusion combine à la fois des équations paraboliques (diffusion) et hyperboliques (advection) aux dérivées partielles. En cas de : coefficient de diffusion constant, la vitesse d'écoulement constante, l'équation en 2D peut être écrite sous la forme suivante :

$$\underbrace{\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y}}_{\text{advection}} - \underbrace{k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)}_{\text{diffusion}} = s \quad (5.3)$$

Les deux termes sur le côté gauche représentent les différents processus physiques: le premier correspond à l'advection tandis que le second décrit la diffusion normale.

c : est la variable d'intérêt (concentration de l'espèce de transfert de masse).

k : est La constante de la diffusivité pour la masse.

v_x ; v_y : les composantes de la vitesse du fluide porteur selon x et y respectivement.

s : le terme source. [15]

1) Advection pure

La notion d'advection pure, signifie le transport d'une propriété par un seul processus qui est l'advection et sans l'intervention d'aucun autre processus comme la diffusion. L'équation de l'advection pure s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = s \quad (5.3a)$$

2) Diffusion pure

La notion de diffusion pure, signifie le transport d'une propriété par un seul processus qui est la diffusion et sans l'intervention d'aucun autre processus comme l'advection. L'équation de la diffusion pure s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) = s \quad (5.3b)$$

Remarque : *On a bien négligé l'effet d'Archimède sur la dispersion de la fuite devant l'advection en prenant des valeurs importante de la vitesse du vent. Donc le déplacement verticale du nuage dispersé étant bien négligeable d'où le phénomène est semblable avec le model en deux direction.*

5.1.3. Conditions d'utilisation du modèle gaussien

Pour permettre utiliser le model gaussien il faut satisfaire aux considérations suivantes :

- La source de génération du gaz est supposée ponctuelle.
- le débit massique de l'émission est continu en fonction du temps.
- La vitesse initiale relative est nulle.
- Il n'y a pas d'effets gravitationnels sur le gaz émis.
- Les conditions Météorologiques sont constantes dans le temps pendant la période de transport de la source au récepteur. (En prenant la moyenne de chaque paramètre)
- La rugosité du sol est uniforme dans la zone de dispersion. Il n'y a pas d'obstacles, comme des montagnes ou des bâtiments.
- Le sol est horizontal. Le nuage est transporté par le vent, les profils de concentration moyenne temporelle dans le sens du vent, à la fois horizontale et verticale

(perpendiculaire à la direction de transport), peuvent être représentés par la distribution gaussienne.

- Le model est valable pour des distances plus que 100 m. [16]

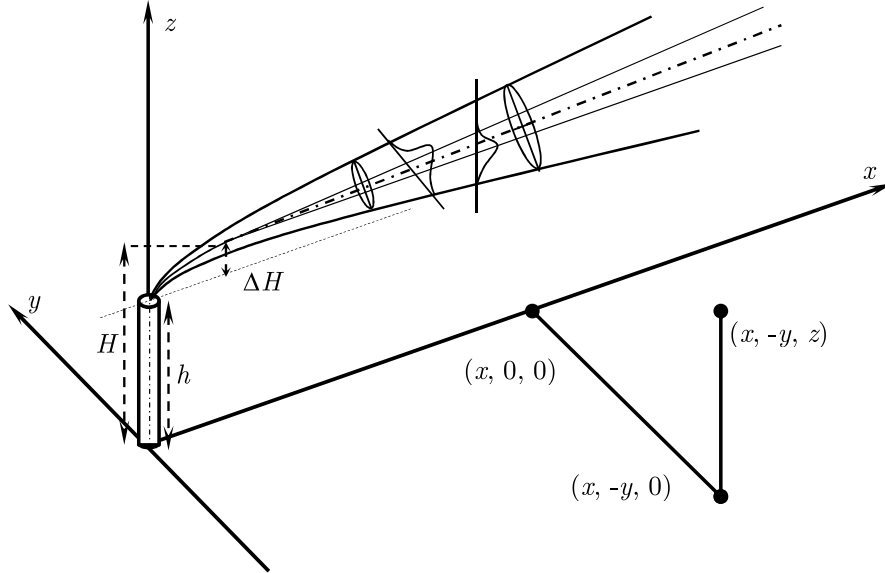


Figure 5.1 : Répartition gaussienne de la concentration dans un panache de gaz passif.

Le déchargement du gaz se fait verticalement depuis la source puis elle deviendra horizontale par l'effet du vent.

Pour simuler la dispersion atmosphérique d'un déchargement du gaz à une hauteur h bien donnée il est nécessaire de considérer que l'émission du gaz est générée depuis une source virtuelle de différence de hauteur par rapport à la source originale ΔH , pour permettre de considérer que la dispersion se fait d'une manière horizontale.

La différence de la hauteur entre les deux sources ΔH peut être calculée par:

$$\Delta H = \frac{u_s d}{u} \left[1.5 + 2.68 P d \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \right] \quad (5.4)$$

d : Le diamètre intérieur de la source en m

T_s : La température du gaz à l'intérieur en K

T_a : La température de l'air en K

u_s : La vitesse de la sortie du gaz à l'intérieur de la source en m / s

u : La vitesse du vent en m / s

La hauteur effective : $H = h + \Delta H$

5.1.4. Les types de modèle gaussien de la dispersion atmosphérique

Les modèles gaussiens permettent de simuler la dispersion atmosphérique de gaz non-réactifs à proximité de la source.

On distingue :

- Les modèles de panache (stationnaires).
- Les modèles de bouffées (qui peuvent être non-stationnaires). [17]

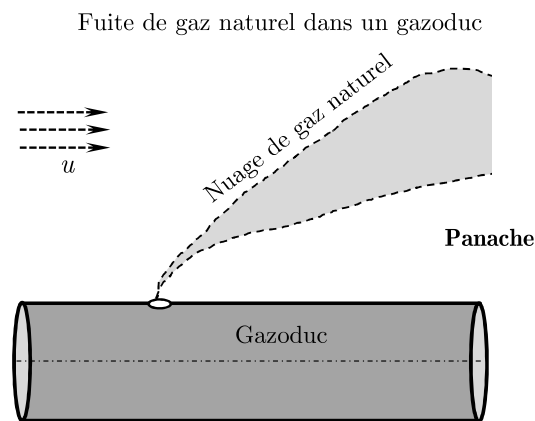


Figure 5.2 : Schéma de fuite du gaz naturel dans un gazoduc (panache)

5.2. Etude mathématique de l'équation d'advection-diffusion

5.2.1. Obtention de l'équation d'advection-diffusion

5.2.1.1. La concentration du gaz dispersé

Le terme concentration exprime une mesure de la quantité d'une substance dans un fluide.

$$c = \frac{m}{V} \quad [kg / m^3] \quad (5.5a)$$

m : est la masse de la substance.

V : est le volume du fluide.

5.2.1.2. Le flux de transport de fluide

En physique, le flux d'une substance dans une direction donnée est défini comme la quantité passant à travers une section perpendiculaire à cette direction par unité de surface et par unité de temps.

$$j = \frac{m}{A \cdot \Delta t} \quad [kg / m^2 \cdot s] \quad (5.5b)$$

A : La section du passage du fluide.

Δt : La durée du passage du fluide à travers la section A .

Pour le flux d'advection :

C'est le flux issu du mouvement du fluide porteur.

$$j_A = \frac{m}{V} \frac{V}{A \cdot \Delta t} = c \frac{V}{A \cdot \Delta t} = c \frac{\Delta x \cdot A}{A \cdot \Delta t} = cu \quad (5.5c)$$

u : La vitesse d'entraînement du fluide porteur.

Ce processus s'appelle l'advection, un terme qui signifie le transport passif de la substance d'un endroit à un autre par le fluide porteur en mouvement. [18]

5.2.1.3. Equation d'advection pure

$$\text{On a : } dc = \frac{dm}{V} \Rightarrow dm = Vdc$$

Elle est obtenue en faisant le bilan de flux dans le volume V :

$$\frac{dm}{dt} = j_{Ae} - j_{As} + r \quad (5.5d)$$

j_{Ae} j_{As} : Les flux d'advection entrants et sortants dans le volume V .

r : La source dans le volume V .

On a

$j_{Ae} = j_A(x, t) \cdot A$ et $j_{As} = j_A(x + \Delta x, t) \cdot A$ alors le bilan (5,5d) devient :

$$V \frac{dc}{dt} = j_A(x, t) \cdot A - j_A(x + \Delta x, t) \cdot A + r$$

$$A \cdot \Delta x \frac{dc}{dt} = j_A(x, t) \cdot A - j_A(x + \Delta x, t) \cdot A + r$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{j_A(x, t) - j_A(x + \Delta x, t)}{\Delta x} + s \quad (5.5e)$$

L'équation du bilan (5,5e) devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial j_A}{\partial x} + s \quad (5.5f)$$

Et d'après la loi (5,5c) on aura :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial uc}{\partial x} + s \quad (5.5g)$$

De fait que la vitesse u est constante alors :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + s \quad (5.5h)$$

En 3D et pour un champ de vitesse $\vec{u} = (v_x, v_y, v_z)$ alors :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = s \quad (5.5i)$$

5.2.1.4. Equation de diffusion pure

Elle est obtenue en faisant le bilan de flux dans le volume V :

$$\frac{dm}{dt} = j_{De} - j_{Ds} + r \quad (5.5j)$$

j_{De} j_{Ds} : Les flux de diffusion entrants et sortants dans le volume V .

r : La source dans le volume V .

$j_{De} = j_D(x, t) \cdot A$ et $j_{Ds} = j_D(x + \Delta x, t) \cdot A$ alors le bilan devient :

On arrive alors jusqu'à :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial j_D}{\partial x} + s \quad (5.5k)$$

Selon la loi de Fick (3.3) on a : $j_D = -k \frac{\partial c}{\partial x}$ alors le bilan devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-k \frac{\partial c}{\partial x} \right) + s = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial c}{\partial x} \right) + s \quad (5.5l)$$

En 3D et pour un champ de vitesse $\vec{u} = (v_x, v_y, v_z)$ alors :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + s \quad (5.5m)$$

5.2.1.5. Equation d'advection diffusion

La loi de la conservation de la masse peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{j} = s \quad (5.5n)$$

Avec $s = s(x, y, z, t)$ est le terme de source.

Et $\vec{j} = \vec{j}(x, y, z, t)$ le flux massique en raison des effets de la diffusion et advection.

Le flux de masse se fait par deux processus principaux qu'on a déjà parlé (chapitre 4) qui sont la diffusion et l'advection, donc on a donc deux flux de masse le premier est un flux d'advection dû à la vitesse du vent et le deuxième est un flux diffusif dû à la turbulence de l'atmosphère. Donc on peut écrire :

$$\vec{j} = \vec{j}_A + \vec{j}_D$$

Avec $\vec{j}_A$ est le flux d'advection

Avec $\vec{j}_D$ est le flux diffusif

Suivant la loi de Fick (3.3) on a : $\vec{j}_D = -k\nabla c$ avec $k = \text{diag}(k_x, k_y, k_z)$.

Le flux d'advection est proportionnel à la vitesse du vent donc : $\vec{j}_A = c\vec{u}$ avec :

$$\vec{u} = (v_x, v_y, v_z).$$

Alors l'équation devient :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(\vec{j}_A + \vec{j}_D) = s \quad (5.5o)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(c\vec{u} - k\nabla c) = s \quad (5.5p)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(c\vec{u}) = -\nabla(k\nabla c) + s \quad (5.5q)$$

Donc, on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + s \quad (5.5r)$$

Le gaz dispersé est émis par un débit constant Q_m depuis un point de source singulier supposé ponctuel $(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = H)$. Donc, le terme de la source peut être écrit comme suit :

$$s(x, y, z) = Q_m \delta(x) \delta(y) \delta(z - z_0) \quad (5.5s)$$

Où $\delta[m^{-1}]$ est la fonction de Dirac. [19]

5.2.2. Mathématique de la dispersion

5.2.2.1. Simplification du modèle gaussien

Supposons une fuite du gaz naturel schématisée comme indique les figures si dessous :

Le rejet du gaz est depuis le point de source du coordonné $(x_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = H)$.

La vitesse du vent prend la direction de l'axe x donc : $0 \leq x < \infty$.

La fuite du gaz se fait au-dessus du sol à une hauteur H donc : $0 \leq z < \infty$

Le plan horizontal qui est le sol est illimité donc : $-\infty < y < \infty$

On suppose que la fuite est fait depuis une source virtuelle d'hauteur H pour avoir un rejet horizontal.

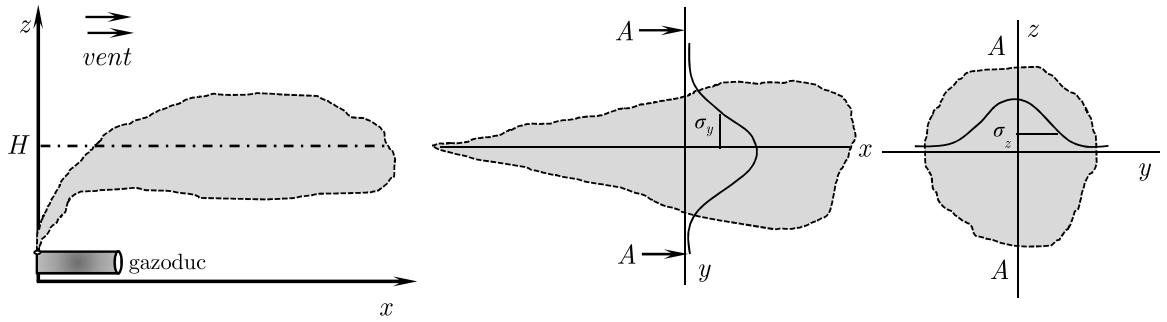


Figure 5.3 : Projection du nuage du panache dans les trois plans

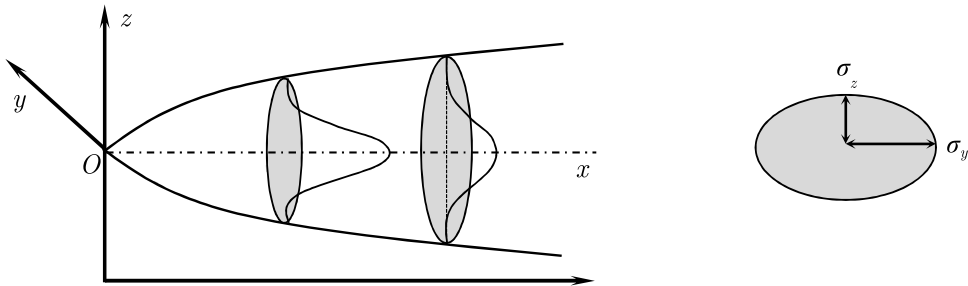


Figure 5.4 : Distribution de la concentration dans un panache

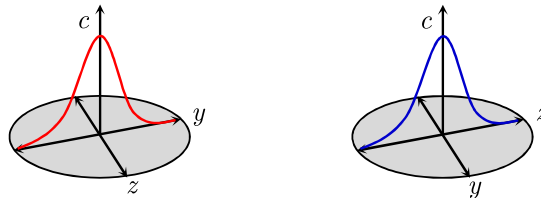


Figure 5.5 : La distribution gaussienne de la concentration dans des ellipses du panache

La concentration diminue en fonction de l'éloignement du point de source , on peut supposer que la concentration est nulle à des distances assez grandes du point source.

Dans le cas d'un gazoduc aérien subit à une fissuration dans la partie supérieure alors la hauteur est son diamètre extérieur plus la hauteur du support s'il est supporté, plus ΔH panache comme montre la figure si dissous :

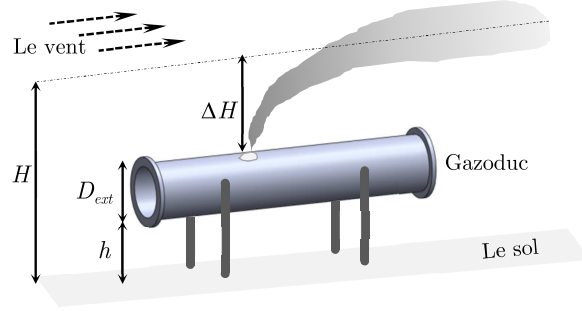


Figure 5.6 : Schéma d'un gazoduc aérien en état d'une fuite

Pour une fuite dans un gazoduc enterré on peut modéliser comme suit :

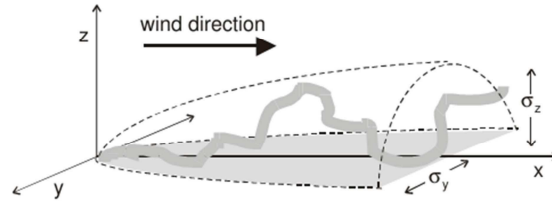


Figure 5.7 : Schéma d'un gazoduc enterré à l'état d'une fuite [20]

5.2.2.2. Analyse totale du problème

a) Les suppositions concernant la solution

On va évaluer la solution analytique exacte de l'équation (5.5r) qui représente la variation de la concentration du nuage dans le cas d'un rejet continu du panache stationnaire :

L'équation d'advection-diffusion :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + s$$

Supposition pour la résolution analytique :

- On suppose que la vitesse du vent étant constante et suit la direction du x -positive alors pour le champ : $\vec{u} = (v_x, v_y, v_z) = (u, 0, 0)$.
- Les coefficients de la diffusivité sont variables seulement en fonction de x (sens du direction du vent est sont égaux : $k_x(x) = k_y(x) = k_z(x) = k(x)$).
- La solution est établie dans un régime permanant donc on pose : $\partial_t c = 0$ tous les paramètres ne dépendent plus du temps.
- Suivant l'axe (x) la vitesse du vent est importante que la diffusion alors on peut considérer que la diffusion étant négligeable devant l'advection (vent) dont on pose : $\partial_x(k \partial_x c) = 0$.
- On considère que la fuite est faite dans un plan horizontal.
- Le sol n'absorbe pas le gaz rejeté mais il le reflète totalement.
- Le rejet du gaz se fait à une hauteur $z_0 = H$ (figure 5.4)

Notre équation devient :

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (5.6)$$

b) Le problème et ses conditions aux limites et aux frontières

Une formulation équivalente de ce problème est trouvée comme suit :

$$\begin{aligned} u \frac{\partial c}{\partial x} &= k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \\ (x, y, z) &\in [0, \infty] \times [-\infty, \infty] \times [0, \infty] \\ c(0, y, z) &= \frac{Q_m}{u} \delta(y) \delta(z - z_0) \\ c(\infty, y, z) &= 0, \quad c(x, \pm\infty, z) = 0, \quad c(x, y, \infty) = 0, \\ k \frac{\partial c}{\partial z}(x, y, 0) &= 0 \quad ; \text{ La fonction } \delta \text{ est celle de Dirac.} \end{aligned}$$

5.2.2.3. La solution analytique de l'équation d'advection-diffusion

5.2.2.3.1. Le changement de la variable x par une variable r

On fait un changement de variable pour x comme suit : $r = \frac{1}{u} \int_0^x k(\xi) d\xi$

$$\text{Cela va donner : } \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial r} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u} \int_0^x k(\xi) d\xi \right) = \frac{1}{u} k \frac{\partial c}{\partial r} \quad (5.7)$$

En remplaçant (5.7) dans l'équation (5.6) précédente : $u \frac{1}{u} k \frac{\partial c}{\partial r} = +k \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$

$$\frac{\partial c}{\partial r} = + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5.8)$$

5.2.2.3.2. La séparation des variables

Nous appliquons ensuite, la méthode de séparation des variables à l'équation (5.8), en supposant que la dépendance de la solution sur y et z peuvent être séparée :

$$c(r, y, z) = \frac{Q_m}{u} a(r, y) \cdot b(r, z) \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{Q_m}{u} a(r, y) \cdot b(r, z) \right) &= \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{Q_m}{u} a(r, y) \cdot b(r, z) \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{Q_m}{u} a(r, y) \cdot b(r, z) \right) \\ \frac{\partial}{\partial r} (a(r, y) \cdot b(r, z)) &= \frac{\partial^2}{\partial y^2} (a(r, y) \cdot b(r, z)) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (a(r, y) \cdot b(r, z)) \\ b(r, z) \frac{\partial a}{\partial r} + a(r, y) \frac{\partial b}{\partial r} &= b(r, z) \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + a(r, y) \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (5.10)$$

On obtient alors, les deux problèmes réduits tridimensionnels qui ont la forme d'équations de diffusion 2D :

$$\begin{cases} \frac{\partial a}{\partial r} = \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} & (1) \\ \frac{\partial b}{\partial r} = \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} & (2) \end{cases}$$

Pour l'équation (1) :

$$\frac{\partial a}{\partial r} = \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \quad (5.11)$$

$$0 \leq r < \infty, \quad -\infty < y < \infty,$$

$$a(0, y) = \delta(y), \quad a(\infty, y) = 0, \quad a(r, \pm\infty) = 0. \quad (5.12)$$

Pour l'équation (2) :

$$\frac{\partial b}{\partial r} = \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \quad (5.13)$$

$$0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq z < \infty,$$

$$b(0, z) = \delta(z - z_0), \quad b(\infty, z) = 0, \quad b(r, \infty) = 0, \quad \frac{\partial b}{\partial z}(r, 0) = 0 \quad (5.14)$$

5.2.2.3.3. Introduction de la transformée de Laplace

Il existe de nombreuses méthodes qui peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes (5.11) et (5.13), Nous avons choisi ici d'utiliser la transformée de Laplace parce que cette approche est la plus facile :

Pour l'équation (1) :

$$\text{On prend la transformée de Laplace pour } y : L_r[a(r, y)] = \hat{a}(\rho, y) = \int_0^\infty a(r, y) e^{-\rho r} dr$$

On obtient donc :

$$\rho \hat{a} - a(0, y) = \frac{\partial^2 \hat{a}}{\partial y^2} \text{ et } \frac{\partial^2 \hat{a}}{\partial y^2} - \rho \hat{a} = -\delta(y) \quad (5.15)$$

$$\text{On prend la transformée de Laplace pour } y : L_y[a(\rho, y)] = \hat{\hat{a}}(\rho, \eta) = \int_0^\infty a(\rho, y) e^{-\eta y} dy$$

On obtient donc :

$$\eta^2 \hat{\hat{a}} - \eta \hat{\hat{a}}(\rho, 0) - \frac{\partial \hat{\hat{a}}}{\partial y}(\rho, 0) - \rho \hat{\hat{a}} = -1 \quad (5.16)$$

Dans cette partie on a pris des valeurs positive pour y , car le problème est symétrique et la solution va être correcte pour des valeurs négatives, on obtient donc :

$$\hat{\hat{a}}(\rho, \eta) = \frac{c_1 \eta + c_2}{\eta^2 - \rho} \quad (5.17)$$

$$\text{Avec } c_1 = \hat{\hat{a}}(\rho, 0) \text{ et } c_2 = -1 + \frac{\partial \hat{\hat{a}}}{\partial y}(\rho, 0)$$

En appliquant la transformée inverse pour (5.17) :

$$\begin{aligned} \hat{\hat{a}}(\rho, \eta) &= c_1 \frac{\eta}{\eta^2 - (\sqrt{\rho})^2} + \frac{c_2}{\sqrt{\rho}} \frac{\sqrt{\rho}}{\eta^2 - (\sqrt{\rho})^2} \\ \hat{a}(\rho, y) &= \left(\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2\sqrt{\rho}} \right) e^{\sqrt{\rho}y} + \left(\frac{c_1}{2} - \frac{c_2}{2\sqrt{\rho}} \right) e^{-\sqrt{\rho}y} \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\text{Depuis (5.12) : } y = \infty \text{ on a } a(r, \infty) = 0 \text{ alors } \hat{a}(\rho, \infty) = \int_0^\infty a(r, \infty) e^{-\rho r} dr = 0$$

Donc, dans la dernière solution est nécessaire que : $\frac{c_1}{2} + \frac{c_2}{2\sqrt{\rho}} = 0$ donc : $c_1 = -\frac{c_2}{\sqrt{\rho}}$

La solution devient :

$$\hat{a}(\rho, y) = -\frac{c_2}{\sqrt{\rho}} e^{-\sqrt{\rho}y} \quad (5.19)$$

Supposons pour le moment que c_2 ne dépend pas de ρ alors :

$$a(r, y) = -\frac{c_2}{\sqrt{\pi r}} e^{-\frac{y^2}{4r}} \quad (5.20)$$

$$a(0, y) = \delta(y) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(-\frac{c_2}{\sqrt{\pi r}} e^{-\frac{y^2}{4r}} \right) = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi r}} e^{-\frac{y^2}{4r}} \right) \text{ Alors } c_2 = -\frac{1}{2} \text{ La solution devient :}$$

$$a(r, y) = \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} e^{-\frac{y^2}{4r}} \quad (5.21)$$

Pour l'équation (2) :

$$\frac{\partial b}{\partial r} = \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \quad (5.22)$$

$$\text{On prend la transformée de Laplace pour } r : L_r[b(r, z)] = \hat{b}(\rho, z) = \int_0^\infty b(r, z) e^{-\rho r} dr$$

On aura :

$$\frac{\partial^2 \hat{b}}{\partial z^2} - \rho \hat{b} = -\delta(z - z_0) \quad (5.23)$$

$$\text{On prend la transformée de Laplace pour } z : L_z[b(\rho, z)] = \hat{\hat{b}}(\rho, \zeta) = \int_0^\infty \hat{b}(\rho, z) e^{-\zeta z} dz$$

$$\text{On aura : } \zeta^2 \hat{\hat{b}} - \zeta \hat{\hat{b}}(\rho, 0) - \frac{\partial \hat{\hat{b}}}{\partial \zeta}(\rho, 0) - \rho \hat{\hat{b}} = -e^{-z_0 \zeta} \quad (5.24)$$

$$\text{Il est clair, que suivant Neumann (5.14) : } \frac{\partial \hat{\hat{b}}}{\partial \zeta}(\rho, 0) = 0$$

$$\zeta^2 \hat{\hat{b}} - \zeta \hat{\hat{b}}(\rho, 0) - \rho \hat{\hat{b}} = -e^{-z_0 \zeta} \quad (5.25)$$

$$\hat{\hat{b}} = \frac{\zeta \hat{\hat{b}}(\rho, 0) - e^{-z_0 \zeta}}{\zeta^2 - \rho} \quad (5.26)$$

En appliquant la transformée inverse pour (5.26) on aura :

$$\begin{aligned} \hat{\hat{b}}(\rho, \zeta) &= \hat{\hat{b}}(\rho, 0) \frac{\zeta}{\zeta^2 - (\sqrt{\rho})^2} - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \frac{\sqrt{\rho}}{\zeta^2 - (\sqrt{\rho})^2} e^{-z_0 \zeta} \\ \hat{b}(\rho, z) &= \left(\frac{\hat{b}(\rho, 0)}{2} - \frac{e^{-\sqrt{\rho} z_0}}{2\sqrt{\rho}} \right) e^{\sqrt{\rho} z} + \left(\frac{\hat{b}(\rho, 0)}{2} + \frac{e^{\sqrt{\rho} z_0}}{2\sqrt{\rho}} \right) e^{-\sqrt{\rho} z} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Si : $z = \infty \Rightarrow \hat{b} = 0$ d'après (5.14).

$$\frac{\hat{b}(\rho, 0)}{2} - \frac{e^{-\sqrt{\rho}z_0}}{2\sqrt{\rho}} = 0 \Rightarrow \hat{b}(\rho, 0) = \frac{e^{-\sqrt{\rho}z_0}}{\sqrt{\rho}}$$

$$\text{Donc, } \hat{b}(\rho, z) = \left(\frac{e^{-\sqrt{\rho}z_0}}{\sqrt{\rho}} + \frac{e^{\sqrt{\rho}z_0}}{\sqrt{\rho}} \right) e^{-\sqrt{\rho}z} = \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left(e^{-\sqrt{\rho}(z-z_0)} + e^{-\sqrt{\rho}(z+z_0)} \right) \quad (5.28)$$

Le transformée inverse de (5.28) est donnée par la formule :

$$b(r, z) = \frac{1}{\sqrt{4\pi r}} \left(e^{-\frac{(z-z_0)^2}{4r}} + e^{-\frac{(z+z_0)^2}{4r}} \right) \quad (5.29)$$

5.2.2.3.4. La solution du problème

$$c(r, y, z) = \frac{Q_m}{4u\pi r} \exp\left(-\frac{y^2}{4r}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{4r}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{4r}\right) \right) \quad (5.30)$$

C'est pratiquement courant dans la littérature de la science atmosphérique pour remplacer la variable r dans l'équation. Avec l'expression étroitement liée :

$$\sigma^2(x) = \frac{2}{u} \int_0^x k(\xi) d\xi = 2r \quad (5.31)$$

A partir de (5.31) on tire r en fonction de l'écart type : $r = \frac{\sigma^2}{2}$

L'écart type de la distribution varie en fonction de la nature du milieu du rejet. On peut l'estimer en fonction du coefficient de diffusivité qui est dans ce cas variable sous différentes expressions.

En remplaçant dans (5.30) en fonction de l'écart type

La solution en fonction des écarts types étant :

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2u\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma^2}\right) \right) \quad (5.32)$$

Et c'est la solution qu'on recherche.

Si les coefficients de la diffusivité ne sont pas égaux sur les deux directions c'est-à-dire : $k_y(x) \neq k_z(x)$ pour l'équation :

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (5.32)$$

On va trouver la solution analytique suivante :

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2u\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left(\exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) \quad (5.33)$$

Les écarts types sont des fonctions de x . sa forme : $\sigma(x) = px^q$. Elles sont déterminées par les conditions atmosphériques. [19]

5.2.2.4 Analyse du « Pasquill-Gifford »

L'équation (5.5r) possède plusieurs solutions selon les conditions initiales et les conditions aux limites choisies dont chaque condition mène à un scénario précis.

La solution définissant des coefficients de dispersion : σ_x , σ_y et σ_z où ceux sont des écarts type des concentrations selon les directions. Ces coefficients sont en fonction des conditions atmosphériques et la distance du dégagement porté sous le vent.

Pasquill (1962) a proposé la solution de cette équation en termes de coefficients de la dispersion, et il a développé un certain nombre de solutions utiles basé sur un dégagement continu (panache) ou (bouffée).

Par ailleurs Gifford (1961) a développé un ensemble de corrélations pour les coefficients de la dispersion basés sur des données disponibles. Le modèle résultant est devenu connu sous le nom de modèle de Pasquill-Gifford.

Les coefficients σ_y et σ_z pour la diffusion des panaches sont disponibles par les graphiques, aussi les formules prédictives. Pour ces dernières sont disponibles et elles sont données dans les tableaux 5.1 ; 5.2 ; 5.3.

Les émissions de bouffée ont des différentes caractéristiques de propagation à partir des panaches continus et des différents coefficients de dispersion σ_y et σ_z sont exigés dans des graphes, et avec des équations.

Les données expérimentales pour les plumes ainsi les modèles de bouffée ont une plus grande incertitude. Ainsi elles souvent supposées que : $\sigma_x = \sigma_y$. [14]

5.2.2.4.1. La solution dans le cas de « panache »

Dans ce cas, la distribution de la concentration du gaz rejeté suit un mode de dispersion dans le régime permanent, c'est-à-dire la distribution ne dépend pas du temps, elle dépend seulement de la position du point dans lequel on veut calculer la concentration du gaz.

Dans ce modèle on a supposé que la direction du vent est suivant l'axe x , dont on va éliminer les deux composantes de la vitesse restantes. Alors l'équation devient

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (5.34)$$

Si le point de source est l'origine du repère en négligeant l'effet du sol, on retrouve:

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (5.35)$$

Q_m : Le débit massique de l'émission. $[kg / s]$

La prise en compte de la hauteur du panache $z_0 = H$ fait simplement un petit changement dans cette dernière équation (5.35) comme suit :

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(z - z_0)^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (5.36)$$

La réflexion d'un panache sur le sol est représentée dans la formulation gaussienne en ajoutant une source virtuelle symétrique de la source réelle par rapport au sol :

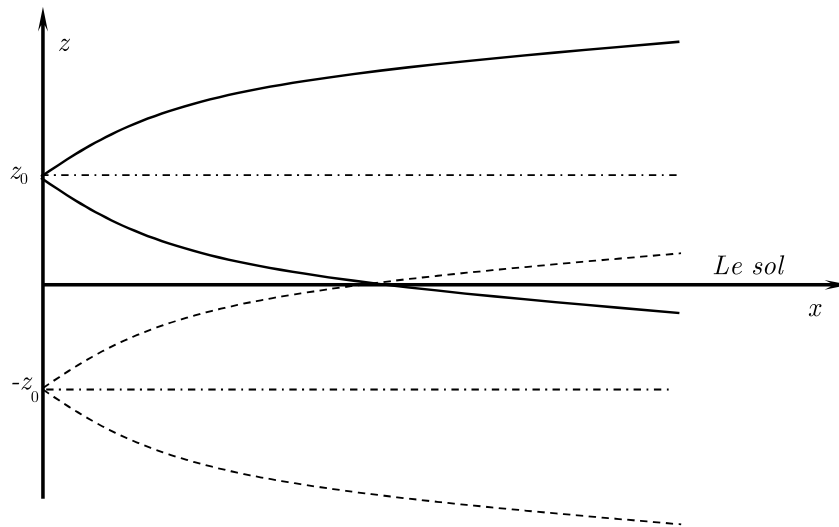


Figure 5.8 : L'effet du sol sur un panache

La solution analytique (5,36) devient :

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z - z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \exp\left(\frac{-(z + z_0)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.37)$$

α : Coefficient de réflexion du sol. $[kg / s]$

Pour une adsorption complète $\alpha = 0$ et pour une réflexion complète : $\alpha = 1$.

On considère que : $\alpha = 1$, généralement la valeur conservatrice est supposé $\alpha = 1$.

Cette réflexion est considérée comme étant émise par une source virtuelle située à une hauteur $z = -z_0$ à la même distance horizontale x du récepteur.

Les écarts type de la distribution

Classe de stabilité	σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-0.5}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$

Tableau 5.1 : Les écarts types du panache dans des conditions rurales

Classe de stabilité	σ_y (m)	σ_z (m)
A—B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x(1 + 0.0001x)^{0.5}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-0.5}$
E—F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x(1 + 0.0015x)^{-0.5}$

Tableau 5.2 : Les écarts types du panache dans des conditions urbaines

La concentration au niveau du sol est donnée à $z = 0$ par la formule

$$c(x, y, 0) = \frac{Q_m}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-z_0^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.38)$$

$$\text{Si } z_0 = 0 \text{ alors elle devient : } c(x, y, 0) = \frac{Q_m}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (5.39)$$

La concentration le long de la ligne médiane du panache directement sous le vent est donnée à $y = z = 0$: $c(x, 0, 0) = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z}$.

5.2.2.4.2. La solution dans le cas de « Bouffée »

La distribution de la concentration du gaz rejeté dans le cas de Bouffée suit un mode de dispersion non stationnaire, c'est-à-dire la distribution dépend du temps. L'émission du gaz dans ce modèle étant instantané, la bouffée va se déplacer dans l'espace. L'équation qui exprime ce modèle est la suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5.40)$$

En prenant compte l'advection par un champ de vitesse sans cisaillement, cette tache gaussienne est transportée sans déformation et diffuse le long de trajectoire du champ de vitesse, pour un champ de vitesse constant, la trajectoire étant :

$x(t) = x_o + v_x t$, $y(t) = y_o + v_y t$, mais on suppose que la vitesse du vent est suivant l'axe des abscisses alors pour : $v_x = u$, $v_y = 0$. Le trajectoire de la bouffée devient : $x(t) = x_o + ut$, $y(t) = y_o$, et en prenant les mêmes démarches que celui de panache on trouve que la solution générale en prenant le point de source (x_o, y_o, z_o) :

$$c(x, y, z, t) = \frac{m}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left(\frac{-(x - x_o - ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_o)^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(\frac{-(z - z_o)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \alpha \exp \left(\frac{-(z + z_o)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

La solution analytique exacte en prenant le point de source $(x_o = 0, y_o = 0, z_o)$ est :

$$c(x, y, z, t) = \frac{m}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left(\frac{-(x - ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \left[\exp \left(\frac{-(z - z_o)^2}{2\sigma_z^2} \right) + \alpha \exp \left(\frac{-(z + z_o)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right]$$

m : La masse de gaz émis instantanément en kg . (5.41)

Les écarts type sont déterminées suivant la classe de stabilité comme indique le tableau suivant :

Classe de stabilité	σ_x ou σ_y (m)	σ_z (m)
A	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.75}$
B	$0.14x^{0.92}$	$0.53x^{0.73}$
C	$0.10x^{0.92}$	$0.34x^{0.71}$
D	$0.06x^{0.92}$	$0.15x^{0.70}$
E	$0.04x^{0.92}$	$0.10x^{0.65}$
F	$0.02x^{0.89}$	$0.05x^{0.61}$

Tableau 5.3 : Les écarts types des bouffées dans des conditions rural et urbain

La concentration au niveau du sol est donnée à $z = 0$ par la formule

$$c(x, y, 0, t) = \frac{m}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (5.42)$$

La concentration au niveau du sol le long de l'axe des abscisses à $y = z = 0$:

$$c(x, 0, 0, t) = \frac{m}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(x - ut)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (5.43)$$

Le centre du nuage se trouve aux coordonnées $(ut, 0, 0)$. La concentration au centre de ce nuage mobile est donnée par :

$$c(ut, 0, 0, t) = \frac{m}{(2\pi)^{2/3} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \quad (5.44)$$

5.2.2.4.3. Estimation des écarts types par la méthode graphique

On peut estimer les valeurs des écarts types en utilisant les graphes :

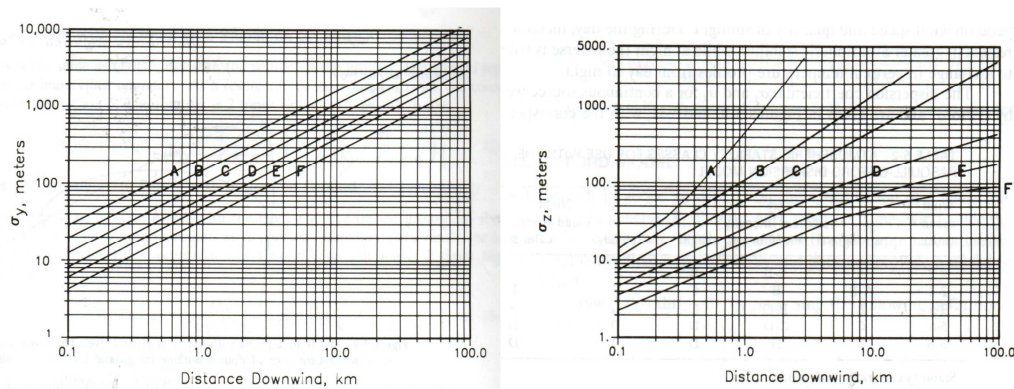


Figure 5.9 : Les graphes d'estimation des écarts types dans les panaches et les bouffées gaussiennes suivant Pasquill.

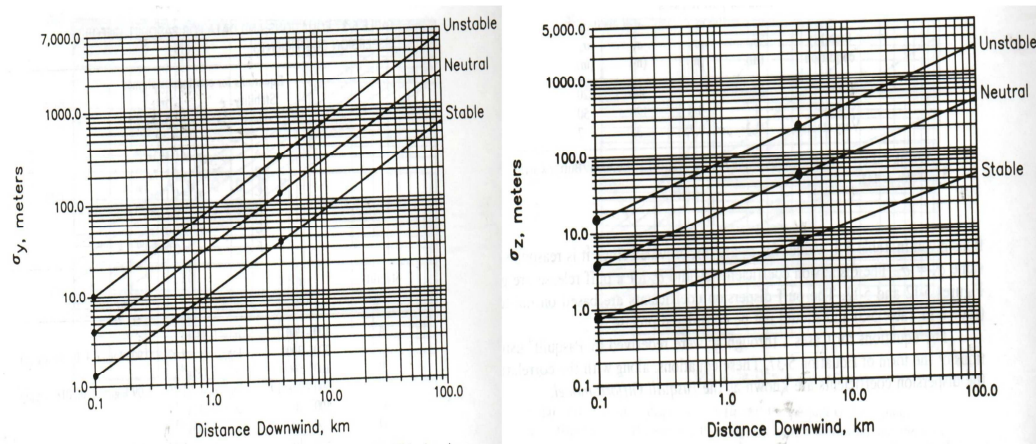


Figure 5.10 : Les graphes d'estimation des écarts types dans les panaches et les bouffées gaussiennes suivant Pasquill. [12]

5.2.3. Etude numérique

5.2.3.1. Simplification

Dans cette partie on va évaluer les concentrations dans le nuage du gaz de façon numérique, c'est à dire on va résoudre l'équation différentielle d'advection-diffusion en utilisant une méthode numérique telle que les différences finis. On s'intéresse dans cette partie par le développement d'une fuite de gaz naturel dans le plan (xOy) .

$$\text{L'équation est: } \frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}.$$

5.2.3.2. Formulation du problème

On considère une génération d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc, ce processus est schématisé comme suit : (vue de dessus 2D) :

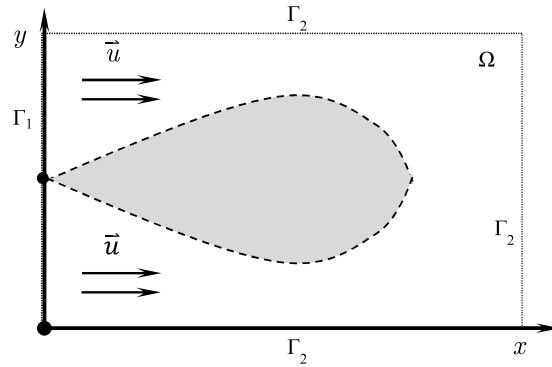


Figure 5.11 : Le domaine d'étude de la dispersion de la fuite

On tient compte de l'hypothèse d'indépendance des quantités par rapport à z , et en supposant que le coefficient de la diffusivité est constant alors, on aura l'équation suivante :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (5.45)$$

Pour le schéma 5.11, on a une vitesse du vent dans la direction de x -positive.

Alors l'équation devient : $\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$ car : $v_y = 0$.

Ω : est le domaine d'étude supposé un carré de longueur de côté L .

Pour cette équation (5,45) il faut ajouter la condition initiale : $c(x_0, y_0, t) = \frac{Q_m}{v_x \sigma_0^2}$ et

les conditions aux limites sur les frontières : $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ telles que : Γ_1 : $x = 0$ et

Γ_2 : $x = L, y = L, y = 0$ du domaine Ω .

On suppose que le gaz se trouve initialement à la position $(x_0, y_0) = (0, \frac{L}{2})$ du domaine Ω .

Si l'advection est prépondérante sur la diffusion, le flux entrant sur la frontière Γ_1 apporte de l'air dans le domaine Ω , la condition sur Γ_1 est une condition de Dirichlet $c_{\Gamma_1 - \{(0, \frac{L}{2})\}} = 0$.

L'air transporte le polluant vers l'extérieur du domaine Ω en passant par les frontières : Γ_2 . Donc, on impose la condition aux limites de Neumann : $\frac{\partial c}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = 0$.

Tous simplement le problème à résoudre et ses conditions est :

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \text{ Sur le domaine : } \Omega = [0, L] \times [0, L]$$

$$c_{\Gamma_1} = 0 \text{ Avec } \Gamma_1 - \left\{ \left(0, \frac{L}{2} \right) \right\} = \left\{ x = 0, \frac{L}{2} < |y| \leq L \right\} \text{ c'est-à-dire : } c(0, y, t) = 0$$

avec $y \neq \frac{L}{2}$.

$$\frac{\partial c}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = 0 \text{ avec : } \Gamma_2 = \left\{ x = L, 0 \leq y \leq L \right\} \cup \left\{ \left| y - \frac{L}{2} \right| = \frac{L}{2}, 0 \leq x \leq L \right\} \text{ c'est-à-dire :}$$

$$\frac{\partial c}{\partial y}\bigg|_{\left| y - \frac{L}{2} \right| = \frac{L}{2}} = 0 \text{ et } \frac{\partial c}{\partial x}\bigg|_{x=L} = 0$$

La condition au point de source à n'importe quel instant : $c(0, \frac{L}{2}, t) = \frac{Q_m}{v_x \sigma_0^2}$.

5.2.3.3. Résolution du problème en utilisant les différences finies

5.2.3.3.1. Le schéma des directions alternées implicites -ADI-

$$\text{On suppose l'équation : } \frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_y \frac{\partial c}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

Dans cette partie on note la concentration $c = u = u(x, y, t)$ pour s'adapter avec les formes mathématiques.

Le principe de cette méthode (ADI = Alternating Directions Implicit) est de décomposer les opérateurs spatiaux selon les directions d'espaces x et y comme suit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = L_x(u) + L_y(u) \text{ avec : } L_i = -v_i \frac{\partial}{\partial x_i} + k \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}. \quad (5.46)$$

On note dans cette méthode que : u^n , $u^{n+\frac{1}{2}}$ et u^{n+1} les solution au temps :

$u^n = n\Delta t$, $u^{n+\frac{1}{2}} = (n + 1/2)\Delta t$ et $u^{n+1} = (n + 1)\Delta t$. Dont Δt est un pas de temps.

En développant dans la série de Taylor d'ordre 1 le terme : $u^{n+\frac{1}{2}}$ on aura :

$$u^{n+\frac{1}{2}} = u\left(t + \frac{1}{2}\Delta t\right) = \exp\left(\frac{1}{2}\Delta t \frac{\partial}{\partial t}\right)u^n = u^n + \frac{1}{2}\Delta t \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^n + o(\Delta t)$$

$$u^{n+\frac{1}{2}} = u\left(t + \Delta t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta t \frac{\partial}{\partial t}\right)u^{n+1} = u^{n+1} - \frac{1}{2}\Delta t \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^{n+1} + o(\Delta t)$$

En faisant : $\exp\left(\frac{1}{2}\Delta t \frac{\partial}{\partial t}\right)u^n = \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta t \frac{\partial}{\partial t}\right)u^{n+1}$ on trouve :

$$\exp\left(\frac{1}{2}\Delta t (L_x + L_y)\right)u^n = \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta t (L_x + L_y)\right)u^{n+1}$$

$$\exp\left(\frac{1}{2}\Delta t L_x\right)\exp\left(\frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^n = \exp\left(-\frac{1}{2}\Delta t L_x\right)\exp\left(-\frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^{n+1}$$

On peut trouver facilement que :

$$\left(1 - \frac{1}{2}\Delta t L_x\right)\left(1 - \frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^{n+1} = \left(1 + \frac{1}{2}\Delta t L_x\right)\left(1 + \frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^n \quad (5.47)$$

De cette dernière équation on peut construire le schéma suivant :

$$\begin{aligned} \left(1 - \frac{1}{2}\Delta t L_x\right)u^* &= \left(1 + \frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^n \\ \left(1 - \frac{1}{2}\Delta t L_y\right)u^{n+1} &= \left(1 + \frac{1}{2}\Delta t L_x\right)u^* \end{aligned} \quad (5.48)$$

La valeur de u^* est une approximation de $u^{n+\frac{1}{2}}$.

Ces deux équations (5.48) sont équivalentes à l'équation principale (5.45), la résolution de ces deux équation étant plus facile des autres méthode.

Le Maillage du domaine Ω :

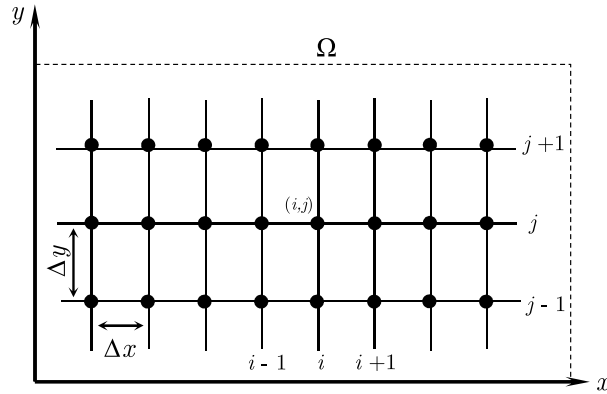


Figure 5.12 : Maillages du problème

$x_i = i\Delta x$ et $y_j = j\Delta y$ avec $i = 0, 1, \dots, I$ et $j = 0, 1, \dots, J$.et donc on aura :

$$\begin{aligned} L_x(u_{i,j}^n) &= -v_x \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + k \frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} \\ L_y(u_{i,j}^n) &= -v_y \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + k \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \end{aligned} \quad (5.49)$$

La discrétisation de notre équation suivant le schéma ADI est (5,50) :

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^n}{\frac{\Delta t}{2}} &= -v_x \frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} + k \frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - v_y \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + k \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \\ \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\frac{\Delta t}{2}} &= -v_x \frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} + k \frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - v_y \frac{u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta y} + k \frac{u_{i,j+1}^{n+1} - 2u_{i,j}^{n+1} + u_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} \end{aligned}$$

En réarrangeant les termes de ces deux équations (5.50) on aura :

$$\begin{cases} a_1^1 u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{i,j-1}^n + c_2^1 u_{i,j}^n + c_3^1 u_{i,j+1}^n \dots (1) \\ a_1^2 u_{i,j-1}^{n+1} + a_2^2 u_{i,j}^{n+1} + a_3^2 u_{i,j+1}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} \dots (2) \end{cases} \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} a_1^1 &= -\frac{v_x}{2\Delta x} - \frac{k}{\Delta x^2} & a_2^1 &= \frac{2}{\Delta t} + \frac{2k}{\Delta x^2} & a_3^1 &= \frac{v_x}{2\Delta x} - \frac{k}{\Delta x^2} \\ c_1^1 &= \frac{v_y}{2\Delta y} + \frac{k}{\Delta y^2} & c_2^1 &= \frac{2}{\Delta t} - \frac{2k}{\Delta y^2} & c_3^1 &= -\frac{v_y}{2\Delta y} + \frac{k}{\Delta y^2} \\ a_1^2 &= -\frac{v_y}{2\Delta y} - \frac{k}{\Delta y^2} & a_2^2 &= \frac{2}{\Delta t} + \frac{2k}{\Delta y^2} & a_3^2 &= \frac{v_y}{2\Delta y} - \frac{k}{\Delta y^2} \\ c_1^2 &= \frac{v_x}{2\Delta x} + \frac{k}{\Delta x^2} & c_2^2 &= \frac{2}{\Delta t} - \frac{2k}{\Delta x^2} & c_3^2 &= -\frac{v_x}{2\Delta x} + \frac{k}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (5.52)$$

Le schéma ADI pour ce système :

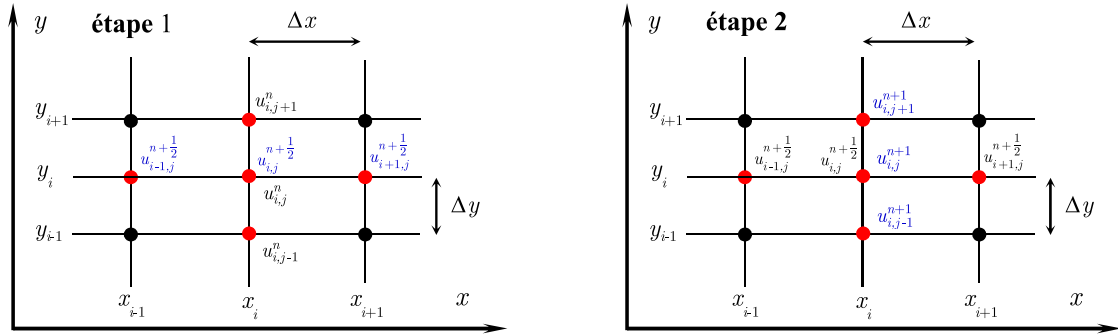


Figure 5.13 : Les étapes de la méthode ADI

Ces équations ADI correspondent à deux discrétisations de l'équation fondamentale à $t^{n+\frac{1}{2}}$ avec un pas de temps $\Delta t / 2$. La première correspond à une discrétisation entre t^n et $t^{n+\frac{1}{2}}$ avec une implication dans la direction x . La seconde à une discrétisation entre $t^{n+\frac{1}{2}}$ et t^{n+1} avec une implication dans la direction y . [21]

Pour notre équation : $\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$ on a : $v_y = 0$ Alors les coefficients

(5.52) devient :

$$\begin{aligned} a_1^1 &= -\frac{v_x}{2\Delta x} - \frac{k}{\Delta x^2} & a_2^1 &= \frac{2}{\Delta t} + \frac{2k}{\Delta x^2} & a_3^1 &= \frac{v_x}{2\Delta x} - \frac{k}{\Delta x^2} \\ c_1^1 &= \frac{k}{\Delta y^2} & c_2^1 &= \frac{2}{\Delta t} - \frac{2k}{\Delta y^2} & c_3^1 &= \frac{k}{\Delta y^2} \\ a_1^2 &= -\frac{k}{\Delta y^2} & a_2^2 &= \frac{2}{\Delta t} + \frac{2k}{\Delta y^2} & a_3^2 &= \frac{k}{\Delta y^2} \\ c_1^2 &= \frac{v_x}{2\Delta x} + \frac{k}{\Delta x^2} & c_2^2 &= \frac{2}{\Delta t} - \frac{2k}{\Delta x^2} & c_3^2 &= -\frac{v_x}{2\Delta x} + \frac{k}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

5.2.3.3.2. Ecriture matricielle des équations ADI

Ecriture matriciels de système ADI : pour l'équation (1)

$$\begin{aligned} i = 1 & \quad a_1^1 u_{0,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1,j-1}^n + c_2^1 u_{1,j}^n + c_3^1 u_{1,j+1}^n \\ i = 2 & \quad a_1^1 u_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2,j-1}^n + c_2^1 u_{2,j}^n + c_3^1 u_{2,j+1}^n \\ & \quad \vdots \\ i = I & \quad a_1^1 u_{I-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{I+1,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I,j-1}^n + c_2^1 u_{I,j}^n + c_3^1 u_{I,j+1}^n \end{aligned}$$

En utilisant les conditions aux limites de Dirichlet et de Neumann, on va éliminer les termes qui ne sont plus inclus avec le système.

$$\text{On a : } u(0, y, t) = 0 \quad \forall t, \forall y \in \left[0, \frac{L}{2} \left[\cup \right] \frac{L}{2}, L \right] \text{ donc : } u_{0,j \neq 0}^n = 0.$$

$$\text{On a : } \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \text{ donc : } \frac{u_{I+1,j}^n - u_{I-1,j}^n}{2\Delta x} = 0 \text{ ce qui implique : } u_{I+1,j}^n = u_{I-1,j}^n$$

Et pour le second membre :

Alors on aura un changement comme :

$$\begin{aligned} i = 1 & \quad a_1^1 u_{0,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1,j-1}^n + c_2^1 u_{1,j}^n + c_3^1 u_{1,j+1}^n \\ i = 2 & \quad a_1^1 u_{1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2,j-1}^n + c_2^1 u_{2,j}^n + c_3^1 u_{2,j+1}^n \\ & \vdots \\ i = I & \quad (a_1^1 + a_3^1) u_{I-1,j}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I,j}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I,j-1}^n + c_2^1 u_{I,j}^n + c_3^1 u_{I,j+1}^n \end{aligned}$$

Pour $j = 0$

$$\begin{aligned} i = 1 & \quad a_1^1 u_{0,0}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1,0}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2,0}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1,-1}^n + c_2^1 u_{1,0}^n + c_3^1 u_{1,1}^n \\ i = 2 & \quad a_1^1 u_{1,0}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2,0}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3,0}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2,-1}^n + c_2^1 u_{2,0}^n + c_3^1 u_{2,1}^n \\ & \vdots \\ i = I & \quad (a_1^1 + a_3^1) u_{I-1,0}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I,0}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I,-1}^n + c_2^1 u_{I,0}^n + c_3^1 u_{I,1}^n \end{aligned}$$

$$\text{On a } \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \text{ alors : } \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = \frac{u_{i,1}^n - u_{i,-1}^n}{2\Delta y} = 0 \Rightarrow u_{i,1}^n = u_{i,-1}^n$$

Pour $j = 1$

$$\begin{aligned} i = 1 & \quad a_1^1 u_{0,1}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1,1}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2,1}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1,0}^n + c_2^1 u_{1,1}^n + c_3^1 u_{1,2}^n \\ i = 2 & \quad a_1^1 u_{1,1}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2,1}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3,1}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2,0}^n + c_2^1 u_{2,1}^n + c_3^1 u_{2,2}^n \\ & \vdots \\ i = I & \quad (a_1^1 + a_3^1) u_{I-1,1}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I,1}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I,0}^n + c_2^1 u_{I,1}^n + c_3^1 u_{I,2}^n \end{aligned}$$

Pour $j = \frac{L}{2\Delta y}$

$$\begin{aligned}
i = 1 & \quad a_1^1 u_{0, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1, \frac{L}{2\Delta y}-1}^n + c_2^1 u_{1, \frac{L}{2\Delta y}}^n + c_3^1 u_{1, \frac{L}{2\Delta y}+1}^n \\
i = 2 & \quad a_1^1 u_{1, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2, \frac{L}{2\Delta y}-1}^n + c_2^1 u_{2, \frac{L}{2\Delta y}}^n + c_3^1 u_{2, \frac{L}{2\Delta y}+1}^n \\
& \vdots \\
i = I & \quad (a_1^1 + a_3^1) u_{I-1, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I, \frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I, \frac{L}{2\Delta y}-1}^n + c_2^1 u_{I, \frac{L}{2\Delta y}}^n + c_3^1 u_{I, \frac{L}{2\Delta y}+1}^n
\end{aligned}$$

Pour la concentration dans la position $(0, \frac{L}{2})$ qu'on la note $u_{0, \frac{L}{2\Delta y}}^n$ on prend la

valeur initiale au point de source.

Pour $j = J$

$$\begin{aligned}
i = 1 & \quad a_1^1 u_{0, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{1, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{2, J}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{1, J-1}^n + c_2^1 u_{1, J}^n + c_3^1 u_{1, J+1}^n \\
i = 2 & \quad a_1^1 u_{1, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{2, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{3, J}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{2, J-1}^n + c_2^1 u_{2, J}^n + c_3^1 u_{2, J+1}^n \\
& \vdots \\
i = I & \quad a_1^1 u_{I-1, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_2^1 u_{I, J}^{n+\frac{1}{2}} + a_3^1 u_{I+1, J}^{n+\frac{1}{2}} = c_1^1 u_{I, J-1}^n + c_2^1 u_{I, J}^n + c_3^1 u_{I, J+1}^n
\end{aligned}$$

$$\left. \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=L} = 0 \text{ alors : } \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=L} = \frac{u_{i, J+1}^n - u_{i, J-1}^n}{2\Delta y} = 0 \Rightarrow u_{i, J+1}^n = u_{i, J-1}^n.$$

$$\text{Remarque : } \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=L} = \frac{u_{i, J+1}^n - u_{i, J-1}^n}{2\Delta y} = 0 \Rightarrow u_{i, J+1}^n = u_{i, J-1}^n$$

Ecriture matriciels de système ADI : pour l'équation (2)

$$\begin{aligned}
j = 0 & \quad a_1^2 u_{i, -1}^{n+1} + a_2^2 u_{i, 0}^{n+1} + a_3^2 u_{i, 1}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1, 0}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i, 0}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1, 0}^{n+\frac{1}{2}} \\
j = 1 & \quad a_1^2 u_{i, 0}^{n+1} + a_2^2 u_{i, 1}^{n+1} + a_3^2 u_{i, 2}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1, 1}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i, 1}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1, 1}^{n+\frac{1}{2}} \\
j = 2 & \quad a_1^2 u_{i, 1}^{n+1} + a_2^2 u_{i, 2}^{n+1} + a_3^2 u_{i, 3}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1, 2}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i, 2}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1, 2}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j = J & \quad a_1^2 u_{i, J-1}^{n+1} + a_2^2 u_{i, J}^{n+1} + a_3^2 u_{i, J+1}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1, J}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i, J}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1, J}^{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

On a $u_{i, 1}^n = u_{i, -1}^n$ et $u_{i, J+1}^n = u_{i, J-1}^n$

Alors on aura un changement comme :

$$\begin{aligned}
j=0 \quad & a_1^2 u_{i,0}^{n+1} + (a_1^2 + a_3^2) u_{i,1}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1,0}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=1 \quad & a_1^2 u_{i,0}^{n+1} + a_2^2 u_{i,1}^{n+1} + a_3^2 u_{i,2}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1,1}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=2 \quad & a_1^2 u_{i,1}^{n+1} + a_2^2 u_{i,2}^{n+1} + a_3^2 u_{i,3}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1,2}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j=J \quad & (a_1^2 + a_3^2) u_{i,J-1}^{n+1} + a_2^2 u_{i,J}^{n+1} = c_1^2 u_{i-1,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{i,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{i+1,J}^{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

Pour $i = 1$:

$$\begin{aligned}
j=0 \quad & a_1^2 u_{1,0}^{n+1} + (a_1^2 + a_3^2) u_{1,1}^{n+1} = c_1^2 u_{0,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{1,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{2,0}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=1 \quad & a_1^2 u_{1,0}^{n+1} + a_2^2 u_{1,1}^{n+1} + a_3^2 u_{1,2}^{n+1} = c_1^2 u_{0,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{1,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{2,1}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=2 \quad & a_1^2 u_{1,1}^{n+1} + a_2^2 u_{1,2}^{n+1} + a_3^2 u_{1,3}^{n+1} = c_1^2 u_{0,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{1,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{2,2}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j=\frac{L}{2\Delta y} \quad & a_1^2 u_{1,\frac{L}{2\Delta y}-1}^{n+1} + a_2^2 u_{1,\frac{L}{2\Delta y}}^{n+1} + a_3^2 u_{1,\frac{L}{2\Delta y}+1}^{n+1} = c_1^2 u_{0,\frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{1,\frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{2,\frac{L}{2\Delta y}}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j=J \quad & (a_1^2 + a_3^2) u_{1,J-1}^{n+1} + a_2^2 u_{1,J}^{n+1} = c_1^2 u_{0,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{1,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{2,J}^{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

On a : $u_{-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = 0$. Et on prend $u_{0,\frac{L}{2\Delta y}}^n$ la valeur initiale au point de source.

Pour $i = 2$:

$$\begin{aligned}
j=0 \quad & a_2^2 u_{2,0}^{n+1} + (a_1^2 + a_3^2) u_{2,1}^{n+1} = c_1^2 u_{1,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{2,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{3,0}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=1 \quad & a_1^2 u_{2,0}^{n+1} + a_2^2 u_{2,1}^{n+1} + a_3^2 u_{2,2}^{n+1} = c_1^2 u_{1,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{2,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{3,1}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=2 \quad & a_1^2 u_{2,1}^{n+1} + a_2^2 u_{2,2}^{n+1} + a_3^2 u_{2,3}^{n+1} = c_1^2 u_{1,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{2,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{3,2}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j=J \quad & (a_1^2 + a_3^2) u_{2,J-1}^{n+1} + a_2^2 u_{2,J}^{n+1} = c_1^2 u_{1,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{2,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{3,J}^{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

Pour $i = I$:

$$\begin{aligned}
j=0 \quad & a_2^2 u_{I,0}^{n+1} + (a_1^2 + a_3^2) u_{I,1}^{n+1} = c_1^2 u_{I-1,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{I,0}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{I+1,0}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=1 \quad & a_1^2 u_{I,0}^{n+1} + a_2^2 u_{I,1}^{n+1} + a_3^2 u_{I,2}^{n+1} = c_1^2 u_{I-1,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{I,1}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{I+1,1}^{n+\frac{1}{2}} \\
j=2 \quad & a_1^2 u_{I,1}^{n+1} + a_2^2 u_{I,2}^{n+1} + a_3^2 u_{I,3}^{n+1} = c_1^2 u_{I-1,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{I,2}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{I+1,2}^{n+\frac{1}{2}} \\
& \vdots \\
j=J \quad & (a_1^2 + a_3^2) u_{I,J-1}^{n+1} + a_2^2 u_{I,J}^{n+1} = c_1^2 u_{I-1,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_2^2 u_{I,J}^{n+\frac{1}{2}} + c_3^2 u_{I+1,J}^{n+\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

On a : $u_{I+1,j}^n = u_{I-1,j}^n$

On aura d'après ses développements un $J + 1$ systèmes linéaires dans chaque système il y a I équations de I inconnues pour l'équation (1). Et I systèmes linéaires dans chaque système $J + 1$ équations de $J + 1$ inconnues pour l'équation (2).

On peut l'écrire sous la forme de : $A_{i,j}^1 x = B_i^1$ pour l'équation (1) et $A_{i,j}^2 x = B_i^2$ pour l'équation (2) en tenant compte les changements indiqués.

$$\begin{pmatrix} \ddots & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_1^1 & a_2^1 & a_3^1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ u_{i-1,j} \\ u_{i,j} \\ u_{i+1,j} \\ \vdots \end{pmatrix}^{n+\frac{1}{2}} = \begin{pmatrix} \vdots \\ c_1^1 u_{i-1,j-1} + c_2^1 u_{i-1,j} + c_3^1 u_{i-1,j-1} \\ c_1^1 u_{i,j-1} + c_2^1 u_{i,j} + c_3^1 u_{i,j-1} \\ c_1^1 u_{i+1,j-1} + c_2^1 u_{i+1,j} + c_3^1 u_{i+1,j-1} \\ \vdots \end{pmatrix}^n \quad (5,53)$$

$$\begin{pmatrix} \ddots & \ddots & 0 & \dots & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_1^2 & a_2^2 & a_3^2 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \dots & 0 & \ddots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ u_{i,j-1} \\ u_{i,j} \\ u_{i,j+1} \\ \vdots \end{pmatrix}^{n+1} = \begin{pmatrix} \vdots \\ c_1^2 u_{i-1,j-1} + c_2^2 u_{i,j-1} + c_3^2 u_{i+1,j-1} \\ c_1^2 u_{i-1,j} + c_2^2 u_{i,j} + c_3^2 u_{i+1,j} \\ c_1^2 u_{i-1,j+1} + c_2^2 u_{i,j+1} + c_3^2 u_{i+1,j+1} \\ \vdots \end{pmatrix}^{n+\frac{1}{2}} \quad (5,54)$$

Les matrices : $A_{i,j}^1$ et $A_{i,j}^2$ sont tri-diagonales de dimension I et $J + 1$ respectivement, avec des changements sur les positions déjà conditionnées.

5.2.3.3. Stabilité du schéma

L'analyse de Fourier a montré que le coefficient d'amplification des deux schémas (5,51) est :

$$A(\omega_1, \omega_2) = \frac{\Psi^{n+1}}{\Psi^n} = \frac{a_1 - 1 + ib_1}{a_1 + 1 + ib_1} \frac{a_2 - 1 + ib_2}{a_2 + 1 + ib_2} \quad \text{avec: } a_1 = \frac{k\Delta t}{\Delta x^2} (1 - \cos \omega_1 dx),$$

$$b_1 = \frac{v_x \Delta t}{\Delta x^2}, \quad a_2 = \frac{k\Delta t}{\Delta y^2} (1 - \cos \omega_2 dy), \quad b_2 = \frac{v_y \Delta t}{\Delta y^2}. \quad (5.35)$$

Le carré du module du $A(\omega_1, \omega_2)$ est :

$$\left| A(\omega_1, \omega_2) \right|^2 = \frac{(a_1 - 1)^2 + b_1^2}{(a_1 + 1)^2 + b_1^2} \frac{(a_2 - 1)^2 + b_2^2}{(a_2 + 1)^2 + b_2^2} \leq 1 \quad \forall \omega_1, \omega_2$$

Il est inférieur à 1 de sorte que a_1 et a_2 sont positifs, d'où le schéma ADI est inconditionnellement stable.

5.2.3.3.4. Analyse de la consistance

Pour cela on fait le demi-somme des deux équations (5,51) pour obtenir :

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} = & -v_x \left(\frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x} \right) - \frac{v_y}{2} \left(\frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} + \frac{u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j-1}^{n+1}}{2\Delta y} \right) + k \left(\frac{u_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + u_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right) \\ & + \frac{k}{2} \left(\frac{u_{ij+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{ij+1}^{n+1} - 2u_{i,j}^{n+1} + u_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} \right) \end{aligned}$$

dans cette équation, on substitue la solution approchée par la solution exacte, et on effectue des développements limités autour de : $u_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = u(i\Delta x, j\Delta x, (n+1/2)\Delta t)$, et après soustraction de la solution exacte on va trouver l'erreur de troncature ε qui est en $\mathcal{O}(\Delta t^2, \Delta x^2, \Delta y^2)$. Donc le schéma ADI étant consistant avec la solution exacte et d'ordre deux en temps et en espace. [21]

5.3. Résultats et discussion

5.3.1. Variations de la concentration « résultats analytiques »

Considérons un panache dispersé selon les conditions suivantes :

- Une fuite de gaz naturel depuis un gazoduc.
- Une vitesse moyenne du vent vaut : **2.5 m/s**
- Un débit de fuite initial est de : **1.6 kg/s** déjà trouvé pour un diamètre d'orifice vaut : 10 mm, voir (chapitre 04).
- L'axe des abscisses est parallèle à celui du gazoduc.
- la fuite peut être considérée dans le sol on négligera donc la hauteur H .

On choisit la classe de la stabilité en réalisant les conditions du tableau 3.6. pour des conditions rurales.

Pour la classe D on suppose une vitesse moyenne du vent vaut : **3 m/s** pour s'adapter avec les considérations du tableau 3.6.

5.3.1.1. Variations de la concentration selon les classes de stabilités

1. On étudie les variations de la concentration suivant l'axe (xx'), en posant $y = 0$ et $z = 0$. On obtient grâce à la formule (5.37) le graphe suivant :

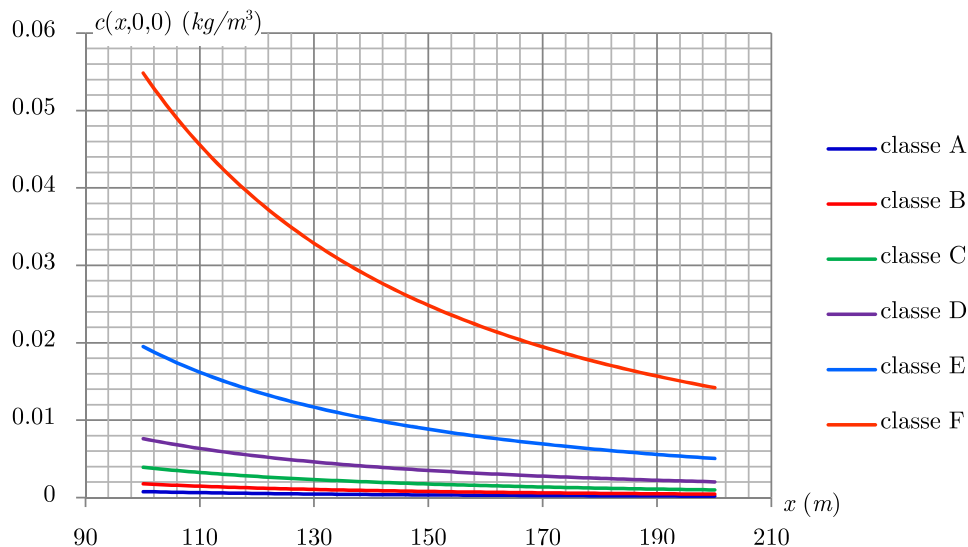


Figure 5.14 : Variation de la concentration du nuage en fonction de la position x dans des classes différents de stabilités dans les conditions rurales

Suivant l'hypothèse qu'on a fait dans les conditions aux limites il est clair que la concentration du gaz rejeté diminue en fonction de la position x , mais en fonction de la

classe de la stabilité dans une position x la concentration étant élevée dans les atmosphères les plus stables « E,F » et faible dans les atmosphères instables.

On conclue donc, que la stabilité de l'atmosphère fait ralentir la dispersion du gaz.

5.3.1.2. Variations de la concentration dans un plan horizontal

On étudie dans ce cas la variation de la concentration du gaz dans le plan (xOy) c'est-à-dire pour $z = 0$:

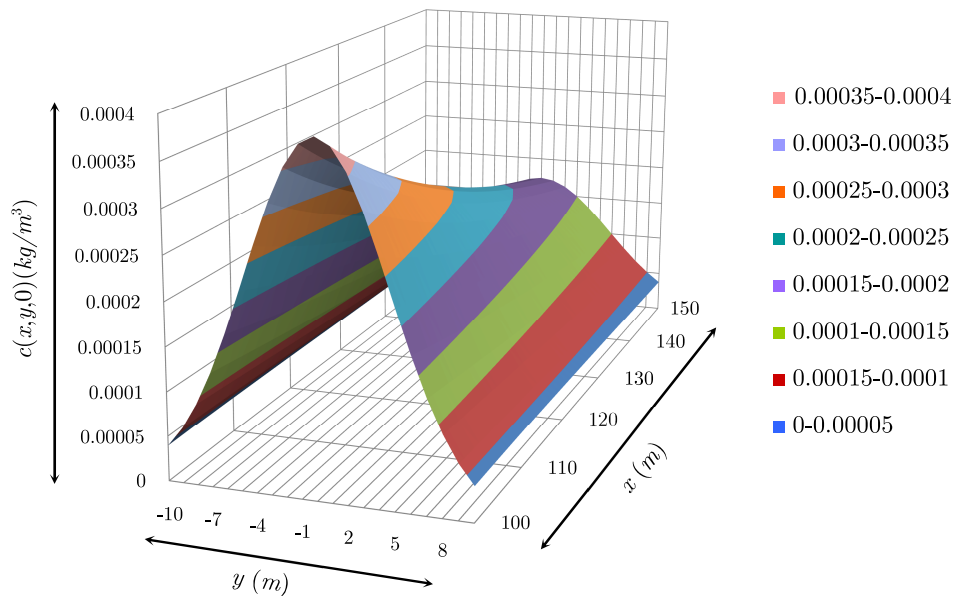


Figure 5.15 : Variation de la concentration du nuage en fonction de x et y . (classe A)

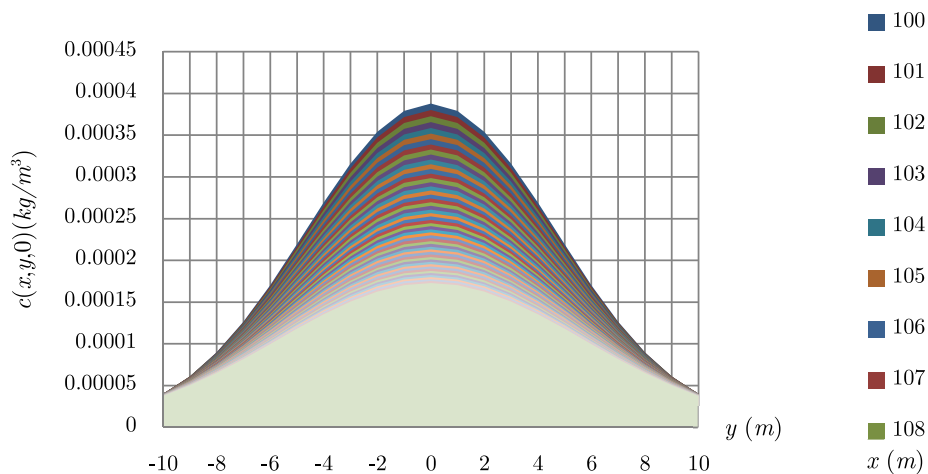


Figure 5.16 : Variation de la concentration du nuage vue de face de la figure 5.16.

La concentration du gaz rejeté diminue suivant l'axe des abscisses (x), et elle augmente dans l'intervalle négative des (y) car on est en train d'approcher vers l'axe :

($y = 0$ et $z = 0$) ou le point source existe d'où l'augmentation de la concentration, puis elle prend une valeur maximale, et diminue dans l'intervalle positive de fait de l'éloignement du point source.

L'augmentation et la diminution de la concentration suivant l'axe (y), et la diminution suivant l'axe des (x) prend une forme gaussienne comme il est indiqué dans la figure 5.5.

5.3.1.3. Variations de la concentration selon le taux de fuite

Pour permettre de simuler cette variation on va considérer des différents taux de fuite puis on trace les courbes de variation de la concentration dans les classes A et D.

On varie les taux de fuite comme suit :

$$Q_m = 1.5 \text{ kg/s}, Q_m = 3 \text{ kg/s}, Q_m = 6 \text{ kg/s} \text{ et } Q_m = 12 \text{ kg/s}$$

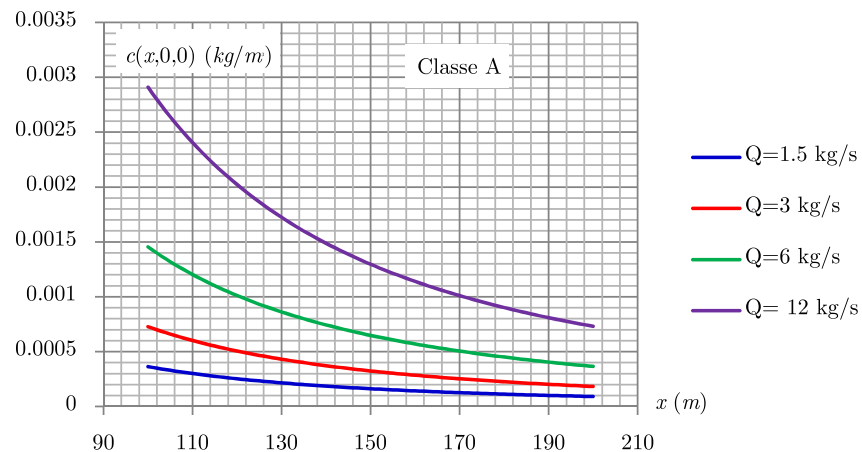


Figure 5.17 : Variation de la concentration du nuage en fonction de taux de fuite (classe A)

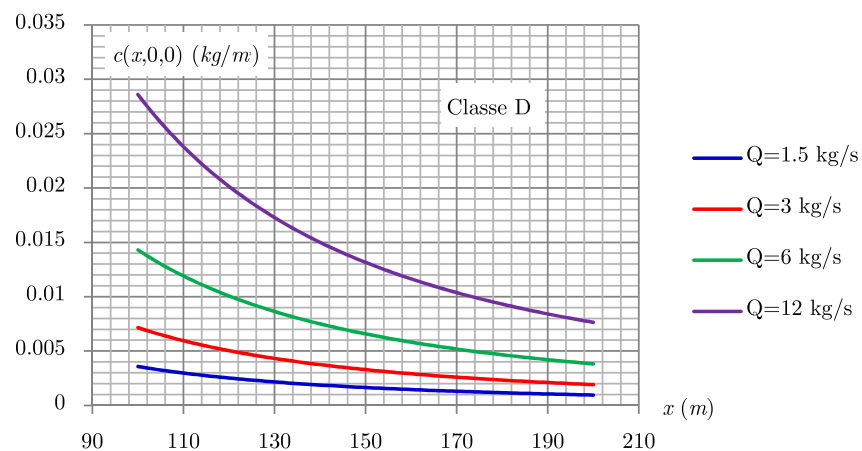


Figure 5.18 : Variation de la concentration du nuage en fonction de taux de fuite (classe D)

Pratiquement, on trouve les mêmes graphes pour des classes de stabilités différentes.

La figure 5.17 et 5.18 montre l'influence de taux de fuite sur la concentration du nuage (panache) ; alors depuis ces graphes, la concentration du gaz augmente avec l'augmentation de taux de fuite.

5.3.1.4. Les courbes d'iso-concentration dans le plan ($z = 0$)

Dans cette partie on va simuler la variation de la concentration dans un plan horizontal $z = 0$ pour savoir la distribution de la concentration du gaz naturel dans ce plan.

On simule la concentration du gaz déchargé dans l'atmosphère pour deux débits de fuite différents :

$$Q_m = 1.6 \text{ kg/s} ;$$

$$Q_m = 6.4 \text{ kg/s} ;$$

Ces débits sont les taux de fuite pour les diamètres d'orifice : 10 mm et 20 mm respectivement. (Chapitre 04).

On trace les courbes des iso-concentrations pour les classes de stabilité :

- A : Atmosphère extrêmement instable ;
- D : Atmosphère neutre ;
- F : Atmosphère modérément stable.

Les écarts types de la distribution sont pris pour des conditions rurales (chapitre 03, Tableau 3.3) :

- Pour la classe de stabilité A : on a pris une vitesse du vent égale 2.5 m/s pour un fort rayonnement solaire ;
- Pour la classe de stabilité D : on a pris une vitesse du vent égale 4.5 m/s pour une nébulosité supérieure à 50% ;
- Pour la classe de stabilité F : on a pris une vitesse du vent égale 1.5 m/s pour une nébulosité inférieure à 50%.

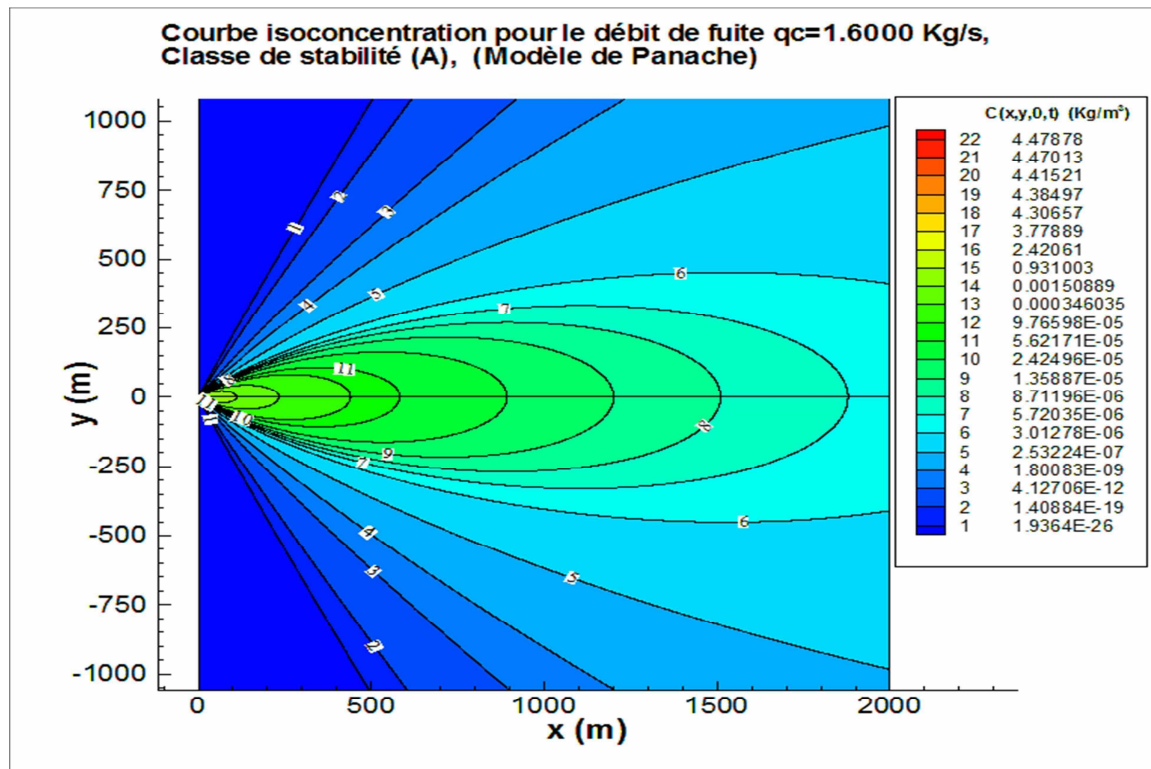


Figure 5.19 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe A)

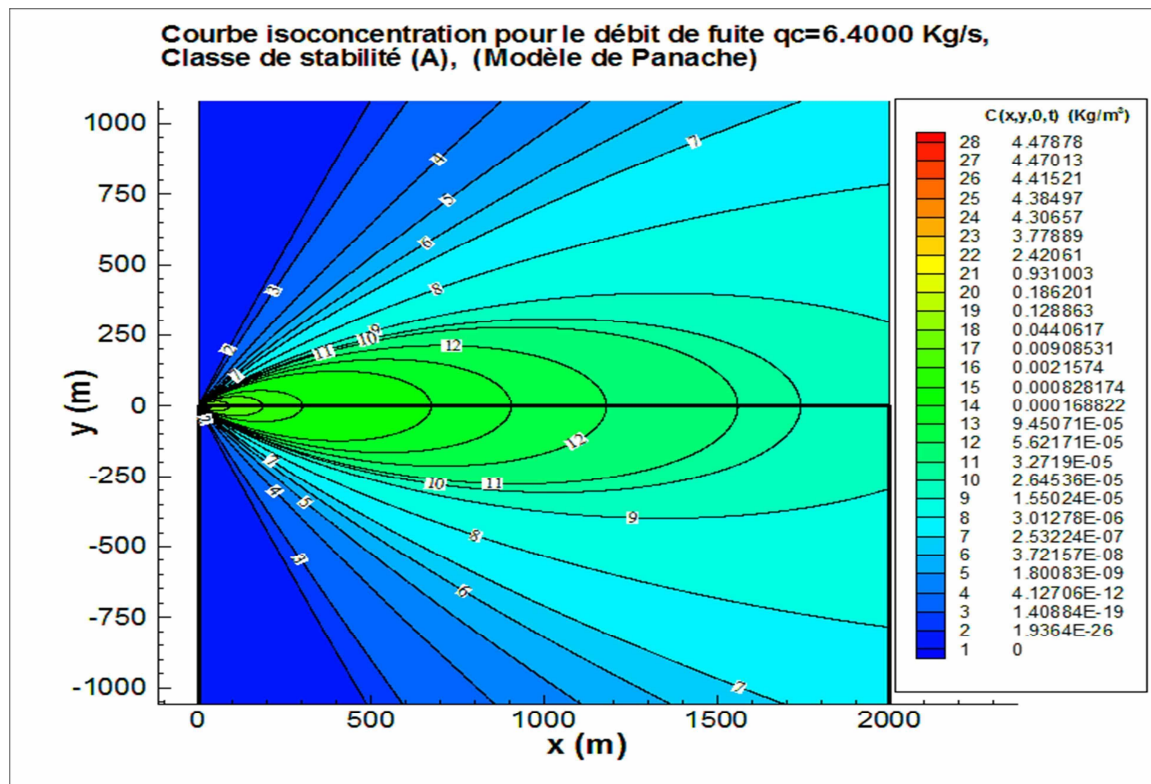


Figure 5.20 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 6.4 kg/s (classe A)

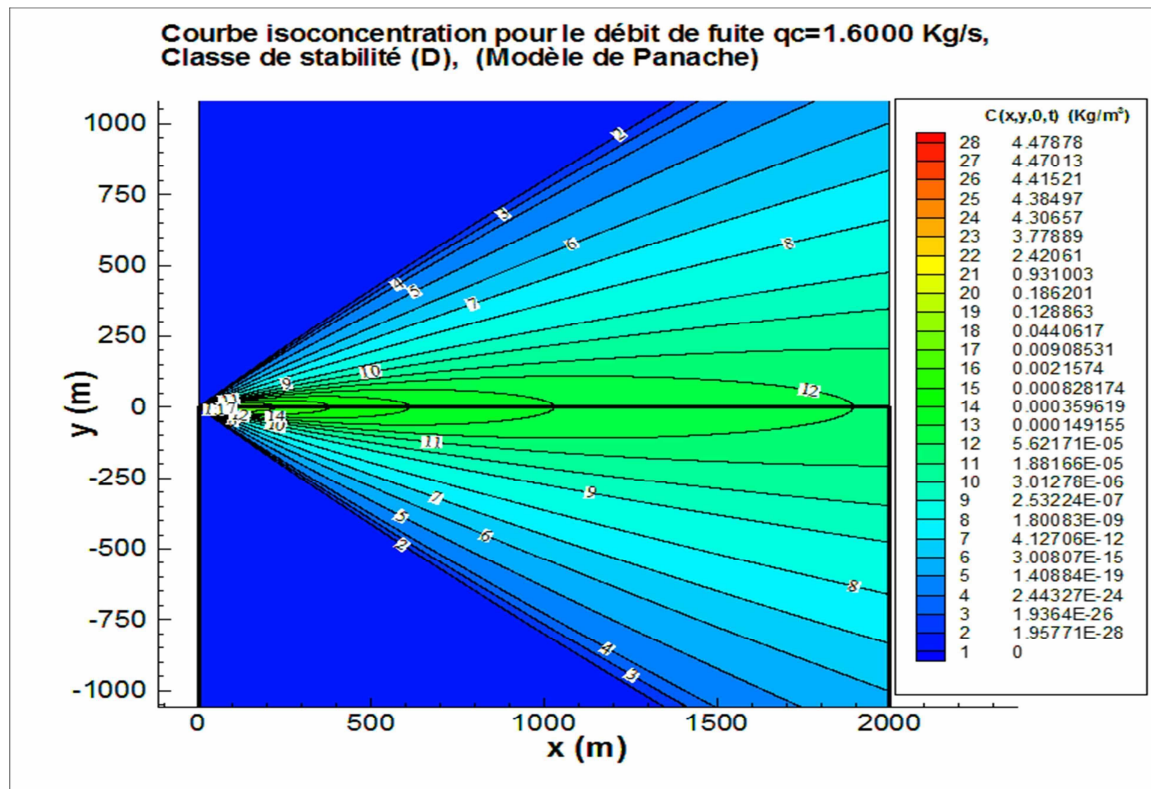


Figure 5.21 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

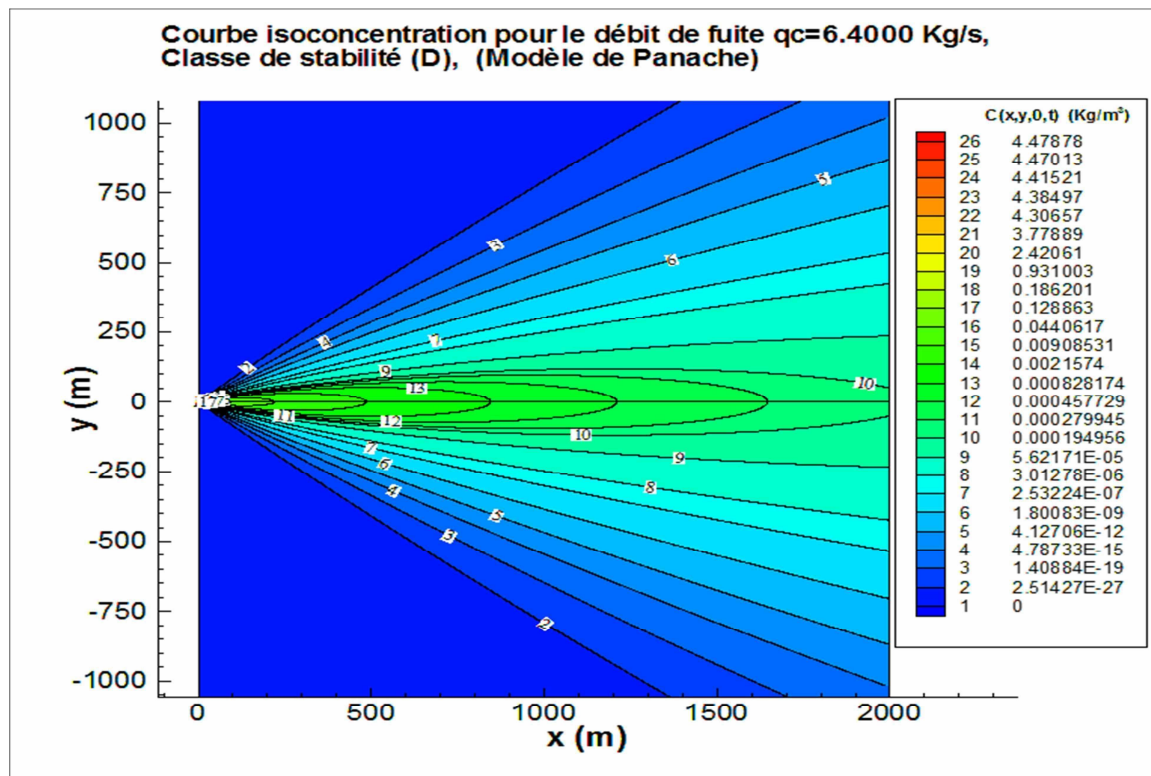


Figure 5.22 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

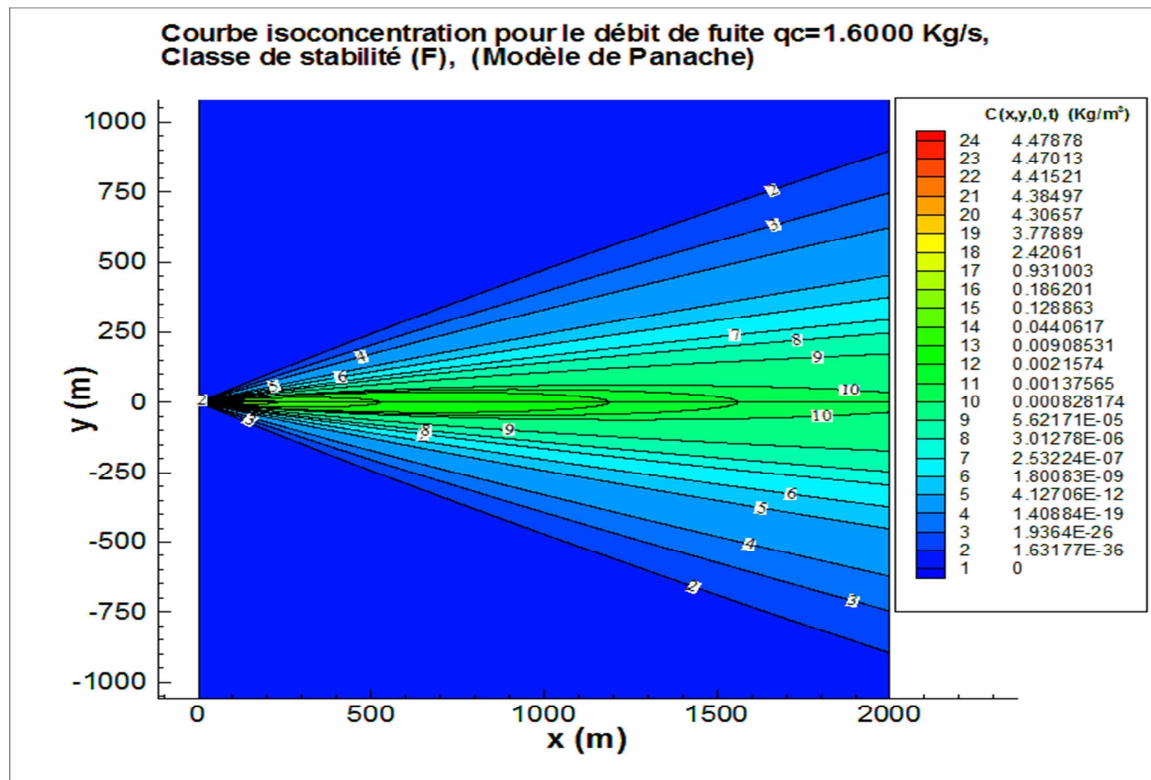


Figure 5.23 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

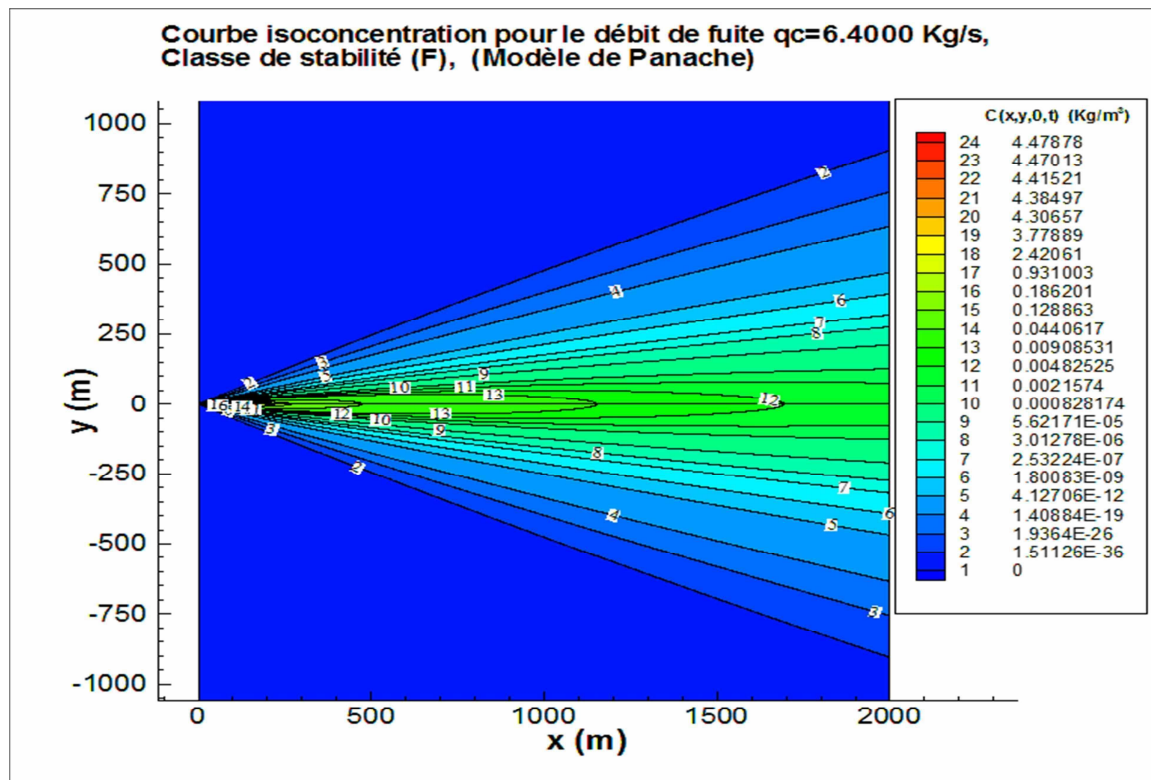


Figure 5.24 : Courbes des iso-concentrations pour un débit de fuite vaut 1.6 kg/s (classe D)

Analyse des courbes

L'appréciation qu'on peut donner en analysant les figures ci-dessus qui montrent les courbes d'iso-concentrations d'une fuite de gaz naturel dans un gazoduc est la suivante :

En première vue, on remarque que les contours de la concentration ont les mêmes allures, mais la différence réside dans ses tailles, cette différence est due aux taux de fuite, c'est-à-dire plus le taux de fuite est petit plus les surfaces des courbes sont plus petites.

Un peu plus précisément, on constate que la vitesse de diminution de la concentration du nuage gazeux dépend de la classe de stabilité atmosphérique, autrement dit plus l'atmosphère est stable plus la concentration du gaz diminue moins rapidement, ce dernier point nous montre l'influence phénoménale qui peuvent avoir les classes de stabilité sur la dispersion du nuage gazeux, c'est pourquoi il est indispensable de considérer les classes de stabilité pour étudier les fuites du gaz naturel et leurs dispersions.

5.3.1.5. Variation de la concentration du gaz déchargé à différentes hauteurs

Dans cette partie on va étudier l'influence de la hauteur z sur la variation de la concentration de gaz dispersé (gaz naturel) c'est-à-dire on va tracer les courbes d'iso-concentrations de nuage (panache) à différents niveaux de hauteur en commençant par $z=0$ on va prendre les conditions suivantes :

Le taux de fuite : $Q_m = 1.6 \text{ kg/s}$;

Une vitesse du vent vaut : $u = 3.5 \text{ m/s}$ dans la direction de x -positive pour la classe de stabilité D.

Les écarts type sont pris cette fois-ci pour des conditions urbaines.

Ces courbes sont obtenues en posant des valeurs différentes de la concentration de gaz $c(x, y, z) = m$ et à chaque fois, on trace les courbes de l'équation paramétrique : $y_m^2 = f(x)$.

Les courbes d'iso-concentrations Pour : $z = 0 \text{ m}$

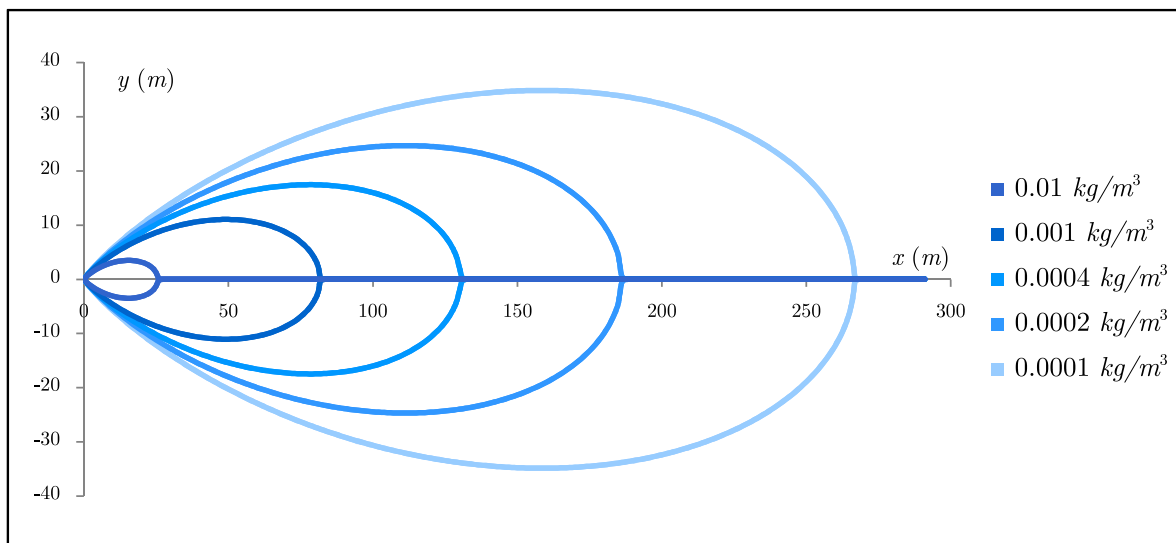


Figure 5.25 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 0 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentrations Pour : $z = 3 \text{ m}$

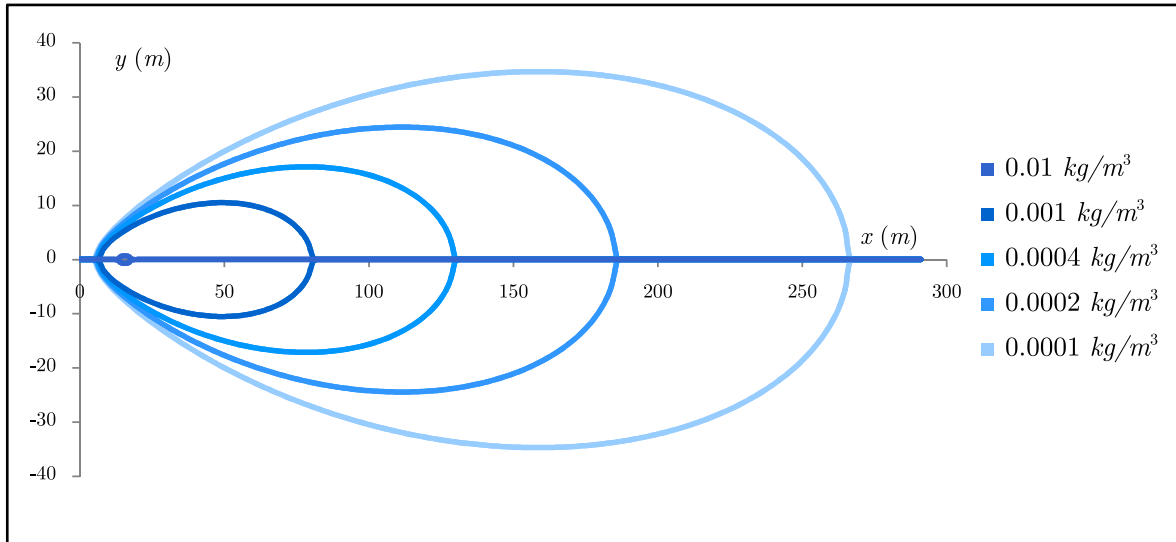


Figure 5.26 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 3 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentrations Pour : $z = 7 \text{ m}$

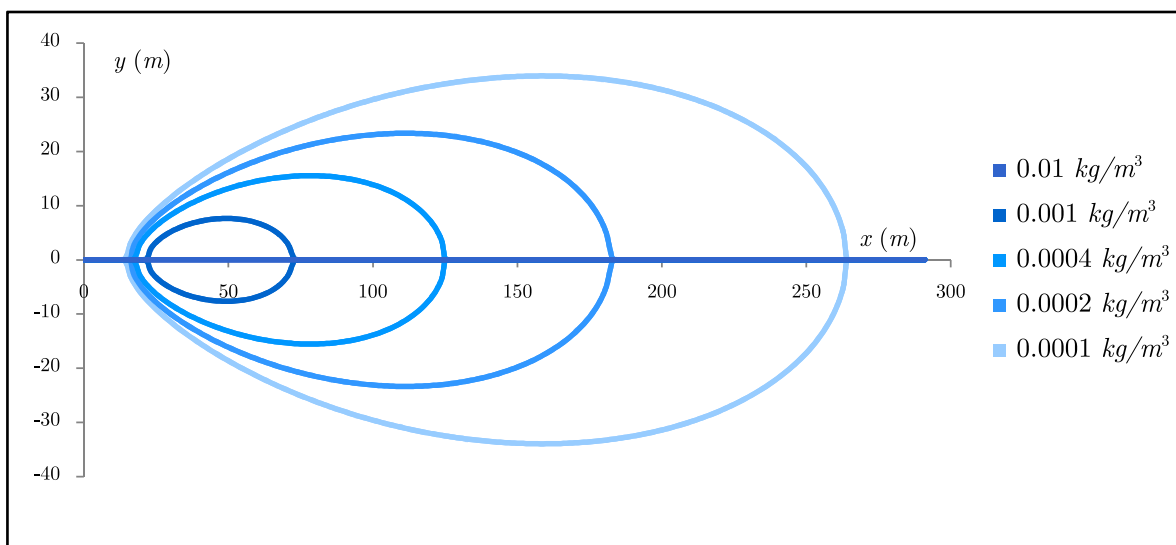


Figure 5.27 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 7 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentrations Pour : $z = 10 \text{ m}$

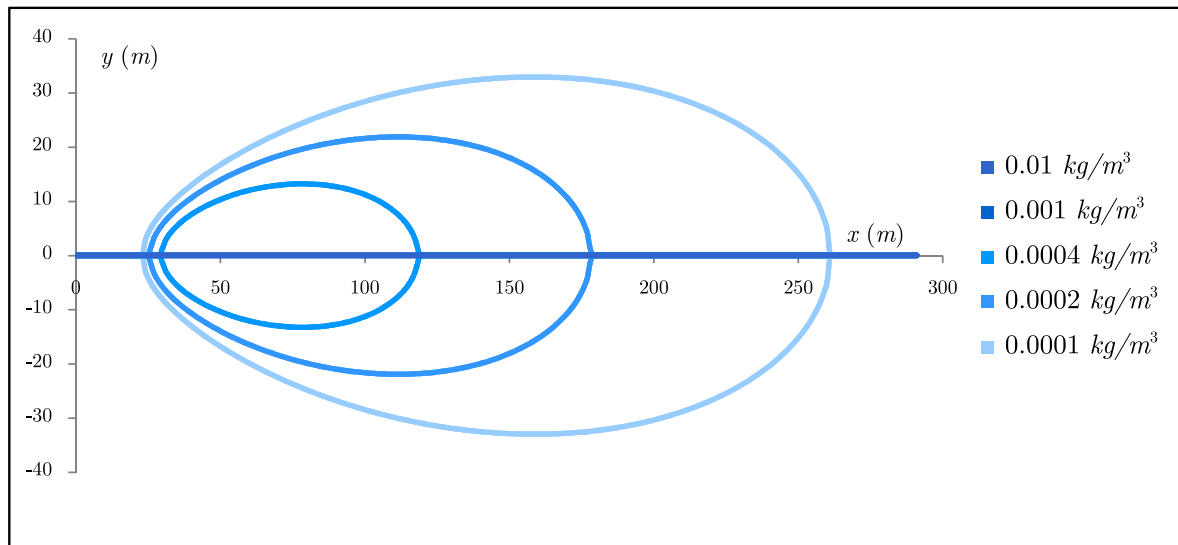


Figure 5.28 : Les courbes d'iso-concentration dans le plan $z = 10 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentration Pour : $z = 14 \text{ m}$

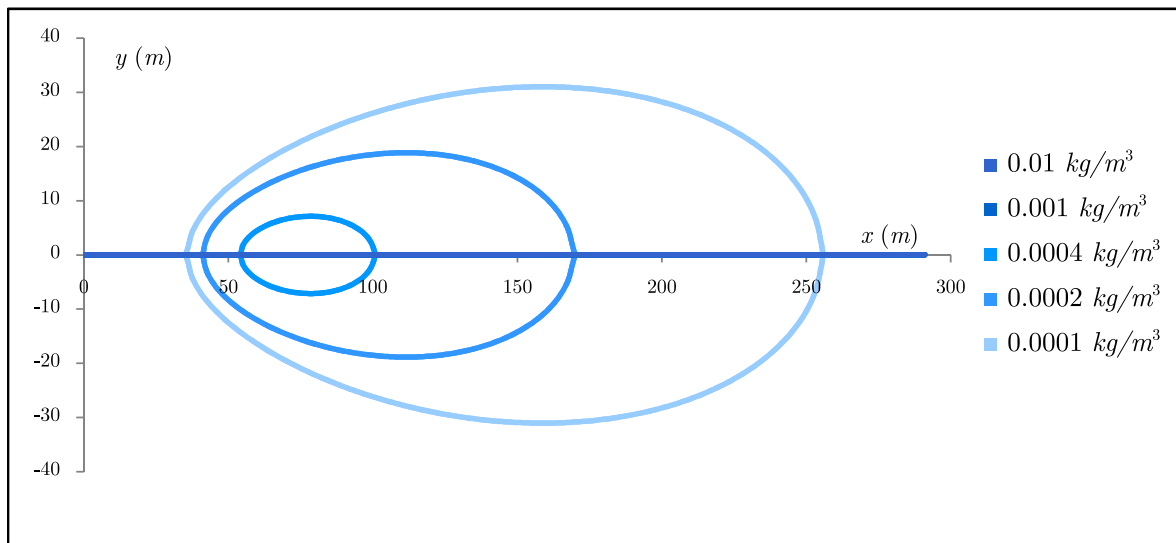


Figure 5.29 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 14 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentration Pour : $z = 16 \text{ m}$

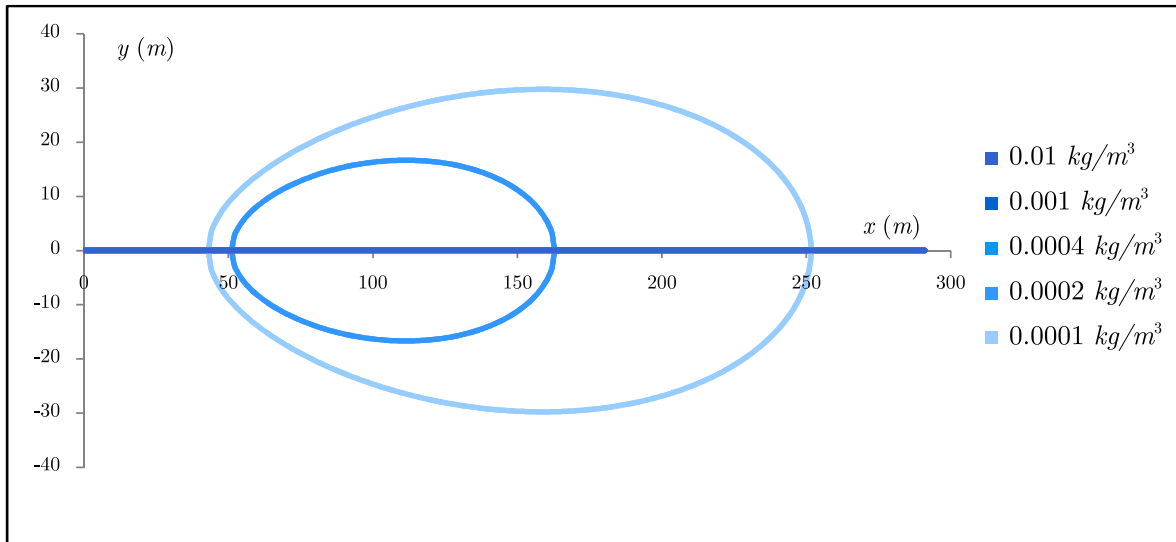


Figure 5.30 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 16 \text{ m}$ (classe D)

Les courbes d'iso-concentration Pour : $z = 22 \text{ m}$

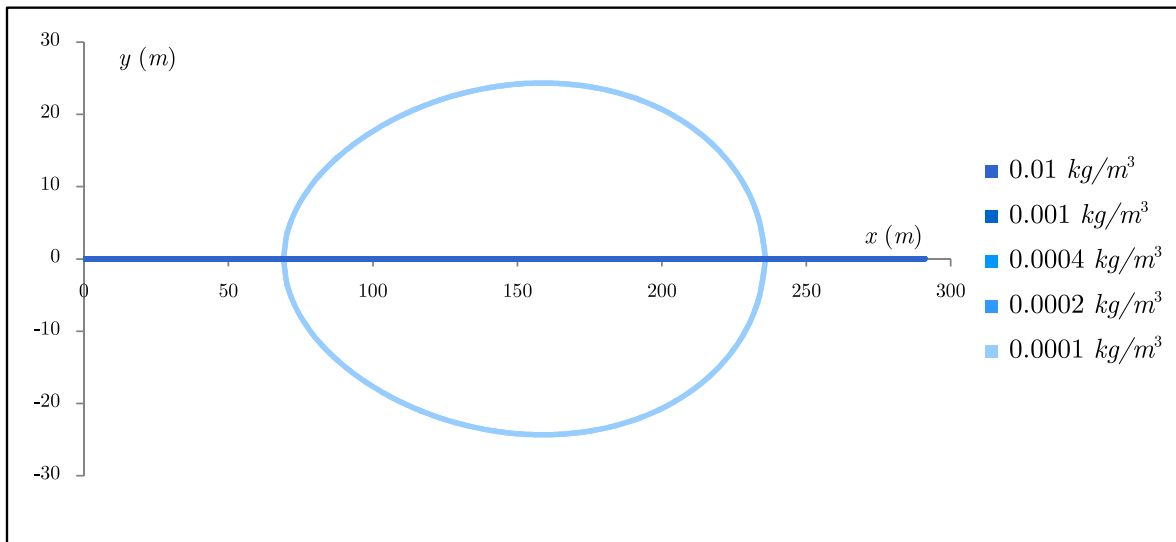


Figure 5.31 : Les courbes d'iso-concentrations dans le plan $z = 22 \text{ m}$ (classe D)

Analyse des courbes

Nos résultats obtenus ne sont pas précisément associés à la forme précise du modèle utilisé dans ce chapitre.

Dans cette expérience, on a choisi cinq valeurs différentes de la concentration du gaz déchargés dans l'atmosphère et on a suivi leur variation en fonction de la hauteur dans des zones supposées horizontales.

D'après ces figures, on remarque que certaines courbes d'iso-concentrations de telle valeur se disparaissent en fonction de la hauteur, plus la hauteur augmente plus les courbes d'iso-concentrations se convergent vers un point (la figure 5.26) montre bien ce fait, puis elle devient nulle, ceci est une preuve que la concentration diminue avec la hauteur.

Ces courbes montrent que les concentrations de même valeur en modèle 3D prennent la forme des surfaces qu'on peut appeler : les surfaces d'iso-concentrations.

Les concentrations les plus faibles se trouvent à des distances loines du point source et occupent des surfaces assez importantes de l'atmosphère que celles de plus grandes concentrations.

5.3.2. Variations de la concentration « résultats numérique »

5.3.2.1. Formulation du problème

Dans cette partie on va simuler les concentrations d'une fuite de gaz naturel dans l'atmosphère plus précisément dans un plan horizontal $z = 0$. On se basant sur la méthode numérique qu'on déjà énoncée « **Méthode de différences finies -ADI-** »

Le schéma suivant décrit ce processus :

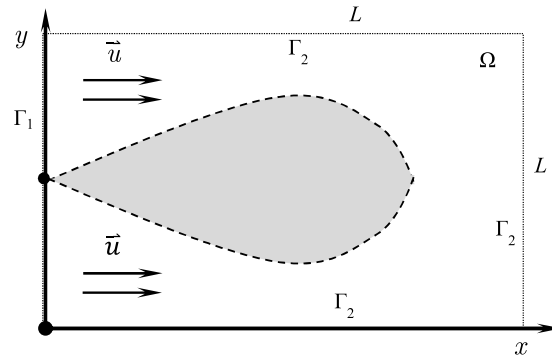


Figure 5.32 : Schéma simplifiant le domaine d'étude

On va étudier la résolution de l'équation d'advection-diffusion en tenant compte les conditions suivantes :

- Le domaine d'étude est supposé carré de longueur de côté : $L = 1 \text{ m}$.
- Le gazoduc est en position horizontale et coïncide avec l'axe des ordres (Oy).
- La fuite du gaz a lieu dans la partie supérieure de la paroi dont l'orifice est supposé ponctuel et situant à la position $(0, \frac{1}{2})$ comme le schéma indique.
- Une vitesse du vent suivant la direction de x -positive et vaut : $v_x = 0.1 \text{ m/s}$.
- Un coefficient de diffusivité atmosphérique k constant et vaut : $k = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Une concentration de gaz à la position du point de source constante dans le temps puisque on a supposé que le taux de fuite est constant, on va varier ses valeurs comme suit : $c(0, \frac{1}{2}, t) = 5 ; 50 ; 100 ; 150 \text{ kg / m}^3$.

Le but : est de tracer les courbes d'iso-concentrations du gaz naturel dispersé en se basant sur la méthode ADI. Dans une période assez longue, on peut supposer donc que le régime est permanent.

5.3.2.2. Variation de la concentration en fonction de la position x

pour une concentration initiale au point source variable et une vitesse $v_x = 0,1 \text{ m/s}$

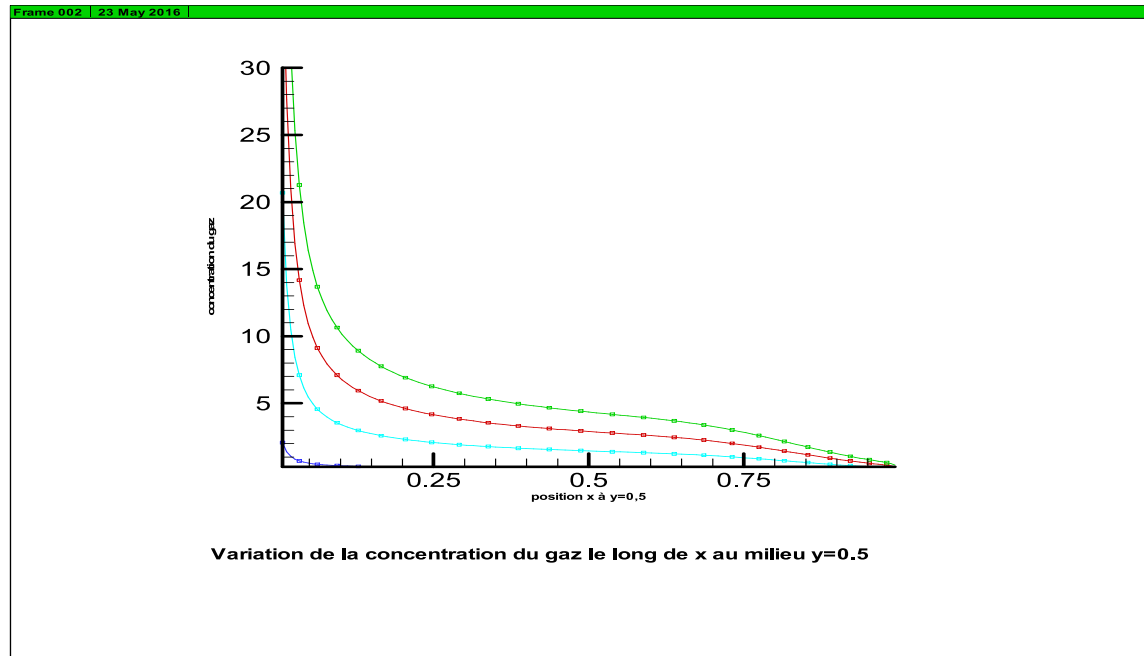
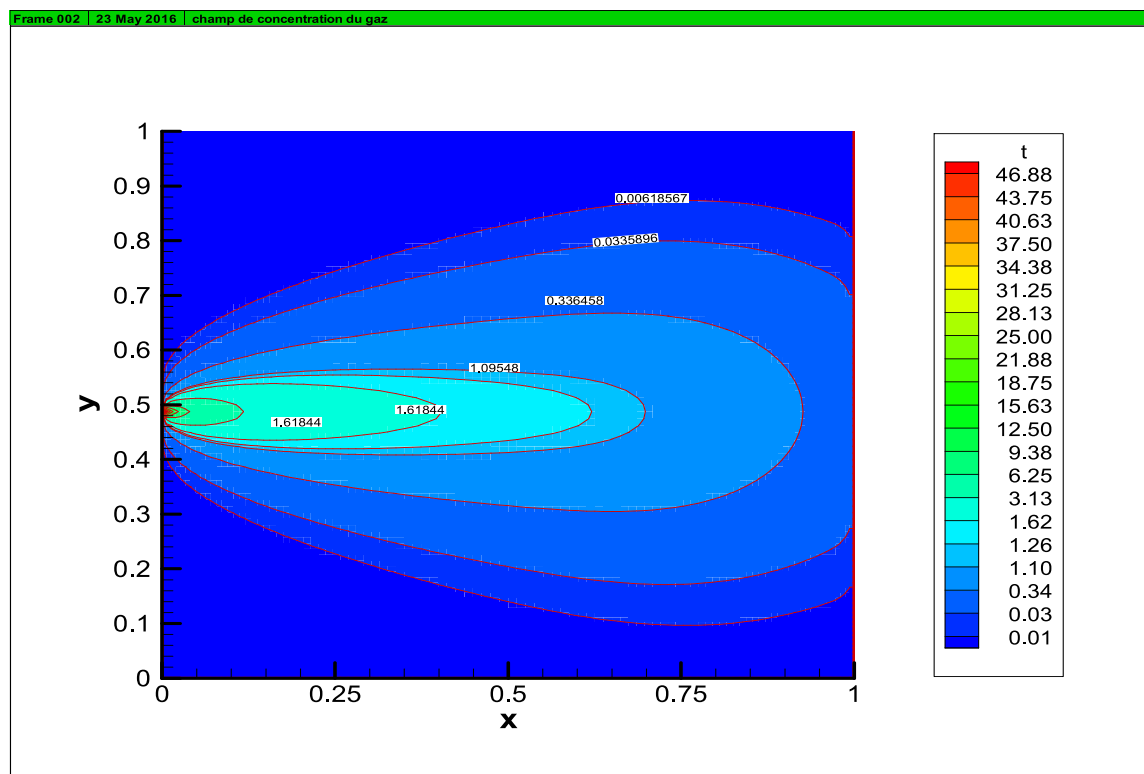
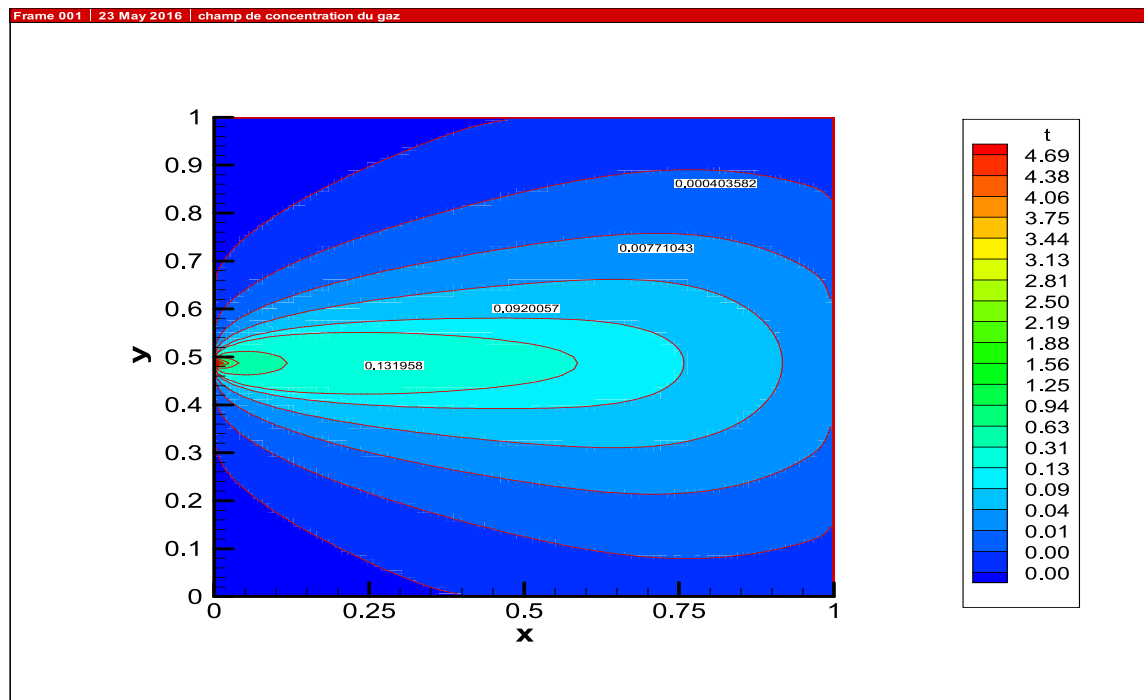


Figure 5.33 : Variations de la concentration en fonction de la position x

Les courbes de la figure 5.33 représentent les variations de la concentration du gaz déchargé suivant l'axe x (axe de direction du vent), en remarque d'après cette figure que la concentration diminue en s'éloignant de point de source jusqu'à attendre des concentrations relativement faibles aux voisinages de la frontière.

Il est clairement remarquable que l'allure de ces courbes prend des formes de demies cloches de sommets $(0, c_{\max})$ c'est-à-dire la diminution de la concentration en fonction de x suit un modèle gaussien, le résultat est logique car on s'est basé sur des équations de ce modèle.

5.3.2.3. Les courbes des iso-concentration



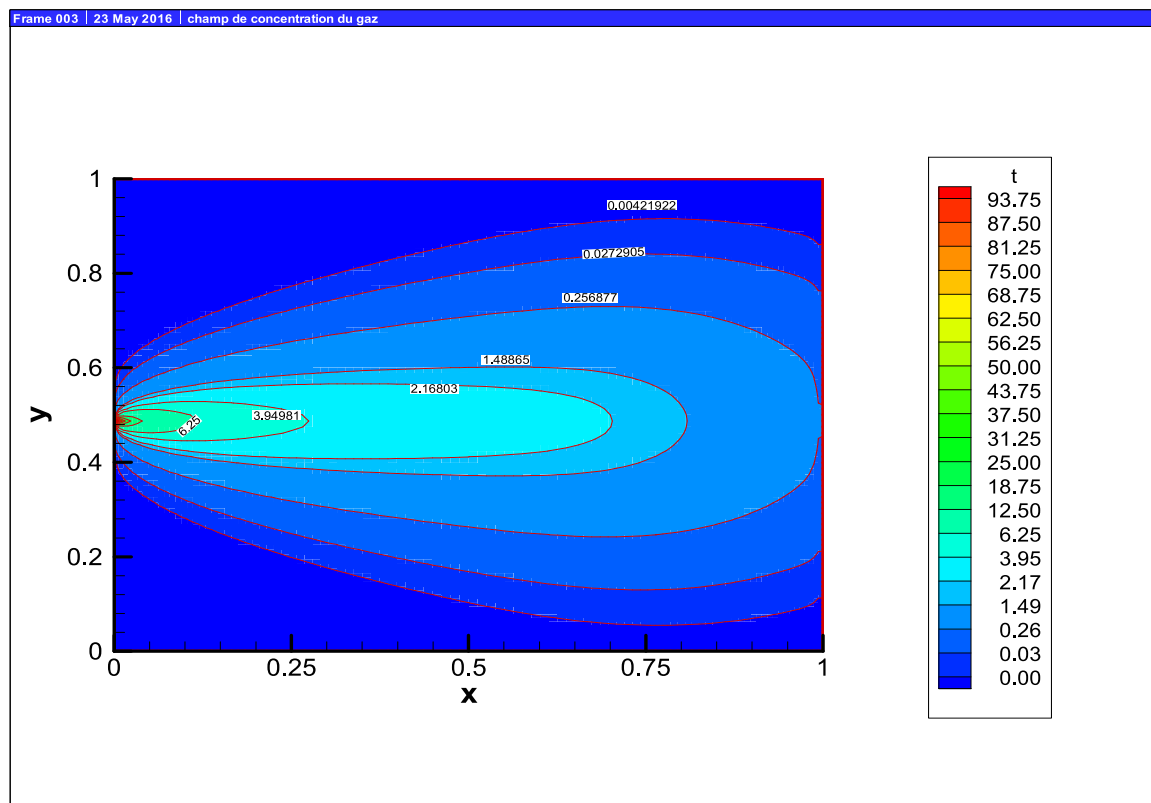


Figure 5.36 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 100 kg/m^3

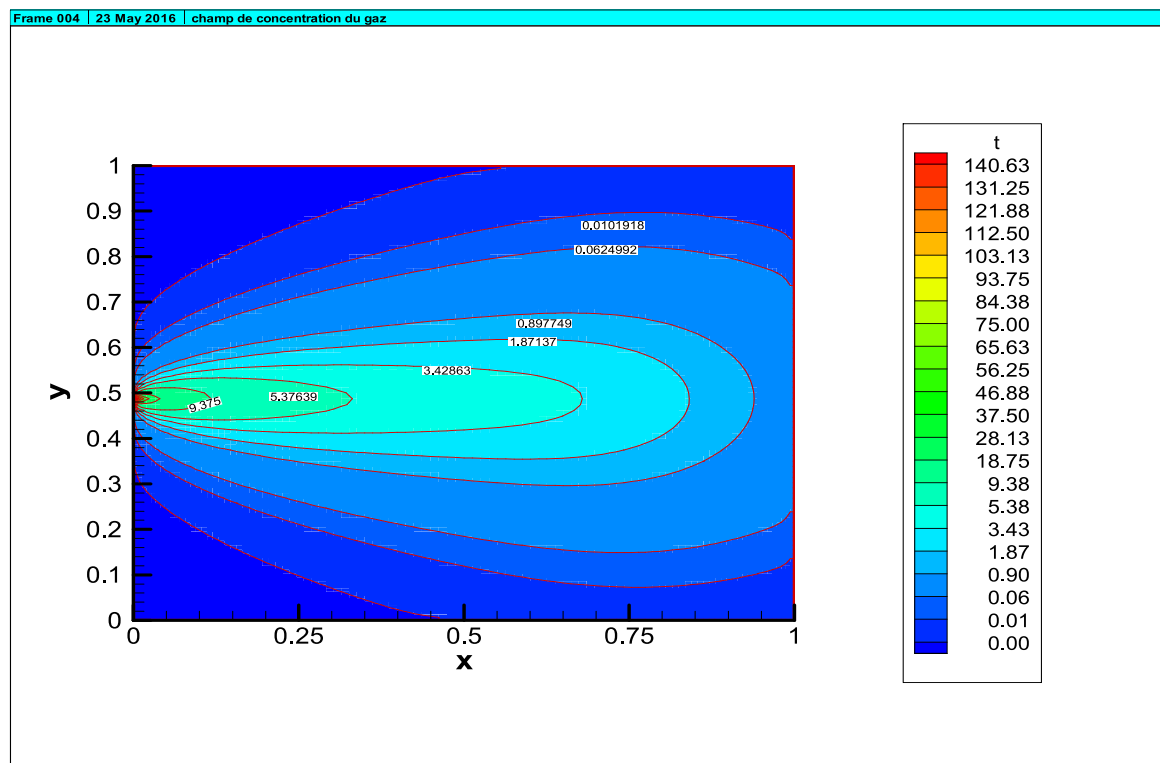


Figure 5.37 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 150 kg/m^3

Les contours des figures 5.34, 5.35, 5.36, 5.37, 5.38 montrent les positions dans le plan (xOy) qui ont les mêmes valeurs de concentration du gaz déchargées, en changeant la concentration initiale au point de source dans un régime permanent.

En réalité la concentration au point de source (l'orifice) dépend de taux de fuite de gaz, la vitesse du vent et de coefficient de diffusivité mais elle reste constante au cours du temps, on suppose des valeurs de concentration en ce point pour montrer juste l'influence de l'augmentation de taux de fuite sur la dispersion du panache.

Si le taux de fuite est élevé alors on aura une dispersion d'un nuage plus concentré en gaz que les nuages des taux de fuite moindres.

5.3.2.4. Variation de la concentration en fonction des vitesses du vent

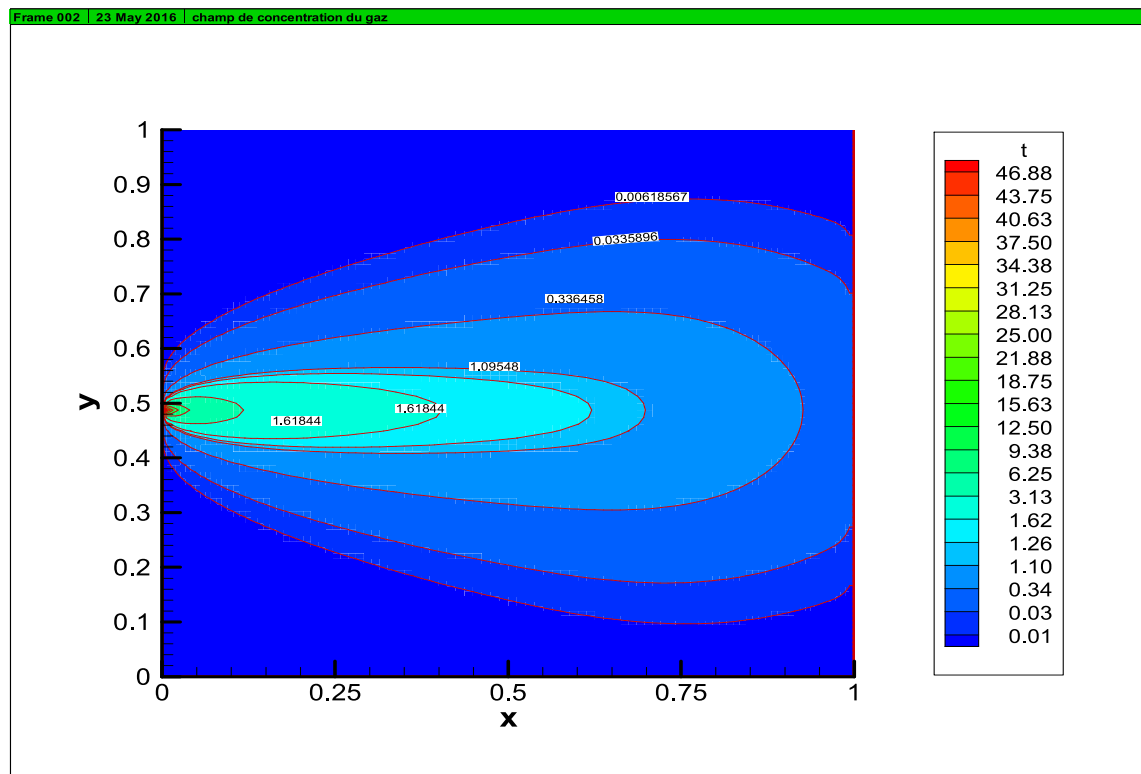


Figure 5.38 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 50 kg/m^3 et une vitesse du vent 0.1 m/s

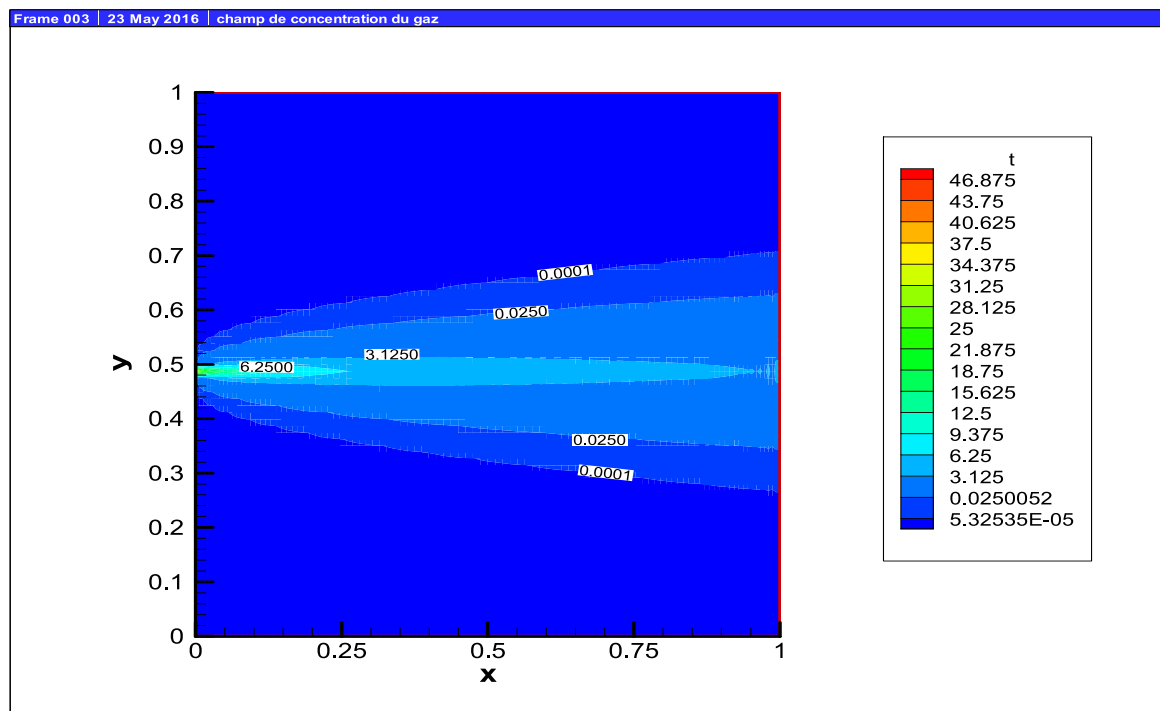


Figure 5.39 : Contours du panache pour une concentration initiale vaut : 50 kg/m^3 et une vitesse du vent 1 m/s

On remarque d'après ces deux figures que les contours ont la même allure mais la différence réside dans ses tailles,

Une concentration vaut 1.26 kg/m^3 dans le cas où la vitesse du vent est 0.1 m/s se trouve au milieu du domaine étudié cependant pour une vitesse du vent vaut 1 m/s cette concentration se trouve dans des positions plus proches au point de source.

Donc plus la vitesse du vent est considérable la concentration du gaz diminue plus rapidement et la taille de contour devient plus petite.

Conclusion et perspective

Conclusion

Après la procédure de calcul de taux de fuite on a constaté que ce dernier dépend principalement du diamètre de l'orifice, autrement dit plus le taux de fuite augmente plus la quantité du gaz rejeté est importante.

Le taux de fuite obtenu nous a permis d'estimer la concentration du gaz rejeté dans l'atmosphère selon les classes de stabilités et les différentes conditions.

La représentation graphique des courbes iso-concentrations du nuage gazeux à partir de calcul analytique suivant les modèles panache (pour les mêmes classes de stabilité) et le calcul numérique montre clairement que le taux de fuite varie proportionnellement avec la concentration du gaz rejeté dans l'atmosphère, c'est-à-dire plus le taux de fuite augmente plus la concentration est importante.

Cette représentation nous montre aussi que la période de dilution de nuage gazeux dispersé dans l'atmosphère dépend principalement de la vitesse du vent (pour notre calcul numérique) et les classe de stabilité (pour le calcul analytique).

Perspective

Le travail présenté dans ce mémoire est considéré comme une étude préliminaire sur la dispersion d'un gaz naturel dans l'atmosphère suite à une fuite dans un gazoduc, dont le but d'estimer la possibilité d'une explosion, cependant la modélisation de la dispersion d'un gaz naturel dans l'atmosphère selon le modèle gaussiens (panache) ne donne pas une bonne estimation pour des distances inférieures à 100 mètre ce qui diffère au calcul numérique qui donne des valeurs plus précises pour des positions proches du point de source, c'est pour cette raison qu'on doit combiner ses deux calculs (analytique et numérique) pour avoir une étude complète sur la dispersion du gaz déchargé dans l'atmosphère.

Référence Bibliographiques

- [1] La corrosion et l'anticorrosion, pratique industrielle, *Gérard Béranger et Henri Mazille*, Lavoisier 2002.
- [2] Inspection en ligne des pipelines, Principes et méthodes, *Stéphane Sainson* Ingénieur conseil, Edition 2006, P20.
- [3] Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA76) Ω -8 Feu torche, rapport d'étude N° DRA-14-133133-02917A 10/03/2014, P18.
- [4] Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants.
- [5] Detection of Natural Gas Pipeline Leaks and their Health Consequences using Airborne Lidar, *Mike Renslow*, 12 September 2011, Santa Fe, New Mexico.
- [6] A survey on gas leak detection and localization techniques, *Pal-Stefan Murvay*, Department of Automatics and Applied Informatics, Faculty of Automatics and Computers, "Politehnica" University of Timisoara, Bd. Vasile Parvan 2, Timisoara, Romania.
- [7] Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants, *Joaquim Casal*, Industrial safety series, Volume 8.
- [8] climate challenge, de l'information et du matériel éducatif sur le climat.
- [9] Atmosphère : guide d'interprétation des phénomènes atmosphériques : nuages, pluie, neige, tempêtes, *Schaefer, Vincent J.* 1996, Édition : L'Acadie, Québec : Broquet.
- [10] Méthodes numériques appliquées aux calculs des écoulements et du transfert de chaleur, *Abbés Azzi*, Faculté de Génie mécanique USTO, 2001/ *J. Philibert et coll.*, Métallurgie, du minerai au matériau, *Dunod*, 2002./ *Suthan S. Suthersan*, "Remediation engineering: design concepts", CRC Press, 1996.
- [11] Gas Pipeline Hydraulics, *E. Shashi Menon*, Boca Raton, London New York Singapore, Published in 2005 by CRC Press, *Taylor & Francis Group*.
- [12] Chemical process quantitative risk analysis.
- [13] Notes de cours de gazodynamique Par : *A. Boukhari*, année : 1429 -2008, P19.
- [14] Fires, explosion, and toxic gas dispersions, effects calculation and risk analysis, *Marc J. Assael & Konstantinos E. Kakosimos*.

Références Bibliographiques

- [15] Simulation numérique du phénomène d'advection et de la diffusion de la concentration d'un polluant dans un écoulement permanent et bidimensionnel par la méthode des volumes finis, *Medouar Walid*, encadré par *Pr. Taher Abbes Miloud*.
- [16] Chemical process safety, fundamentals with applications, *Daniel A. Crowl & Joseph F. Louvar*, second edition, prentice hall international series in the physical and chemical engineering sciences.
- [17] Dispersion atmosphérique, Module environnement atmosphérique et qualité de l'air, *Hadjira Schmitt-Foudhil*, 23 novembre 2010. Centre d'enseignement et de recherche en environnement atmosphérique.
- [18] An introduction to computational fluid dynamics, *H. K Versteeg* and *W. Malalasekera*. 1995./ Concepts pour la dispersion de polluants et particules., *Benjamin Loubet*.
- [19] The Mathematics of Atmospheric Dispersion Modeling, *JOHN M. STOCKIE*, Key words. *Advection-diffusion equation, atmospheric dispersion, contaminant transport, Gaussian plume solution, inverse problem, linear least squares*.
- [20] Detection of a simulated gas leak in a wind tunnel, *J Hodgkin son, Q Shan and R D Pride*, *Advantica Ltd*, Ashby Rd, Lough borough, LE11 3GR, UK.
- [21] : Schéma aux différences finies, Problème physique: dispersion d'un polluant, Équation de convection-diffusion, *Pr. Marc Buffat*.

On a vue ainsi

- Méthodes Numériques Tome 1, Méthode des différences finies Méthodes intégrales et variationnelles, *Pr. Tahar Abbes Miloud*, maître de conférences au département de mécanique de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, enseigne le module « Méthodes Numériques ».
- Detection of a simulated gas leak in a wind tunnel, *J Hodgkin son, Q Shan and R D Pride*, *Advantica Ltd*, Ashby Rd, Lough borough, LE11 3GR, UK.
- Journal of Environment and Human, theoretical Analysis of Natural-Gas Leakage in Urban Medium-pressure Pipelines.