

ALP & ASSOCIATES Incorporated

*Specialists in Risk Assessment, Change Agents in Risk Management
Safety, Health, Environment, Property, Reputation*

Évaluation de risques pour le Gazoduc Montréal Est

(Segment additionnel d'un gazoduc de gaz naturel
de TQM à GMI près de l'usine de LNG)

**Préparé pour
Gaz Métropolitain Inc.**

Rapport final

Octobre 2003

Référence No. Gazmet-02

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Ce rapport présente l'évaluation de risques de Alp & Associates Incorporated pour un segment de gazoduc qui reliera le Gazoduc TQM au système de gazoducs de Gaz Métropolitain Inc. à Montréal-Est près de son usine de liquéfaction de gaz naturel (LNG). Ce nouveau segment comporte deux sections de diamètres différents (610 mm/2400 kPa et 323.9 mm/9928 kPa).

L'étude a comporté les étapes suivantes :

1. Revue de l'information concernant le gazoduc proposé et les secteurs environnants;
2. Identification des dangers, ce qui inclut le choix de scénarios crédibles de fuites potentielles.
3. Analyse de fréquence, dont une revue de la littérature sur la fréquence d'incidents de gazoduc, disponible des études antérieures,
4. Simulation sur ordinateur pour déterminer les zones potentielles d'impact de ces scénarios à l'aide de modèles de conséquences,
5. Estimation des risques en combinant de façon appropriée les données de fréquences et de conséquences,
6. Préparation du rapport, documentation des résultats.

L'évaluation des risques pour la sécurité du public a été complétée permettant d'identifier les distances pertinentes pour le plan d'urgence et pour l'aménagement du territoire.

Les zones de planification d'urgence sont basées sur les conséquences du pire scénario. Pour le gazoduc proposé, les zones de planification d'urgence ont été déterminées pour des fuites sur le gazoduc et dans les bâtisses de comptage et régulation de la pression pour les installations hors-sol:

- Pour des fuites en provenance du gazoduc qui résulteraient en dangers d'incendie, la distance est de 350 m pour le segment de 2400 kPa (610 mm), et 355 m pour le segment de 9928 kPa (323.9 mm),
- Pour les bâtisses de comptage et de régulation de pression la distance est de 75 m.

Ces distances peuvent être utilisées comme point de départ pour l'élaboration des plans d'urgence.

Selon les photos aériennes, les types suivants de terrains se situent à l'intérieur des zones de planification d'urgence :

- Autour du gazoduc, quelques habitations à 250 mètres du terrain, des bâtiments à bureaux, des domaines industriels, des parcs, des artères de circulation majeures,
- Autour des postes de comptage et de régulation de pression (on a assumé le Point P₈, voir la Figure 2.1), des domaines industriels, des artères de circulation majeures.

Un niveau de risque de 1 chance de décès sur 1 million (10^{-6}) par année est atteint à une distance de 85 m de chaque côté du gazoduc de 9928 kPa. De plus, le niveau maximum de risque serait de 1.7 chances de décès sur 1 million par année pour quelqu'un qui serait situé au-dessus du gazoduc.

Pour la section de 2400 kPa, un niveau de risque de 1 chance de décès sur 1 million (10^{-6}) par année n'est pas atteint. De plus le niveau de risque serait de 0.9 chances de décès sur 1 million par année pour quelqu'un qui serait situé au-dessus du gazoduc.

Les niveaux de risque autour des postes de comptage et de régulation de la pression sont de 10 chances sur 1 million (10^{-5}) et 1 chance sur 1 million (10^{-6}) par année respectivement à 22 m et 32 m des bâtisses. Le niveau de risque de 100 chances sur 1 million (10^{-4}) par année n'est pas atteint.

Selon les critères du Conseil Canadien des Accidents Industriels Majeurs (CCAIM), aucune autre installation ne devrait être permise à l'intérieur de la zone de risque individuel de 100 chances de décès sur 1 million (10^{-4}) par année. Entre 100 sur 1 million (10^{-4}) et 10 sur 1 million (10^{-5}), les usines de fabrication, les entrepôts et les parcs sont permis. Entre 10 sur 1 million (10^{-5}) et 1 sur 1 million (10^{-6}), les commerces, les bureaux et des zones résidentielles de faible densité sont permis.

Les utilisations du sol existantes pour un segment de gazoduc qui reliera le Gazoduc TQM au système de gazoducs de Gaz Métropolitain Inc. à Montréal-Est près de son usine de liquéfaction de gaz naturel (LNG), sont donc conformes avec les lignes directrices du CCAIM.

Les décisions futures d'aménagement du territoire peuvent être fondées sur les niveaux de risques individuels découlant de l'analyse de risques et sur les lignes directrices du CCAIM.

Table des matières

SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	i
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Plan de l'étude	1
1.2 Contenu du rapport	1
2 DESCRIPTION DU PROJET.....	2
2.1 Objectifs du Gazoduc de Montréal-Est.....	2
2.1.1 Situation actuelle	2
2.1.2 Élément nouveau	2
2.1.3 Solutions possibles	2
2.2 Localisation.....	3
2.3 Informations techniques sur les installations et paramètres du gazoduc.....	4
3 MÉTHODE D'ANALYSE ET RÉSULTATS.....	7
3.1 Identification des dangers	7
3.2 Analyse de conséquences.....	8
3.2.1 Taux de fuite.....	8
3.2.2 Simulation d'incendie et d'explosion	8
3.2.3 Résultats de l'analyse de conséquences.....	9
3.3 Analyse de fréquence.....	19
3.4 Estimation du risque	20
3.5 Incertitude et conservatisme dans l'estimation des risques	24
4 RÉSUMÉ DES CONCLUSIONS.....	25
4.1 Zones de planification d'urgence.....	25
4.2 Enjeux de planification du territoire.....	25
5 RÉFÉRENCES.....	26
ANNEXE A. Procédure pour le calcul des effets de radiations thermiques et de surpression	A-1

Liste de Tableaux

Tableau 3.1 Résumé des distances de dangers pour la planification d'urgence pour les scénarios choisis	18
Tableau 3.2 Résumé des fréquences pour les scénarios de dangers retenus	20
Tableau 3.3 Résumé des distances pour les critères d'acceptabilité de risques pour le public du CCAIM	23
Paramètres de PROBIT pour les incendies et explosions (TNO, 1992).....	A-1

Liste de Figures

Figure 2.1	Localisation proposée du Gazoduc Montréal Est.....	4
Figure 3.1	Séquence de conséquences possibles suivant une fuite majeure de gaz naturel d'un gazoduc.....	8
Figure 3.2a	Intensité de la radiation thermique pour une boule de feu – ruptures complète et partielle du gazoduc (610 mm).....	10
Figure 3.2b	Intensité de la radiation thermique pour une boule de feu – ruptures complète et partielle du gazoduc (323.9 mm).....	10
Figure 3.3a	Probabilité de décès pour une boule de feu et feu en chalumeau – ruptures complète et partielle du gazoduc (610 mm)	12
Figure 3.3b	Probabilité de décès pour une boule de feu et feu en chalumeau – ruptures complète et partielle du gazoduc (323.9 mm)	12
Figure 3.4	Intensité de la radiation thermique pour un feu en chalumeau – fuite	14
Figure 3.5	Probabilité de décès pour un feu en chalumeau – fuite	15
Figure 3.6	Suppression de pointe – explosion de la bâtisse	16
Figure 3.7	Probabilité de dommages – explosion de la bâtisse	17
Figure 3.8a	Profil de risques individuels annuels – Gazoduc (610 mm).....	21
Figure 3.8b	Profil de risques individuels annuels – Gazoduc (323.9 mm).....	22
Figure 3.9	Profil de risques individuels annuels – Postes de comptage et de régulation de pression.....	22
Figure 3.10	Critères d'acceptabilité du risque du CCAIM pour l'aménagement du territoire	23

Listes des acronymes et abréviations

Acronymes	
US EPA	United States Environmental Protection Agency
US DOT	United States Department of Transportation
Abréviations	
°C	degré Centigrade
kg	kilogramme
kPa	kilo Pascal
kW/m ²	kilowatt par mètre carré
km	kilomètre
m	mètre
mm	millimètre
m ³	mètre cube
m ³ /h	mètre cube par heure
min	minute
po	pouce
s	seconde

1 INTRODUCTION

La Société en commandite Gaz Métropolitain (SCGM) a retenu les services de Alp & Associates pour faire une évaluation des risques du Gazoduc Montréal-Est. Ce projet comporte un segment qui reliera le Gazoduc TQM au système de gazoducs de Gaz Métropolitain Inc. à Montréal-Est près de son usine de liquéfaction de gaz naturel (LNG).

Les risques pour la sécurité du public, en termes de fréquence et de conséquences d'une fuite accidentelle de gaz naturel, sont la principale préoccupation de cette évaluation de risques.

1.1 Plan de l'étude

Le plan pour la présente étude a comporté les étapes suivantes :

1. Revue de l'information concernant le gazoduc proposé et les secteurs environnants;
2. Identification des dangers, ce qui inclut le choix de scénarios crédibles de fuites potentielles. Ce travail est cohérent avec les évaluations de risques antérieures exécutées au Québec (i.e., Bovar, 1997),
3. Analyse de fréquence, ce qui inclut une revue de la littérature sur la fréquence d'incidents de gazoduc, disponible dans les études antérieures,
4. Simulation sur ordinateur pour déterminer les zones potentielles d'impact de ces scénarios à l'aide de modèles de conséquences,
5. Estimation des risques en combinant de façon appropriée les données de fréquences et de conséquences,
6. Préparation du rapport, documentation des résultats.

Les principaux résultats de cette étude sont les distances aux niveaux spécifiés de conséquences suite à une fuite de gaz naturel. Ces distances sont utiles pour préparer les plans d'intervention d'urgence. Les distances pour les niveaux de risques individuels, importants pour évaluer l'acceptabilité du gazoduc proposé ou l'aménagement futur du territoire à proximité du gazoduc, sont aussi rapportées.

1.2 Contenu du rapport

Le présent rapport présente la méthodologie et les résultats de l'étude. Après cette introduction, le chapitre 2 fournit une brève description du gazoduc et de ses environs en s'arrêtant en particulier sur les aspects pertinents à cette étude. Le chapitre 3 décrit la méthodologie utilisée pour l'étude, y incluant la sélection des scénarios potentiels de fuites, et les modèles mathématiques pour les analyses de conséquences. Le chapitre 4 présente les résultats de l'évaluation des risques. Le chapitre 5 fournit les références documentaires utilisées pour l'étude.

2 DESCRIPTION DU PROJET

Le promoteur du projet est la Société en commandite Gaz Métropolitain (SCGM). Le projet faisant l'objet du présent avis porte le nom de « *Raccordement au réseau de Gazoduc TQM dans l'est de l'île de Montréal* »

2.1 Objectifs du Gazoduc de Montréal-Est

2.1.1 Situation actuelle

La région de l'île de Montréal et de Laval ainsi qu'une partie de la Rive Nord sont présentement alimentées par trois sources de gaz naturel, soit les postes de livraison de Boisbriand et de Senneville ainsi que la conduite du pont Jacques-Cartier qui fait transiter du gaz de la Rive Sud vers Montréal.

En période de pointe en hiver, ces trois sources débitent des volumes horaires de l'ordre de 675 000 m³. La configuration du réseau qui alimente cette région fait en sorte que la capacité actuelle est présentement atteinte et qu'une amélioration importante du réseau serait requise si de nouveaux clients, avec des fortes consommations, voulaient obtenir du gaz.

SCGM connaît cette situation depuis de nombreuses années. Lors du projet de prolongement du réseau de Gazoduc TQM vers PNGTS, elle a demandé que le tracé passe par l'est de l'île de Montréal compte tenu que les futurs clients importants seraient situés en majorité dans l'est de l'île. C'était faire preuve à ce moment d'une bonne planification que de profiter de ce projet pour faciliter le raccordement futur du réseau avec un nouveau point d'alimentation situé dans l'est de l'île. En prévision de ces travaux futurs, une vanne de sectionnement avait été installée en bordure de l'autoroute 40 alors qu'une gaine en acier avait été installée lors de la construction d'un tunnel sous l'autoroute 40 (à proximité de la vanne de sectionnement) pour faciliter le franchissement de ladite autoroute lors d'un raccordement futur au réseau de Gazoduc TQM.

2.1.2 Élément nouveau

Le 22 janvier 2003, la société Les Ponts Jacques Cartier et Champlain Incorporée avisait SCGM qu'elle ne désirait plus renouveler le permis qu'elle lui accordait pour la conduite installée sous le pont Jacques-Cartier; cette décision étant prise pour des raisons de sécurité et suite à une analyse de risques concernant des attaques possibles de terroristes. Par la même occasion, cette lettre mentionnait que SCGM avait jusqu'au 31 janvier 2004 pour procéder à l'enlèvement de ladite conduite.

2.1.3 Solutions possibles

Deux solutions principales furent étudiées par SCGM. La première consistait à remplacer la conduite installée sous le pont Jacques-Cartier par une conduite située près de cet endroit et installée par forage directionnel. Cette solution aurait permis de revenir à la situation actuelle sans toutefois augmenter la capacité du réseau. Elle coûterait aux environs de 10,6 millions de dollars sans parler des difficultés importantes de réalisation.

La deuxième solution consistait à devancer le projet déjà prévu depuis plusieurs années, soit d'ajouter un point de desserte dans l'est de Montréal. Cette solution, en plus d'augmenter la

capacité du réseau, coûterait sensiblement le même prix que le forage directionnel près du pont Jacques-Cartier, soit 11,4 millions de dollars, de sorte que SCGM a retenu cette solution qui consistera à raccorder son réseau de distribution au réseau de Gazoduc TQM passant à l'extrémité est de l'île.

2.2 Localisation

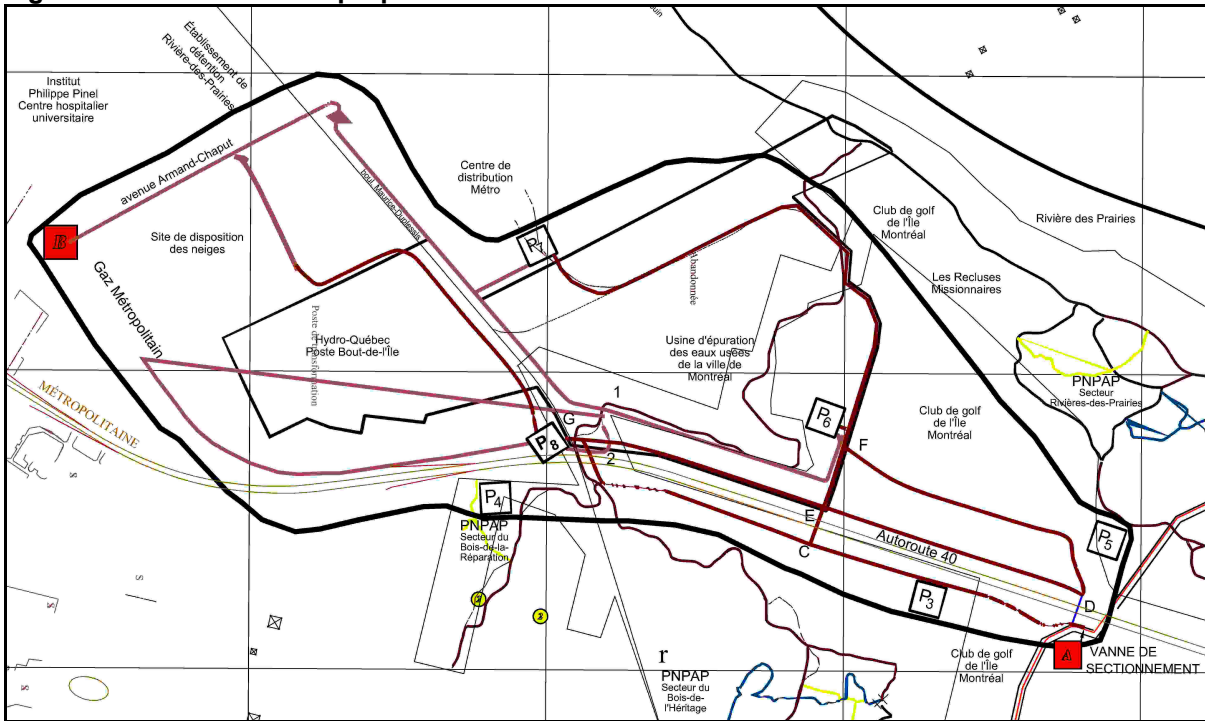
Le projet de raccordement au réseau de Gazoduc TQM est situé sur le territoire de la Ville de Montréal (arrondissements Rivière-des-Prairies / Pointe-aux-Trembles / Montréal-Est), dans l'est de l'île. Le secteur considéré pour l'implantation du raccordement est délimité à l'est par le réseau de Gazoduc TQM, au sud par la rue Notre-Dame, à l'ouest par le boul. du Tricentenaire et l'avenue Armand-Chaput et au nord par le boulevard Gouin.

La Figure 2.1 localise le secteur en question ainsi que les points de raccordement les plus probables aux deux réseaux concernés.

La SCGM étudie présentement en collaboration avec la firme UDA les divers axes possibles pour le gazoduc projeté.

L'avenue la plus prometteuse jusqu'à présent consisterait à se raccorder sur le réseau de Gazoduc TQM à la hauteur d'une vanne de sectionnement existante (point A) située immédiatement au sud de l'autoroute 40. Le raccordement au réseau de distribution (point B) se ferait à l'intersection du boulevard Henri-Bourassa et de l'avenue Armand-Chaput, à environ 3,5 km (en ligne directe) au sud-ouest du point A. Un poste de livraison, incluant des équipements de comptage, de détente et d'odorisation, dont la localisation est à préciser, devra être construit entre ces deux points. À cette étape du projet, il est prévu que le poste serait relié à la conduite de Gazoduc TQM par une conduite qui aurait 323.9 mm de diamètre exploitée à haute pression. Il est également prévu que la transition entre ce poste et le réseau de distribution de SCGM serait assurée par une conduite de 610 mm de diamètre exploitée à basse pression.

Figure 2.1 Localisation proposée du Gazoduc Montréal Est



2.3 Informations techniques sur les installations et paramètres du gazoduc.

Le projet inclus ce qui suit :

- Un segment de gazoduc haute pression joignant le gazoduc TQM au poste de comptage, avec une vanne d'arrêt d'urgence localisée au point de jonction avec le gazoduc TQM,
- Un poste de comptage du gaz et de régulation de la pression, 1.8 km en aval de point de jonction avec le gazoduc TQM (Le point P₈ est identifié à cette fin),
- Un segment de gazoduc de plus basse pression, du poste de comptage et de régulation de la pression jusqu'au raccordement au gazoduc de Gaz Métropolitain Inc. (GMI).

Les équipements de comptage et de régulation de pression sont situés dans deux bâtisses.

Les dimensions des postes de régulation et de comptage sont identiques soient 12 m x 6 m x 3 m de haut.

Selon les études techniques réalisées jusqu'à présent, les caractéristiques techniques du projet seraient les suivantes:

Section haute pression (Gazoduc TQM)	
Nombre de conduites:	1
Diamètre extérieur de la conduite:	323.9 mm (12 po)
Longueur totale:	environ 1,8 km
Pression maximale d'opération:	9 928 kPa
Pression maximale d'essai:	14 900 kPa
Matériau et épaisseur de la conduite:	acier, grade 359
Température de conception	-5°C pour la tuyauterie enfouie. -45°C pour les

	installations hors sol
Capacité ultime	130,000 m ³ /h
Largeur de l'emprise permanente:	environ 18 mètres
Largeur de l'aire de travail temporaire:	environ 15 mètres
Aires de travail supplémentaires de part et d'autre des obstacles à franchir:	à définir
Section basse pression (GMI)	
Nombre de conduites:	1
Diamètre extérieur de la conduite:	610 mm (24")
Longueur totale:	environ 2,0 km
Pression maximale d'opération:	2 400 kPa
Pression maximale d'essai:	3 600 kPa
Matériau et épaisseur de la conduite:	acier, grade 359
Température de conception	-5°C pour la tuyauterie enfouie, -45°C pour les installations hors sol
Capacité ultime	130,000 m ³ /h
Largeur de l'emprise permanente:	principalement installée dans des emprises de rues
Largeur de l'aire de travail temporaire:	environ 5 mètres
Aires de travail supplémentaires de part et d'autre des obstacles à franchir:	à définir
Structures hors sol	
Poste de livraison incluant les équipements de comptage, de détente et d'odorisation:	1
Espace requis:	100 m X 100 m

Le gazoduc sera installé avec les éléments de sécurité suivants :

- La tuyauterie subit un contrôle de qualité en usine,
- Une fois installée, la tuyauterie subit un test hydrostatique,
- Toutes les soudures sont radiographiées,
- La tuyauterie sera recouverte à l'extérieur avec de l'époxy/uréthane,
- La tuyauterie aura une protection cathodique,
- La tuyauterie reposera sur un coussin de sable et sera enterrée avec une couverture minimum de 1.5 à 1.9 m pour les routes et les fossés,
- Une vanne d'arrêt d'urgence sera installée à la jonction avec le gazoduc TQM; la vanne d'arrêt d'urgence ferme automatiquement sur basse pression,
- Des panneaux de signalisation seront installés le long du gazoduc,
- Des dalles de béton seront installées au-dessus du gazoduc aux endroits où il croise les fossés,
- Un ruban avertisseur sera installé à environ 18 pouces sous le niveau du sol, le long du gazoduc, et,
- La conduite sera inspectée à l'aide d'un cochonnet interne avant sa mise en opération.

Pour les postes de comptage et de régulation de la pression :

- Les postes seront opérés à distance,
- Les données d'opération sont recueillies par un système d'acquisition de données « SCADA » et relayées au centre de contrôle de Montréal,
- Les systèmes de sécurité incluront une détection de gaz inflammable et un panneau de contrôle de protection incendie,
- Les bâtisses sont ventilées, et,
- Les bâtisses seront éloignées des résidences et des édifices commerciaux.

3 MÉTHODE D'ANALYSE ET RÉSULTATS

3.1 Identification des dangers

L'identification des dangers comprend ceux qui sont inhérents au projet ainsi que les événements indésirables qui pourraient potentiellement se produire et les faire se matérialiser et résulter en impact sur des récepteurs sensibles.

Le principal danger inhérent à cette étude est l'inflammabilité du gaz naturel. Les événements indésirables qui pourraient potentiellement se produire sont des fuites de gaz naturel du gazoduc, et les incendies qui pourraient s'en suivre si le gaz s'allumait.

La sélection des événements indésirables est basée sur leur crédibilité. En se fondant sur la revue des accidents antérieurs de gazoducs et sur d'autres études de gazoducs de gaz naturel, trois scénarios de fuite ont été retenus pour couvrir les types de fuites possibles.

- Rupture complète où le gaz fuit à plein diamètre du gazoduc et des deux côtés de la rupture (pire condition possible),
- Rupture partielle où le gaz fuit par un trou d'un diamètre équivalent à celui du gazoduc, et,
- Une fuite où le gaz fuit par un trou à un débit équivalent à 10% de la capacité ultime.

La séquence de conséquences possibles d'une rupture majeure d'un gazoduc est présentée à la Figure 3.1 Les conséquences possibles sont :

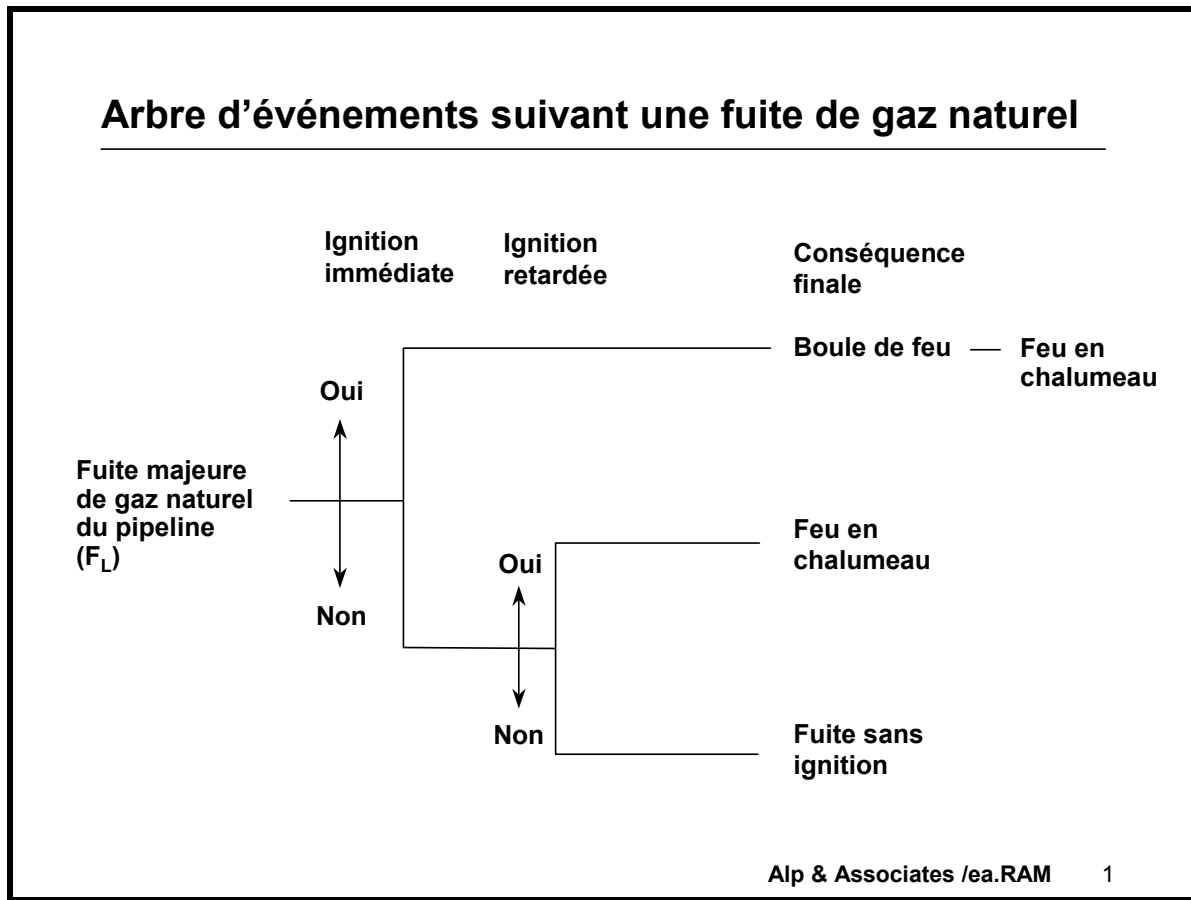
- Une boule de feu si le gaz qui fuit s'allume immédiatement après la fuite. Une boule de feu est un nuage en flammes d'une forme approximativement sphérique. Le nuage s'élève dans l'atmosphère en brûlant et l'énergie est libérée sous forme de radiation thermique,
- Un feu en chalumeau suite à une ignition immédiate ou retardée d'une fuite de gaz à haute pression. Le gaz qui s'échappe va se disperser jusqu'à ce qu'il rencontre une source d'ignition et il y aura retour de flammes vers la source du gaz, et,
- Pas d'ignition et le nuage se dispersera sans conséquences graves pour les personnes.

Pour les fuites, on pose l'hypothèse que l'ignition résultera en un feu en chalumeau.

En général, la plupart des ruptures de gazoduc résultent en une fente le long du gazoduc, mais le potentiel existe pour que des morceaux de conduite soient arrachés et projetés à l'extérieur de l'emprise du gazoduc.

Pour les postes de comptage et de régulation de la pression, si la concentration de gaz à l'intérieur de la bâtisse atteint les limites d'inflammabilité (5% à 15%) et que le gaz s'allume, ceci pourrait résulter en une explosion de la bâtisse.

Figure 3.1 Séquence de conséquences possibles suivant une fuite majeure de gaz naturel d'un gazoduc



3.2 Analyse de conséquences

3.2.1 Taux de fuite

Pour les scénarios de rupture partielle ou complète, le taux de fuite de gaz naturel a été déterminé en utilisant le modèle de chute de pression à double exponentielle (Bell 1978). Ce modèle à double exponentielle a été la base du modèle de chute de pression GASCON, qui a été utilisé dans l'évaluation de risques précédente. (Bovar, 1997) En utilisant ce modèle, les taux de fuite peuvent être calculés pour les dimensions de brèches choisies et les paramètres de conception du gazoduc (pression, diamètre, espacement des vannes de sectionnement).

Pour le scénario de fuite, 10% de la capacité de débit du gazoduc a été utilisée comme taux de fuite.

3.2.2 Simulation d'incendie et d'explosion

Les impacts potentiels d'incendies (boules de feu et feux en chalumeau) et explosions de bâtisses ont été simulés à l'aide de nos propres modèles de simulation par ordinateur. Ceux-ci sont basés sur les modèles décrits dans la publication du « Center for Chemical Process Safety de l'American Institute of Chemical Engineers » pour la simulation des incendies et

explosions. (CCPS, 1994). Les modèles de CCPS sont cités dans le manuel d'instruction du « Risk Management Program » de la US Environmental Protection Agency (US EPA 1996) comme modèles acceptables pour les applications de simulation de conséquences.

Lors d'une rupture de gazoduc, deux types de conséquences peuvent survenir : Une boule de feu et un feu en chalumeau.

Dans le premier cas, un modèle de boule de feu a été utilisé pour déterminer le flux thermique maximum auquel les récepteurs pourraient être affectés.

Dans le dernier cas, un modèle de feu en chalumeau a été utilisé. La longueur du jet est estimée à l'aide du modèle API 521 (1997).

L'explosion de la bâtisse est basée sur le modèle multi-énergies, en utilisant la surpression de pointe en échelle Sachs sur le côté des édifices. On a posé l'hypothèse de concentrations stoechiométriques (mélange d'air et de gaz naturel pour avoir une combustion parfaite) dans la bâtisse au moment de l'explosion.

Le seuil de radiation thermique pour fins de planification d'urgence est pris à 5 kW/m^2 pour une exposition de 40 secondes (US EPA, 1996) ou sa dose équivalente de $342 [\text{kW/m}^2]^{4/3} \cdot \text{s}$, ce qui correspond au début des brûlures de deuxième degré.

Le seuil pour la surpression pour les fins de planification d'urgence a été pris à 6,9 kPa (US EPA, 1996), ce qui correspond à des dommages pour les maisons en structure de bois.

La probabilité de décès en fonction de la distance a été déterminée en utilisant une approche par PROBIT. Voir Annexe 1.

3.2.3 Résultats de l'analyse de conséquences

Les résultats des simulations pour les dangers reliés aux incendies sont présentés aux Figures 3.2 à 3.5, en termes d'intensité de radiation thermique et de probabilité de décès en fonction des distances du point où se situe la fuite.

Les résultats des simulations de l'explosion de bâtisse sont présentés aux Figures 3.6 et 3.7, en terme de surpression de pointe et probabilité de divers types de dommage en fonction des distances du point où se situe la fuite.

Ces résultats sont résumés au Tableau 3.1.

Figure 3.2a Intensité de la radiation thermique pour une boule de feu – ruptures complète et partielle du gazoduc (610 mm)

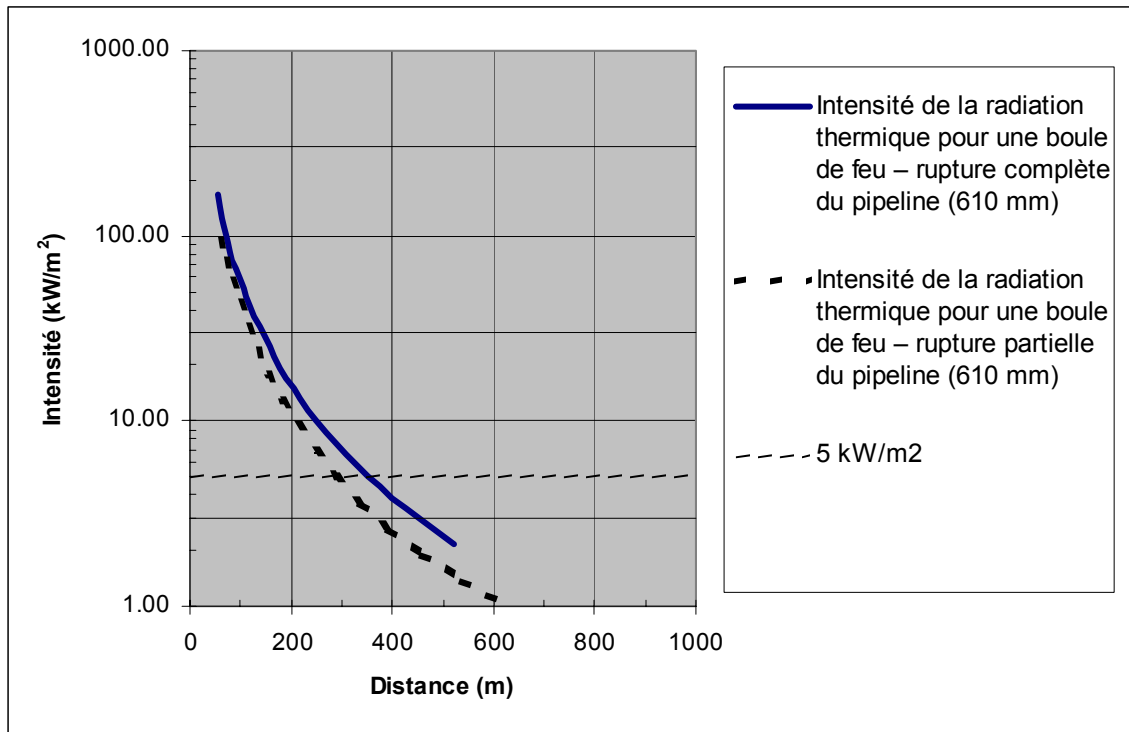
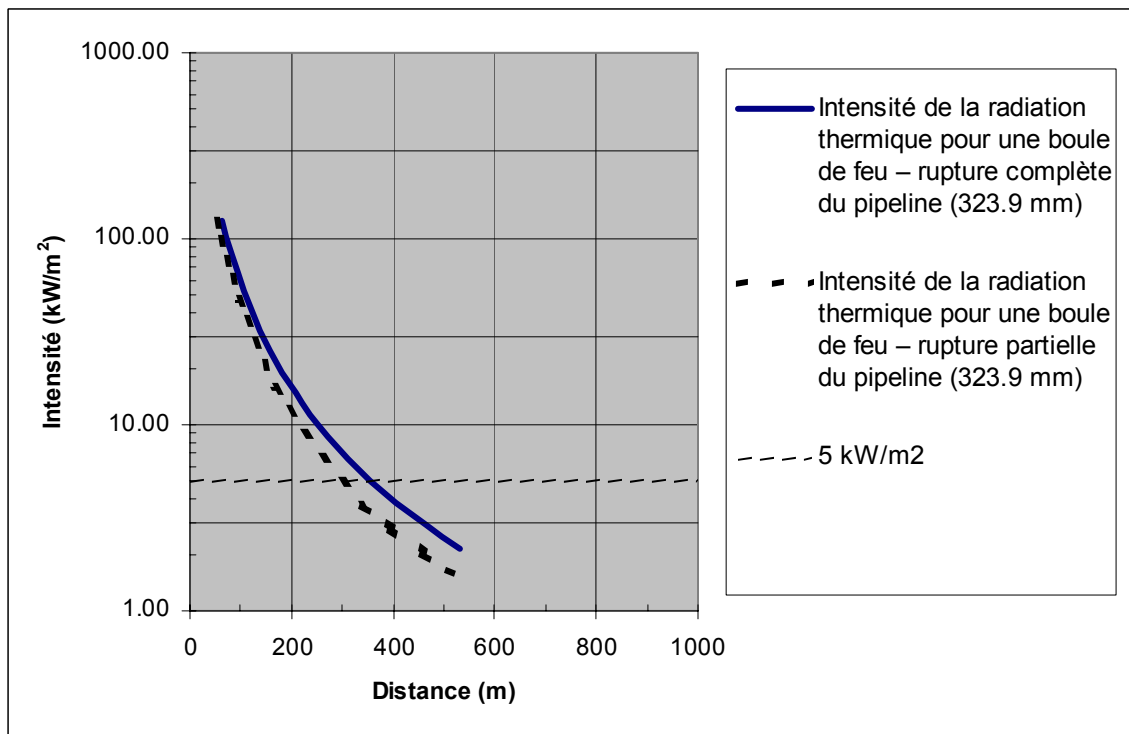


Figure 3.2b Intensité de la radiation thermique pour une boule de feu – ruptures complète et partielle du gazoduc (323.9 mm)



Les Figures 3.2a et 3.2b présentent l'intensité de la radiation thermique pour une rupture complète ou partielle du gazoduc. La ligne pleine de la courbe représente l'intensité de la radiation thermique pour une rupture complète du gazoduc et la ligne pointillée, celle pour une rupture partielle. L'intensité de la radiation diminue en s'éloignant de la source de la fuite.

La Figure 3.2a présente les résultats pour une conduite de 2400 kPa. On notera que le niveau estimé de radiation thermique de 5kW/m^2 (ligne horizontale pointillée dans la figure) est atteint à 350 m pour une rupture complète du gazoduc et à 290 m pour une rupture partielle.

La Figure 3.2b présente les résultats pour une conduite de 9928 kPa. On notera que le niveau estimé de radiation thermique de 5kW/m^2 (ligne horizontale pointillée dans la figure) est atteint à 355 m pour une rupture complète du gazoduc et à 300 m pour une rupture partielle.

Figure 3.3a Probabilité de décès pour une boule de feu et feu en chalumeau – ruptures complète et partielle du gazoduc (610 mm)

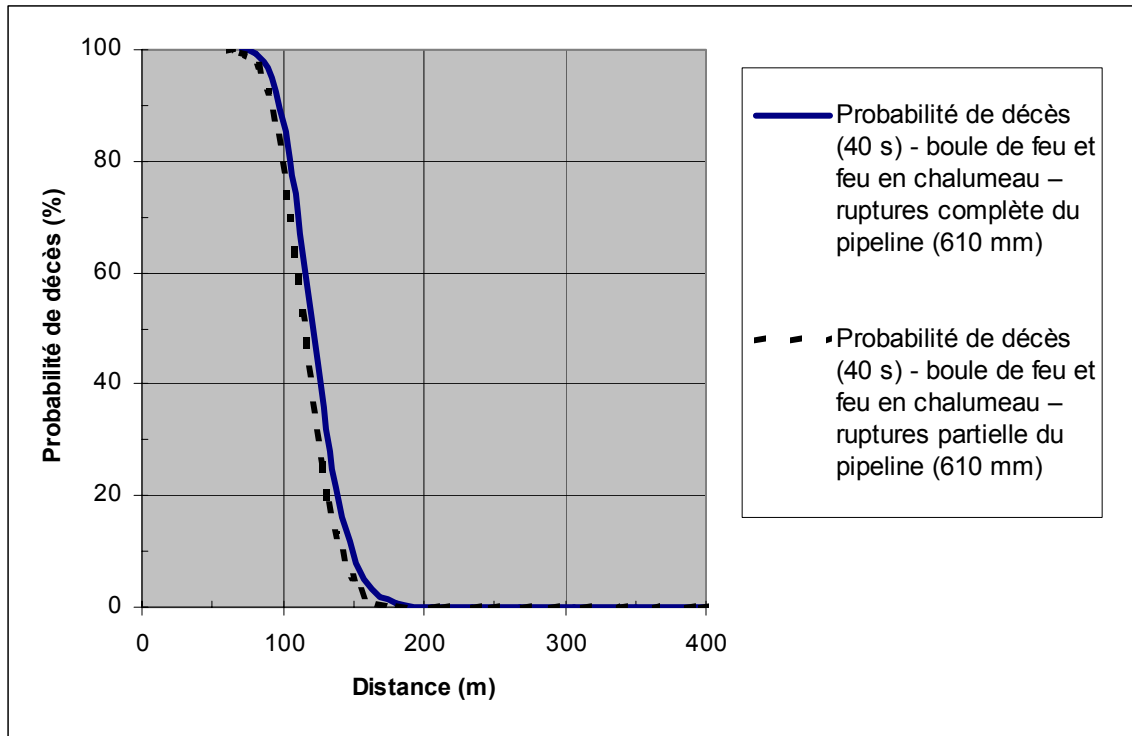
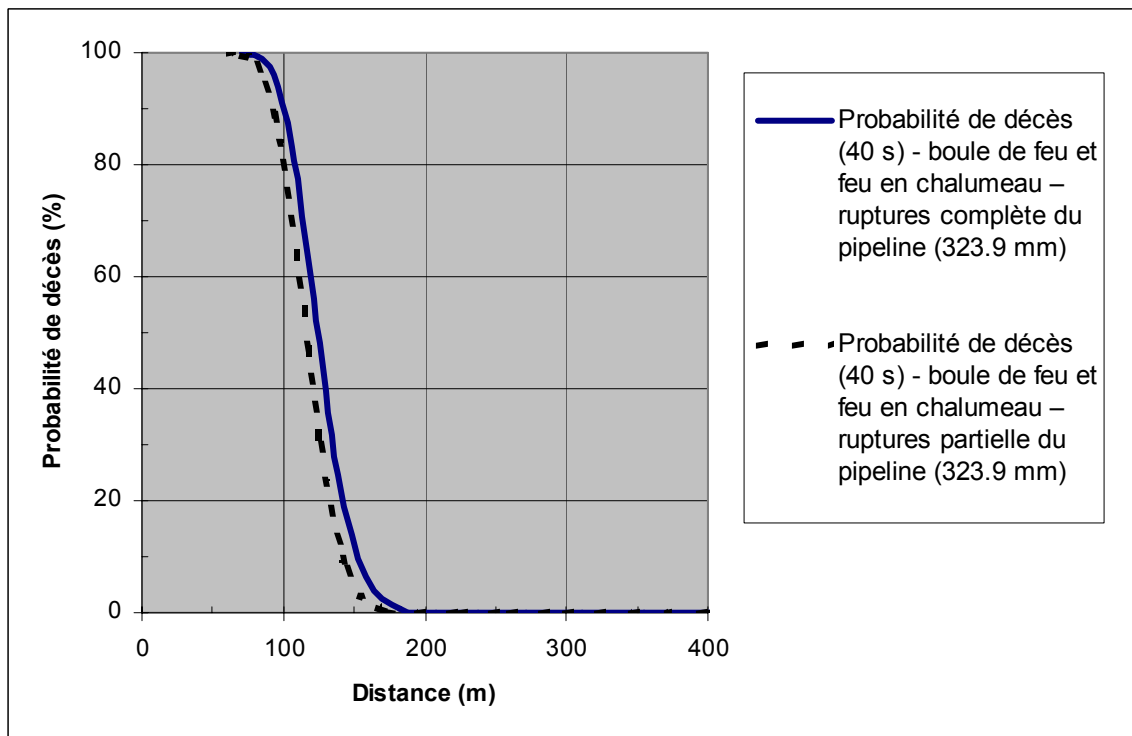


Figure 3.3b Probabilité de décès pour une boule de feu et feu en chalumeau – ruptures complète et partielle du gazoduc (323.9 mm)

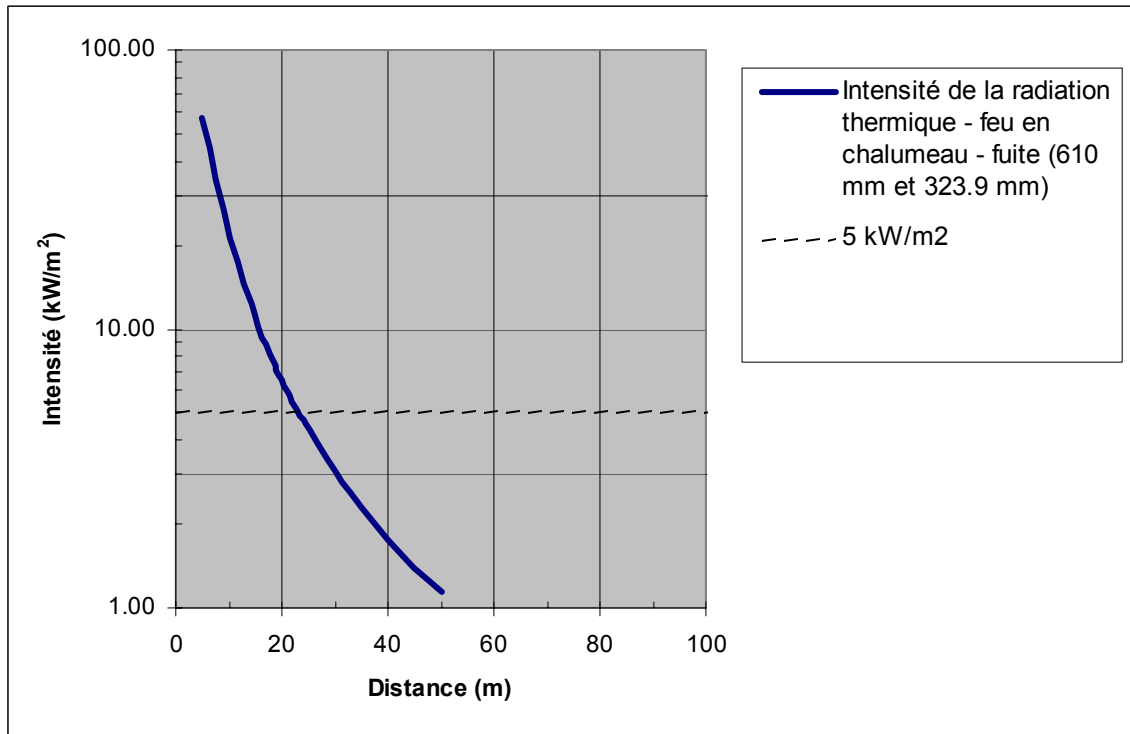


Les Figures 3.3a et 3.3b présentent la probabilité de décès pour une boule de feu ou un feu en chalumeau pour une rupture complète ou partielle du gazoduc. La ligne pleine de la courbe représente la probabilité de décès pour une rupture complète et la ligne pointillée, celle pour une rupture partielle. La probabilité de décès diminue en s'éloignant de la source de la fuite.

La Figure 3.3a présente les résultats pour une conduite de 2400 kPa. On notera que la probabilité de décès de 1% est potentiellement atteinte à 175 m pour une rupture complète du gazoduc et à 160 m pour une rupture partielle.

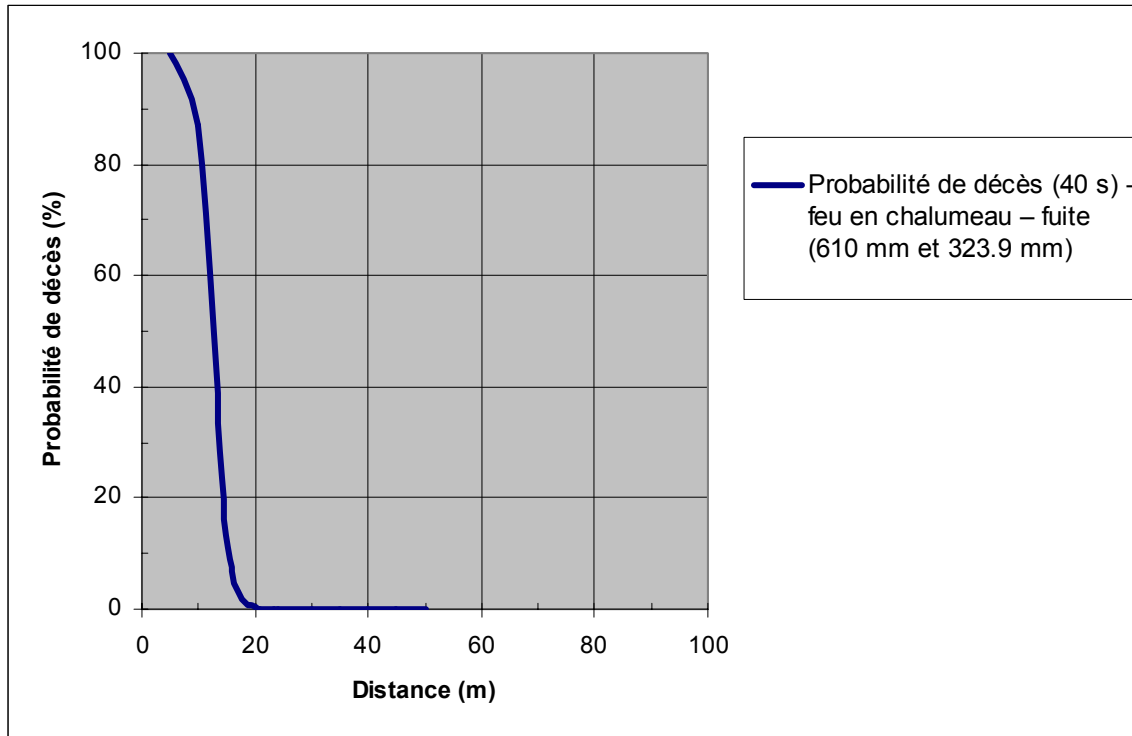
La Figure 3.3b présente les résultats pour une conduite de 9928 kPa. On notera que la probabilité de décès de 1% est potentiellement atteinte à 175 m pour une rupture complète du gazoduc et à 165 m pour une rupture partielle.

Figure 3.4 Intensité de la radiation thermique pour un feu en chalumeau – fuite (610 mm et 323.9 mm)



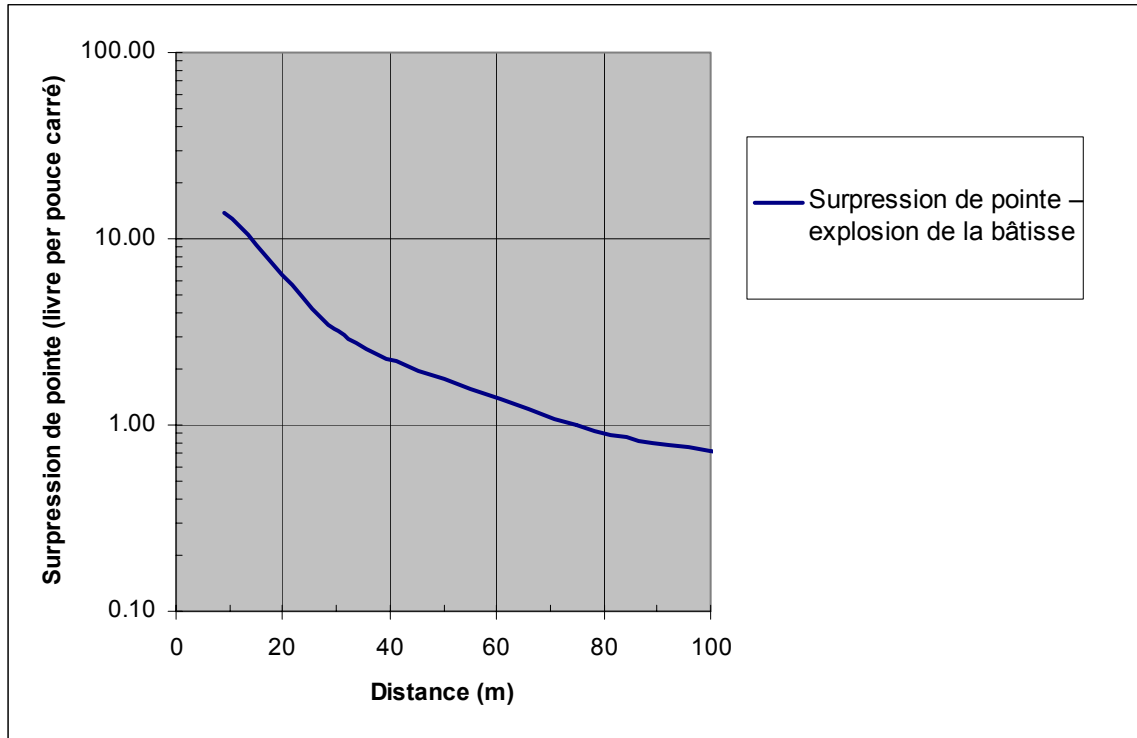
La Figure 3.4 présente l'intensité de la radiation thermique pour un feu en chalumeau lors d'une fuite du gazoduc. L'intensité de la radiation diminue en s'éloignant de la source de la fuite. On notera que le niveau estimé de radiation thermique de 5 kW/m^2 (ligne horizontale pointillée dans la figure) est atteint à 23 m.

Figure 3.5 Probabilité de décès pour un feu en chalumeau – fuite (610 mm et 323.9 mm)



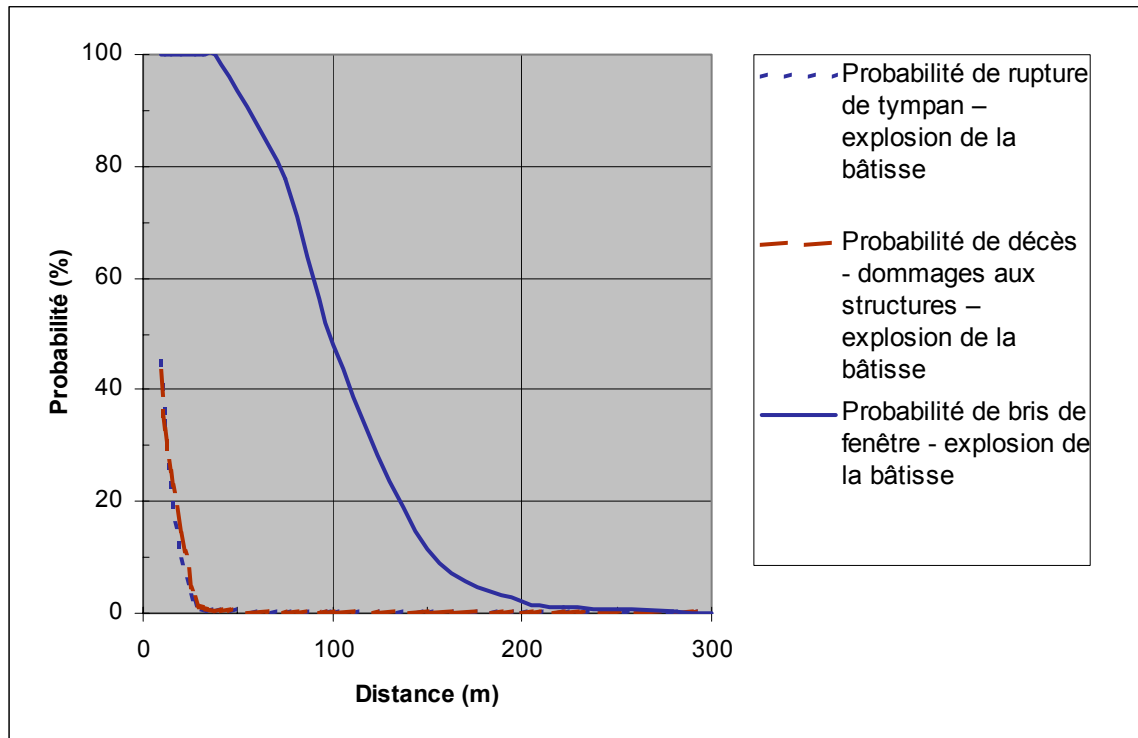
La Figure 3.5 présente la probabilité de décès pour un feu en chalumeau lors d'une fuite du gazoduc. La probabilité de décès diminue en s'éloignant de la source de la fuite. On notera que la probabilité de décès de 1% est potentiellement atteinte à 19 m.

Figure 3.6 Surpression de pointe – explosion de la bâtisse



La Figure 3.6 présente la surpression qui se produirait s'il y avait fuite de gaz à l'intérieur d'un poste de comptage ou de régulation de la pression et allumage. On notera que le niveau estimé de surpression de 1 psi (livre par pouce carré) ou 6,9 kPa est atteint à 75 m.

Figure 3.7 Probabilité de dommages – explosion de la bâtisse



La Figure 3.7 présente la probabilité de rupture de tympan, la probabilité de décès suite à l'écroulement de structures, et la probabilité de bris de fenêtre suite à une fuite de gaz naturel à l'intérieur d'une bâtisse de comptage ou de régulation de la pression et s'il y avait allumage. On notera que la probabilité de décès de 1% est potentiellement atteinte à 35 m.

Tableau 3.1 Résumé des distances de dangers pour la planification d'urgence pour les scénarios choisis

No. de Scénario	Description des scénarios	Danger	Taux de fuite ou quantité	Durée de la fuite	Modèle utilisé	Seuil d'effets	Distance pour danger potentiel (m)
PA1 2400 kPa ~ 2.0 km	Gazoduc - Rupture complète (2 fuites x 610 mm)	Boule de feu	6 050 kg	8 s	CCPS, Hymes, 1983	Dose thermique = 5 kW/m ² (maximum de courte durée)	350
		Feu en chalumeau	410 kg/s	Débit diminuant jusqu'à nul	CCPS	1 % de décès (Exposition de 40 secondes)	175
PA2 2400 kPa ~ 2.0 km	Gazoduc – Rupture partielle (610 mm)	Boule de feu	3 360 kg	7 s	CCPS, Hymes, 1983	Dose thermique = 5 kW/m ² (maximum de courte durée)	290
		Feu en chalumeau	370 kg/s	Débit diminuant jusqu'à nul	CCPS	1 % de décès (Exposition de 40 secondes)	160
PB1 9928 kPa ~ 1.8 km	Gazoduc - Rupture complète (2 fuites x 323.9 mm)	Boule de feu	6 250 kg	8 s	CCPS, Hymes, 1983	Dose thermique = 5 kW/m ² (maximum de courte durée)	355
		Feu en chalumeau	400 kg/s	Débit diminuant jusqu'à nul	CCPS	1 % de décès (Exposition de 40 secondes)	175
PB2 9928 kPa ~ 1.8 km	Gazoduc – Rupture partielle (323.9 mm)	Boule de feu	3 640 kg	7 s	CCPS, Hymes, 1983	Dose thermique = 5 kW/m ² (maximum de courte durée)	300
		Feu en chalumeau	380 kg/s	Débit diminuant jusqu'à nul	CCPS	1 % de décès (Exposition de 40 secondes)	165
P3	Fuite de gazoduc (10% de la capacité ultime)	Feu en chalumeau	2,45 kg/s	Débit régulier	CCPS	Dose thermique = 5 kW/m ² (maximum de courte durée)	23
						1 % de décès (Exposition de 40 secondes)	19
B1	Explosion de bâtisse	Explosion confinée	14 kg		Multi énergie	Surpression = 6,9 kPa (1 lb/po ²)	75
						1 % Décès	31

3.3 Analyse de fréquence

La fréquence pour chaque type de fuite a été déterminée en utilisant les fréquences publiées pour les gazoducs. Selon les données d'incidents de gazoducs (1984 à 2001) obtenues de l'«Office of Pipeline Safety» du «U.S. Department of Transportation» (US DOT), la fréquence potentielle de bris d'un gazoduc de gaz est 0.115 par millier de kilomètres•année. Les bris de gazoducs représentent les incidents rapportables classés comme ruptures ou fuites par les règlements du US DOT, pour les conduites de transmission ou de collecte. Environ quarante un (41%) pourcent de ces défaillances sont classées comme ruptures, et le reste comme fuites. Une analyse plus détaillée de ces événements par l'«Office of Pipeline Safety» montre que 25% de ces ruptures sont des ruptures complètes. Les fréquences de référence de défaillance qui en résultent sont donc:

- Rupture complète: 0.012 par mille km•an
- Rupture partielle: 0.036 par mille km•an
- Fuite: 0.067 par mille km•an

Ces fréquences sont applicables à tous les types de gazoducs sans égard pour le niveau de contrainte ou les causes de perte de confinement.

Pour les gazoducs qui opèrent sous des contraintes qui sont inférieures à 30% SMYS «specified minimum yield stress», une étude récente démontre que les brèches causées par la corrosion ne peuvent causer une rupture, car les fissures s'arrête avant de d'atteindre le point de rupture. (Leis, *et al.*, 2003). De plus, les recherches qui sont rapportées dans la même étude indiquent que des conclusions similaires sont valides pour les dommages mécaniques causés par des forces externes à moins qu'ils surviennent sous des circonstances très spéciales. Cependant, il est indiqué que ces conclusions sont préliminaires. Il est aussi souligné que les tests sous pression des gazoducs avant qu'ils soient mis en service éliminent les défauts de construction comme cause crédible de rupture.

Il est à souligner que le segment opérant à 2400 kPa (610 mm) sera opéré à moins de 30% SMYS.

Donc, se basant sur les données de Leis, *et al.* (2003), les fréquences de rupture ont été ajustées comme suit.

Dans la base de données du département des transports des Etats-Unis (US DOT), les ruptures qui sont identifiées comme ayant été causées par la corrosion ou des défauts de construction ont été rapportées comme sources de fuites au lieu de ruptures complètes. Ces données ont donc été ajoutées aux chiffres des fuites. Cependant, on a aussi conservé par prudence les ruptures qui sont identifiées comme ayant été causées par des dommages mécaniques par des forces externes. Donc, les fréquences de ruptures et de fuites pour le gazoduc à basse pression sont de :

- Rupture complète: 0.0063 par mille km•an
- Rupture partielle: 0.019 par mille km•an
- Fuite: 0.090 par mille km•an

La probabilité d'ignition de la fuite est une donnée importante pour estimer le risque provenant d'une fuite de gaz naturel d'un gazoduc. Selon les données d'incidents du US

DOT et la probabilité d'ignition pour les gazoducs européens de transmission de gaz (Risk & Reliability Associates Pty Ltd., 2002), nous avons utilisé une probabilité d'ignition immédiate de 20% pour les ruptures totales ou partielles. Pour la probabilité d'ignition retardée, une valeur de 10% a été estimée. Pour les fuites mineures, une probabilité d'ignition de 3% est rapportée pour les gazoducs européens de transmission de gaz (Risk & Reliability Associates Pty Ltd., 2002),

Les postes de comptage et de régulation sont bien ventilés et équipés de senseurs de gaz combustible et d'alarmes, s'il y survenait une fuite, si elle est petite, elle sera probablement corrigée avant que la concentration de gaz naturel n'atteigne les limites explosives. Cependant, en cas de rupture catastrophique de l'équipement, s'il n'y a pas d'ignition immédiate de la fuite, une concentration explosive peut être atteinte presque immédiatement. L'ignition à ce moment résulterait en un scénario d'explosion confinée. La fréquence d'explosion confinée est basée sur des données pour les vannes et les appareils de mesure (WASH 1400). Prenant en compte le nombre d'équipements dans un poste typique de comptage ou de régulation et posant l'hypothèse que toutes ces fuites résulteront en une explosion, la fréquence d'explosion confinée est estimée à 0.11 par mille ans. Cette valeur est plusieurs fois supérieure à l'expérience récente de la Société en commandite Gaz Métropolitain pour des explosions de bâtisses chez ses clients. Donc, ces valeurs nous apparaissent prudentes pour les fins de cette étude et de plus, elles sont rapportées dans la référence citée.

Un résumé des conséquences de ces événements dangereux et des fréquences utilisées pour cette étude, est présenté au Tableau 3.2. Ces fréquences ont été développées basées sur l'arbre d'événements présenté à la Figure 3.1, et utilisant les fréquences de référence de défaillances pour chaque scénario et les probabilités d'ignition. Pour l'estimation de la probabilité d'incendie pour des ruptures complètes ou partielles, on a estimé de façon conservatrice que les conséquences pendant une ignition retardée seraient semblables à celles se produisant après une ignition immédiate. Les fréquences d'incendie pour les ignitions retardées et immédiates ont donc été additionnées pour donner la fréquence totale du danger.

Tableau 3.2 Résumé des fréquences pour les scénarios de dangers retenus

Scénario	Fréquence
Gazoduc de 9928 kPa – Rupture complète boule de feu / feu en chalumeau	$3.6 \times 10^{-9} / \text{m}\cdot\text{an}$
Gazoduc de 9928 kPa – Rupture partielle boule de feu / feu en chalumeau	$1.1 \times 10^{-8} / \text{m}\cdot\text{an}$
Gazoduc de 9928 kPa – Fuite / feu en chalumeau	$2.0 \times 10^{-9} / \text{m}\cdot\text{an}$
Gazoduc de 2400 kPa – Rupture complète boule de feu / feu en chalumeau	$1.9 \times 10^{-9} / \text{m}\cdot\text{an}$
Gazoduc de 2400 kPa – Rupture partielle boule de feu / feu en chalumeau	$5.7 \times 10^{-9} / \text{m}\cdot\text{an}$
Gazoduc de 2400 kPa – Fuite / feu en chalumeau	$2.7 \times 10^{-9} / \text{m}\cdot\text{an}$
Bâtisse – Explosion confinée	$1.1 \times 10^{-4} / \text{an}$

3.4 Estimation du risque

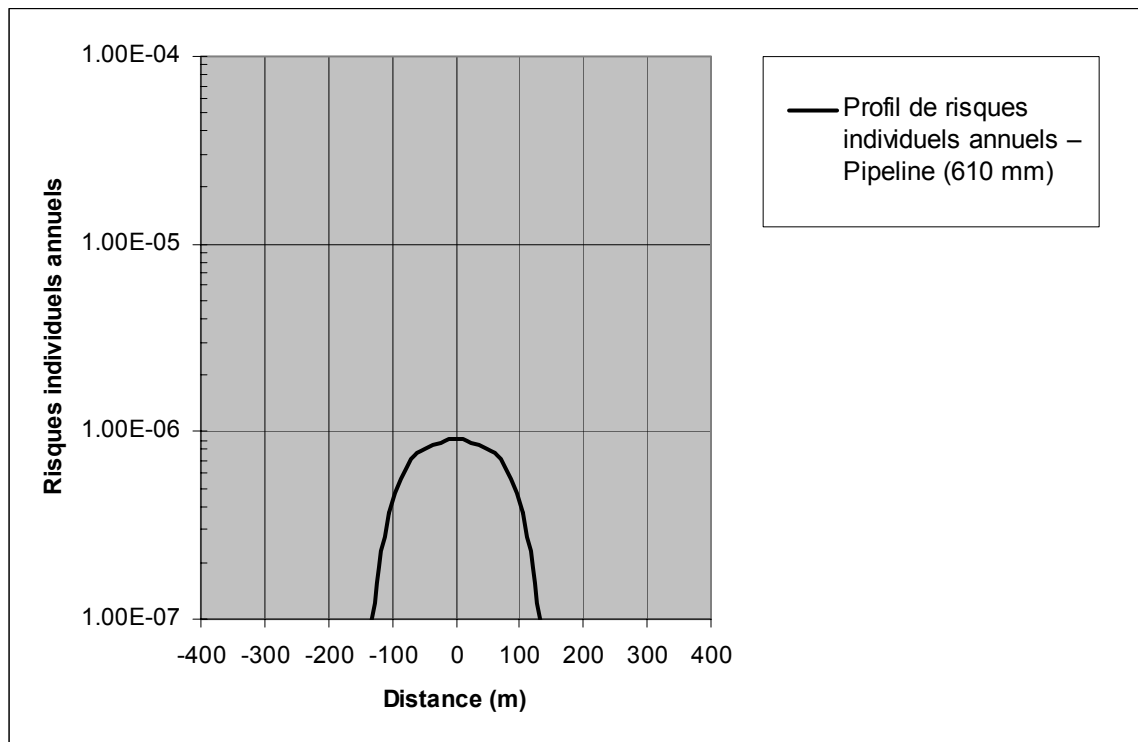
Les profils de risques individuels autour du gazoduc et des postes de comptage et régulation de pression sont le résultat de l'étape de l'estimation de risques. Ceci implique de combiner les fréquences de dangers avec les conséquences exprimées en terme de probabilité de décès

en fonction de la distance de la source de risques (Alp et Zelensky, 1996). Les profils de risques ont été obtenus en utilisant notre modèle informatique qui tient compte des sources linéaires comme les gazoducs.

Les profils de risques individuels sont présentés à la Figure 3.8 pour le gazoduc (Figure 3.8a pour la section de 2400 kPa (610 mm), Figure 3.8b pour la section de 9928 kPa (323.9 mm).

Pour la section de 2400 kPa (610 mm), un niveau de risque de 1 chance de décès sur 1 million (10^{-6}), 10 chances sur 1 million (10^{-5}), et de 100 chance sur 1 million (10^{-4}) par année ne sont pas atteintes. De plus le niveau de risque serait de 0.9 chances de décès sur 1 million par année pour quelqu'un qui serait situé au-dessus du gazoduc.

Figure 3.8a Profil de risques individuels annuels – Gazoduc (610 mm)



Pour la section de 9928 kPa (323.9 mm), un niveau de risque de 1 chance de décès sur 1 million (10^{-6}) par année est atteint à une distance de 85 m de chaque côté du gazoduc. De plus le niveau de risque serait de 1.7 chances de décès sur 1 million par année pour quelqu'un qui serait situé au-dessus du gazoduc. Les probabilités de 10 chances de décès (10^{-5}) et de 100 chances (10^{-4}) par année ne sont pas atteintes.

La Figure 3.9 présente le profil de risque autour des postes de comptage et de régulation de la pression. Les niveaux de risque autour des postes de comptage et de régulation de la pression sont de 10 chances sur 1 million (10^{-5}) et 1 chance sur 1 million (10^{-6}) respectivement à 22 m et 32 m des bâtisses. Le niveau de risque de 100 chances sur 1 million (10^{-4}) n'est pas atteint.

Figure 3.8b Profil de risques individuels annuels – Gazoduc (323.9 mm)

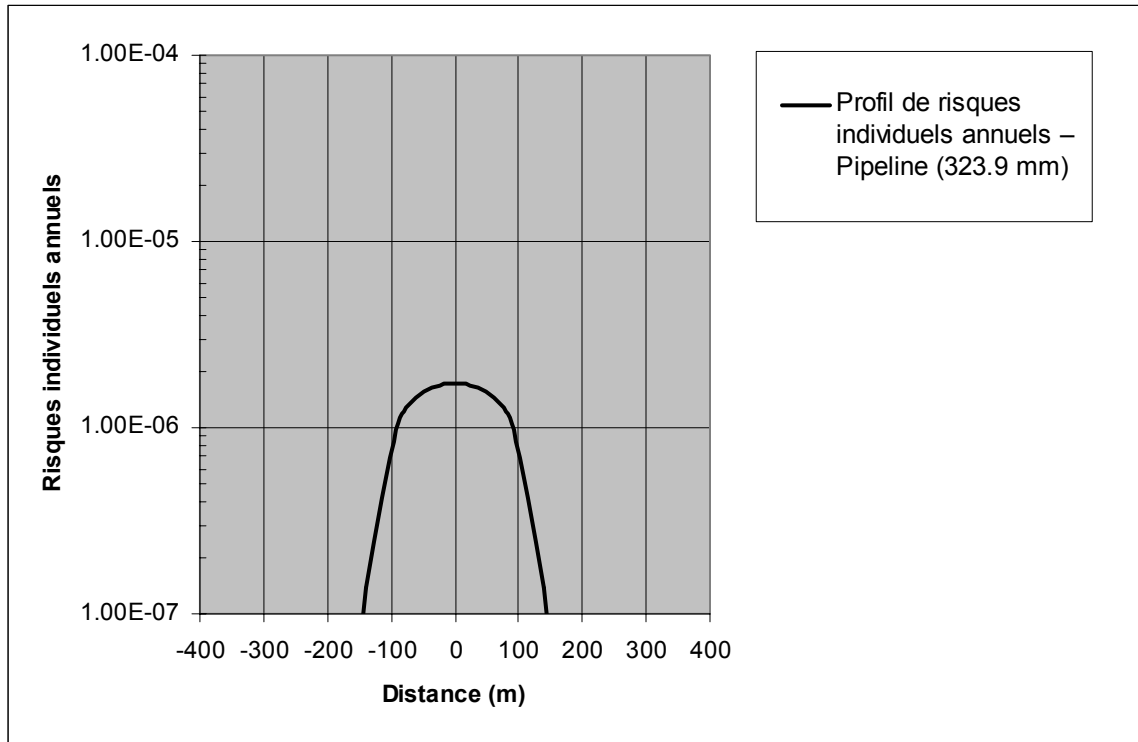
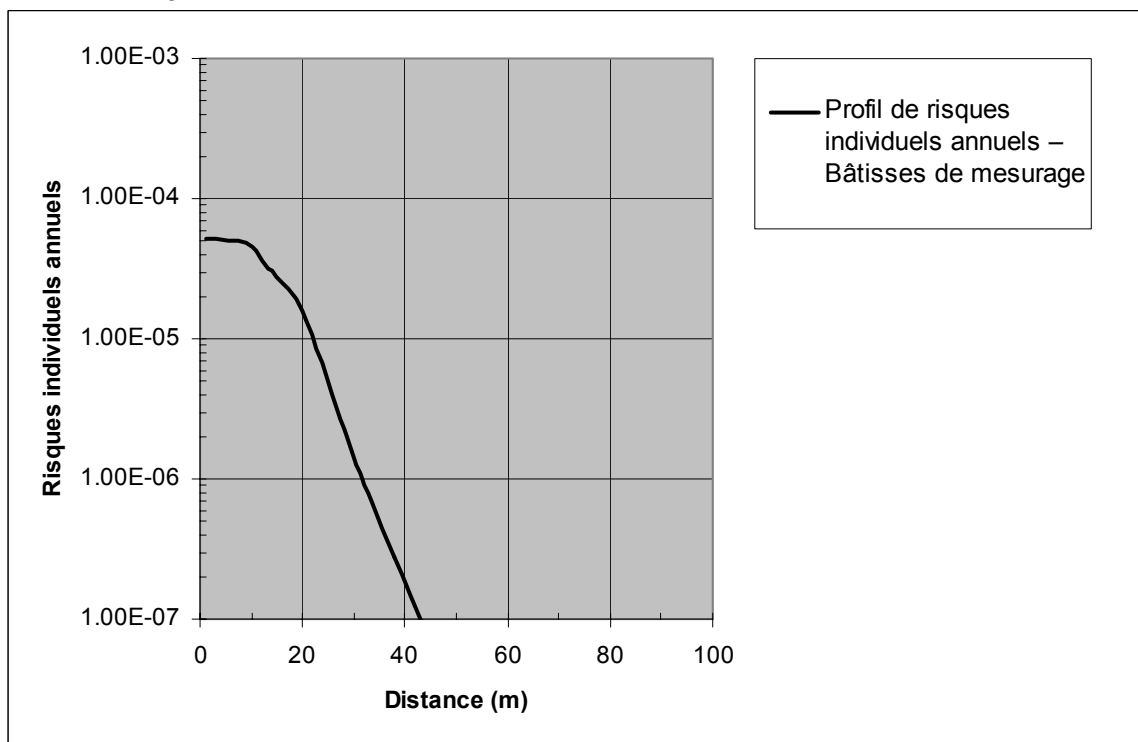


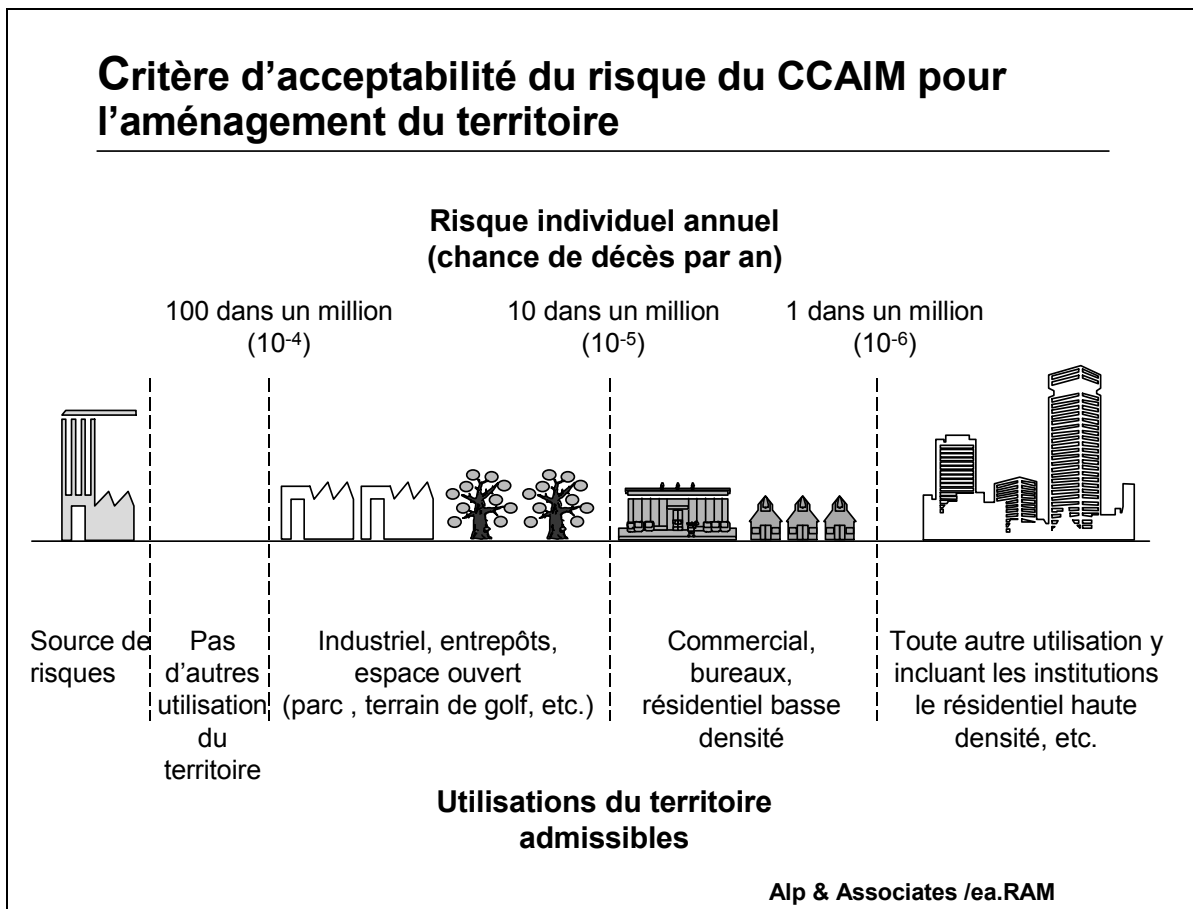
Figure 3.9 Profil de risques individuels annuels – Postes de comptage et de régulation de pression



Le Tableau 3.3 résume ces données.

Tableau 3.3 Résumé des distances pour les critères d'acceptabilité de risques pour le public du CCAIM

Localisation	Scénarios Inclus	Dangers	Distance (m) pour le niveau de risques (chance de décès par année)		
			10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Gazoduc (2400 kPa)	Rupture complète, rupture partielle, et fuite (610 mm)	Boule de feu / Feu en chalumeau	Pas atteint	Pas atteint	Pas atteint
Gazoduc (9928 kPa)	Rupture complète, rupture partielle, et fuite (323.9 mm)	Boule de feu / Feu en chalumeau	Pas atteint	Pas atteint	85
Édifice	Fuite importante	Explosion confinée	Pas atteint	22	32

Figure 3.10 Critères d'acceptabilité du risque du CCAIM pour l'aménagement du territoire

Selon les critères du CCAIM (Figure 3.10), aucune autre installation ne devrait être permise à l'intérieur de la zone de risque individuel de 100 chances de décès sur 1 million (10^{-4}) par année. Entre 100 sur 1 million (10^{-4}) et 10 sur 1 million (10^{-5}), les usines de fabrication, les entrepôts et les parcs sont permis. Entre 10 sur 1 million (10^{-5}) et 1 sur 1 million (10^{-6}), les commerces, les bureaux et des zones résidentielles de faible densité sont permis. Pour un

risque individuel plus faible que 1 chance de décès sur 1 million (10^{-6}), aucune restriction sur le développement n'est nécessaire

3.5 Incertitude et conservatisme dans l'estimation des risques

Il y a un fort degré d'incertitude dans les estimations de risques. Plusieurs hypothèses doivent être faites pour les analyses de conséquences et de fréquences qui peuvent changer le niveau de risques calculé de plusieurs ordres de grandeur. Il est habituel de s'assurer que les risques estimés sont réalistes mais errent du côté prudence (i.e. surestimation des risques). Cette approche a été suivie pour la présente étude.

La plus grande source d'incertitude est l'analyse de fréquence. Les taux de défaillance spécifiques pour un diamètre donné de gazoduc et ses équipements hors sol ne sont pas disponibles. L'analyse utilise des fréquences génériques pour la transmission du gaz et les gazoducs sur les champs de production (1984 à 2001). Ces données comprennent des gazoducs de divers diamètres construits à des époques différentes et opérant dans des environnements fort différents. De même, des taux génériques ont été utilisés pour l'analyse des défaillances dans les postes de comptage et de régulation de la pression.

Nous croyons que les pratiques qui seront utilisées dans le présent projet réduiront les fréquences de bris, et que les fréquences qui sont utilisées représentent des estimés conservateurs de la probabilité d'incidents pour le gazoduc sujet de la présente étude.

Nous soulignons que pour la section de gazoduc qui est sous faible contrainte (2400 kPa), tous les incidents qui sont rapportés comme « ruptures » dans la base de données de la US DOT qui furent causés par « des dommages mécaniques par des forces externes », ou « d'autres » causes, ont été traités comme des « ruptures », bien que les recherches récentes indiquent que seulement un faible pourcentage de ces incidents résulteront en ruptures. (Leis, *et al.*, 2003) Si nous posons l'hypothèse que seulement 10% de ces incidents se développeront en ruptures, le risque individuel maximum au dessus du gazoduc serait plus près de 0.1×10^{-6} au lieu de 0.9×10^{-6} chance de décès tel que rapporté précédemment.

Lors de l'analyse de conséquences, des hypothèses conservatrices ont été posées concernant l'exposition des personnes aux dangers résultant d'une fuite de gaz. On a posé l'hypothèse que les personnes seraient dehors 100% du temps et totalement exposées aux effets des radiations thermiques d'incendies. On n'a pris aucun compte de la protection supplémentaire offerte aux personnes qui sont à l'intérieur et qui se protègent lors d'un incendie. Ces hypothèses conduisent à une surestimation de la charge de radiation thermique reçue par les récepteurs exposés.

4 RÉSUMÉ DES CONCLUSIONS

Un résumé des conclusions est présenté dans les paragraphes qui suivent.

4.1 Zones de planification d'urgence

Les zones de planification d'urgence sont basées sur les conséquences des pires scénarios crédibles. Pour le gazoduc proposé, les zones de planification d'urgence ont été déterminées pour des fuites du gazoduc et dans les installations hors sol situées dans les bâtisses. Les informations suivantes devraient servir à l'élaboration des zones de planification d'urgence :

- Pour des fuites en provenance du gazoduc qui résulteraient en dangers d'incendie, la distance est de 350 m pour le segment de 2400 kPa (610 mm), et 355 m pour le segment de 9928 kPa (323.9 mm),
- Pour les bâtisses de comptage et de régulation de pression la distance est de 75 m.

Ces distances peuvent être utilisées comme point de départ pour la préparation des plans d'urgence.

Suite à une revue des photos aériennes, on a noté les types suivants d'utilisation de sol dans ces zones de planification d'urgence.

- Autour du gazoduc, quelques habitations à 250 mètres du terrain, des bâtiments à bureaux, des domaines industriels, des parcs, des artères de circulation majeures,
- Autour des postes de comptage et de régulation de pression (on a assumé le Point P₈), des domaines industriels, des artères de circulation majeures.

4.2 Enjeux de planification du territoire

Les décisions futures d'aménagement du territoire peuvent être basées sur les risques individuels résultant de l'analyse de risques en comparaison avec les lignes directrices du CCAIM. Les lignes directrices du CCAIM ont été présentées à la Figure 3.10.

Le gazoduc proposé a une courte section dans un secteur industriel.

Le risque maximum pour le gazoduc (section haute pression) est approximativement 1.7 chances pour un million, et diminue avec la distance pour 1 chance par million à une distance de 85 m.

Les utilisations du sol existantes sont donc conformes avec les lignes directrices du CCAIM.

5 RÉFÉRENCES

- Alp, E., Zelensky, M.J. (1996) “Risk Quantification for Meteorology and Direction dependent Hazards due to Point and Linear Risk Sources.” J. of Loss Prevention in the Process Industries, v.9, pp. 135-145.
- API 521 (1997) Guideline for Pressure Relieving and Depressuring Systems, Fourth Edition, American Petroleum Institute, March.
- Bell, R.P. (1978) “Isopleth calculations for Ruptures in Sour Gas Pipelines”, Energy Processing/Canada, July-August 1978, pp. 36-39.
- Bovar (1997) “Risk Assessment for Natural Gas Pipeline Extension to Portland Natural Gas Transmission System”, Bovar Environmental Report BE 74181-05, March.
- CCPS (1994) Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs, Center for Chemical Process Safety, New York. ISBN 0-8169-0474-X.
- Leis, B.N., Chang, O.C., Bubenik, T.A. (2002) “Leak Versus Rupture Considerations for Steel Low-Stress Pipelines”, Report to Gas Research Institute, Batelle Contract No. 8194, Columbus, OH (March).
- Risk & Reliability Associates Pty Ltd. (2002) Guide to Quantitative Risk Assessment (QRA), Office of Gas Safety, Standards Australia ME-038-01 Committee, Pipelines – Gas and liquid petroleum.
- TNO (1992) Methods for the determination of possible damage, Committee for the Prevention of Disasters caused by dangerous substances, Directorate General of Labour of the Ministry of Social Affairs and Employment, CPR 16E, ISBN 90-5307-052-4, The Hague.
- US DOT Office of Pipeline Safety, PipelineStatistics: Distribution & Transmission Annual Mileage Totals (1984 – 2000).
- US DOT Office of Pipeline Safety, PipelineStatistics: Natural Gas Incident Data, mid 1984 – 2001.
- US DOT Office of Pipeline Safety, PipelineStatistics: Natural Gas Incident Data, 2002 – Present.
- US EPA (1999) Risk Management Program Guidance for Offsite Consequence Analysis. United States Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. EPA 550-B99-009, April.
- WASH 1400 (1975) Reactor Safety Study, Appendix III – Failure Data. US Nuclear Regulatory Commission (NUREG-75/014), in Henley, E.J., and Kumamoto, H. (1981) Reliability Engineering and Risk Assessment. Prentice Hall, NJ. ISBN 0-13-772251-6.

ANNEXE A. Procédure pour le calcul des effets de radiations thermiques et de surpression

En premier, le niveau de danger L est calculé en utilisant la formule appropriée de PROBIT (voir Tableau). La PROBIT (unité de probabilité) est ensuite estimée à l'aide de l'équation $Y = k_1 + k_2 \ln L$, où k_1 et k_2 sont les paramètres empiriques de PROBIT.

Y peut être relié au type et niveau d'effets en termes de « probabilité (%) de décès, de blessures ou de dommages qui se produisent ».

Paramètres de PROBIT pour les incendies et explosions (TNO, 1992)

Type de blessures ou dommages	Charge de dangers L	k_1	k_2
INCENDIE Brûlures fatales	$\int I^{4/3} dt$	-36.38	2.56
EXPLOSIONS			
Décès (hémorragie des poumons)	S	5.0	-5.74
Rupture de tympan	P_o	-12.6	1.524
Dommages aux structures, écroulement complet	V	5.0	-0.22
Bris de fenêtre	P_o	-16.58	2.53

t = temps d'exposition (s)

I = Intensité de radiation thermique (W/m^2)

S = $4.2/\bar{P} + 1.1/\bar{i}$, $\bar{P} = P / P_{atm}$, $\bar{i} = i / (\sqrt{P_{atm}} \sqrt[3]{m})$

P = $P_o + \frac{5P_o^2}{2P_s + 1,400,000}$

V = $\left(\frac{40,000}{P_o}\right)^{7.4} + \left(\frac{460}{i}\right)^{11.3}$

P_o = surpression de pointe (N/m^2)

i = impulsion $\frac{1}{2} P_o t_p$ ($N \cdot s/m^2$), t_p = durée de la phase positive de l'explosion (s)

m = Poids d'une personne (kg)