



Sécurité des installations de gaz naturel à haute pression

Rapport-cadre
de l'estimation de l'ampleur des dommages
et de l'étude de risque standardisées



Impressum

Direction:

Swissgas, Dr. M. Harzenmoser
Grütlistrasse 44
8027 Zurich

Groupe d'experts:

Office fédéral de l'énergie (OFEN), section Droit et transport par conduites	Ph. Huber
Inspection fédérale des pipelines (IFP)	R. Wendelspiess
Office fédéral de l'environnement (OFEV), section Prévention des accidents majeurs et mitigation des séismes	B. Gay
	Dr. M. Merkofer
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL)	Dr. J. Hansen
Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau, Chemiesicherheit	Dr. R. Dumont
Erdgas Ostschweiz AG (EGO)	A. Schwager
Swissgas	Dr. M. Harzenmoser

Auteurs:

suisse plan
Ingenieure und Planer

Oerlikonerstrasse 88
8057 Zürich

www.suisseplan.ch

Dr. J. Kemmler
D. Thurnherr
B. Locher
R. Sägesser
A. Obrist

Le rapport a été mis en consultation auprès des services cantonaux. L'écho fut positif et les demandes de modification ont été prises en compte.

Commande:

Swissgas
Grütlistrasse 44
8027 Zürich

www.swissgas.ch

Préface

Les installations de gaz naturel à haute pression offrent la possibilité de transporter et de stocker de grandes quantités de gaz naturel. De ce fait, elles constituent un facteur important pour l'approvisionnement énergétique sûr de la Suisse. Se basant sur la loi sur les installations de transport par conduites du 4 octobre 1963 et les ordonnances y relatives, la Confédération a posé dès le départ des exigences élevées en matière de sécurité technique. Suite à la mise en vigueur de l'ordonnance sur les accidents majeurs le 27 février 1991, des instruments supplémentaires destinés à l'évaluation des risques induits par les installations avec un grand potentiel de danger chimique ont été élaborés. Alors que la législation sur les conduites vise à sécuriser essentiellement la conduite et la distance requise de 10 m vers d'autres ouvrages, l'ordonnance sur les accidents majeurs englobe également le secteur à l'extérieur de ce couloir pour assurer la protection de la population et de l'environnement.

L'ordonnance sur les accidents majeurs exige l'étude des risques pour la population et l'environnement provenant des installations qui lui sont subordonnées. Se basant sur cette évaluation du risque, l'autorité de surveillance doit déterminer si ces risques sont supportables ou s'il y a lieu de prescrire des mesures pour les diminuer. Comme, de par sa nature, le gaz naturel peut s'échapper des installations à haute pression, il se pose toujours les mêmes questions au sujet des conséquences en cas d'accident majeur. Par conséquent, depuis 1991, et en collaboration avec les autorités, l'industrie gazière a compilé dans un rapport-cadre «Sécurité des installations de gaz naturel à haute pression» les déclarations générales en matière de risque induit par les installations de gaz naturel à haute pression. Ce rapport-cadre s'est avéré être un instrument utile permettant de standardiser les déterminations du risque dans les installations de gaz naturel à haute pression, et a facilité la communication entre les concepteurs, la population concernée ainsi que les autorités fédérales, cantonales et communales. Sur la base des expériences acquises, ce rapport a été révisé en 1997.

Au cours de ces dernières années, la démographie croissante autour des installations de gaz naturel à haute pression a entraîné davantage de conflits d'intérêts et une augmentation des risques dans les installations existantes. Les expériences lors de l'évaluation de ces projets ont révélé que la méthode de calcul présentée dans le rapport-cadre édité en 1997 ne tenait pas compte de diverses mesures judicieuses visant à diminuer les risques. De plus, ces dernières années, de nouvelles données ont été collectées pouvant servir de base aux calculs de risque. Un groupe de travail, composé des représentants de l'industrie gazière suisse, des cantons de Zurich et d'Argovie, de l'Inspection fédérale des pipelines, de l'Office fédéral de l'environnement et de l'Office fédéral de l'énergie a mis à jour ce rapport-cadre en y intégrant les dernières connaissances internationales, et l'a adapté aux conditions actuelles. Je remercie ici toutes les personnes qui ont œuvré à cette nouvelle édition et j'espère que ce rapport-cadre fournira à l'avenir également une contribution essentielle à une évaluation réelle du risque induit par les installations de conduites et à une protection optimale de la population et de l'environnement.

Bundesamt für Energie

Franz Schnider
Vizedirektor

Table des matières

1	Introduction.....	1
1.1	Domaine d'application.....	1
1.2	Bases.....	2
1.2.1	Bases légales.....	2
1.2.2	Bibliographie.....	2
1.3	Structure du rapport-cadre.....	3
2	Scénarios de dommages pertinents.....	4
2.1	Arbre des causes.....	4
2.2	Arbre des événements.....	4
2.3	Propriétés et effets du gaz naturel.....	5
2.3.1	Propriétés chimiques et physiques.....	5
2.3.2	Processus de combustion.....	8
2.4	Scénarios d'incendie.....	9
2.4.1	Boule de feu.....	9
2.4.2	Feu de torche.....	10
2.5	Scénarios d'explosion.....	11
2.6	Dommages subséquents.....	12
3	Marche à suivre pour l'évaluation et l'appréciation du risque.....	13
3.1	Bases légales.....	13
3.2	Indicateurs de dommages.....	13
3.3	Estimation de l'ampleur des dommages (rapport succinct).....	13
3.4	Analyse des risques (étude de risque et appréciation du risque).....	14
3.5	Dommages consécutifs.....	14
4	Démarche d'estimation de l'ampleur des dommages.....	15
5	Démarche d'étude de risque.....	18
5.1	Définition du risque.....	18
5.2	Marche à suivre pour l'étude de risque (diagramme PC).....	18
5.3	Marche à suivre pour l'appréciation de l'acceptabilité du risque.....	20
6	Ampleur des dommages.....	21
6.1	Détermination de l'indice d'accident majeur.....	21
6.2	Scénarios d'incendie.....	21
6.2.1	Détermination des létalités.....	22
6.2.1.1	Létalités pour des personnes se trouvant à l'air libre.....	22
6.2.1.2	Létalités pour des personnes se trouvant dans des bâtiments.....	23
6.2.2	Détermination des rayons de létalité.....	24
6.2.2.1	Boule de feu.....	24
6.2.2.2	Feu de torche.....	27
6.3	Scénarios d'explosion.....	29

7	Hypothèses d'occupation	30
7.1	Méthode	30
7.2	Habitations	30
7.3	Entreprises commerciales et artisanales, industries, services.....	31
7.4	Probabilités de séjour (facteurs de présence)	32
7.5	Lieux et bâtiments accessibles au public	32
7.6	Manifestations	33
7.7	Objets particuliers bâtiments.....	33
8	Objets particuliers dans la zone d'influence d'installations de gaz naturel à haute pression.....	34
8.1	Routes.....	34
8.2	Lignes de chemin de fer	35
8.2.1	Hypothèses d'occupation pour le trafic ferroviaire.....	35
8.2.2	Scénarios de dommages.....	36
8.2.3	Mode de calcul	37
8.2.4	Boule de feu suivi d'un feu de torche	37
8.2.5	Feu de torche	42
8.2.6	Domage mécanique aux voies	43
8.2.7	Aperçu des scénarios à calculer	43
8.3	Objets particuliers bâtiments.....	45
8.3.1	Exposition des personnes	45
8.3.2	Centres commerciaux.....	45
8.3.3	Hôpitaux, centres de soins, etc.	46
9	Rupture des installations de gaz naturel à haute pression	47
9.1	Aperçu des installations de gaz naturel à haute pression	47
9.1.1	Les gazoducs à haute pression (conduites de transport).....	47
9.1.2	Les réservoirs tubulaires.....	47
9.1.3	Les postes	47
9.2	Rupture de conduites de transport.....	48
9.2.1	Arbre des causes et des événements	49
9.2.2	Fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers	50
9.2.3	Fréquences de rupture à la suite de mouvements de terrain.....	52
9.2.4	Fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau	53
9.2.5	Effet des mesures.....	54
9.2.5.1.	Augmentation de l'épaisseur de la paroi	54
9.2.5.2.	Facteur de design.....	55
9.2.5.3.	Abaissement de la pression	55
9.2.5.4.	Recouvrement.....	56
9.2.5.5.	Plaques de protection	56
9.2.5.6.	Contrôle du tracé.....	56
9.2.5.7.	Cumul des mesures	57
9.2.6	Probabilités d'inflammation.....	57
9.3	Rupture de réservoirs tubulaires.....	58
9.3.1	Arbre des causes et des événements	58
9.3.2	Rayonnement thermique et rayons de létalité	59
9.3.3	Fréquences de rupture	61
9.3.4	Calcul de la courbe cumulative.....	62

9.4	Rupture d'installations de gaz naturel à haute pression dans des postes.....	63
9.4.1	Rupture totale de l'installation de gaz naturel à haute pression	63
9.4.2	Petites fuites sur l'installation de gaz naturel à haute pression	63
9.4.3	Domages en cas de rupture d'installations de gaz naturel à haute pression dans des postes	64
9.4.4	Fréquences de rupture	64
9.4.5	Calcul de la courbe cumulative.....	65
9.5	Rupture de gazoducs à haute pression dans des galeries, des canaux et autres environnements confinés	66
9.5.1	Galeries et canaux	66
9.5.2	Arbre des causes et des événements pour les galeries	67
9.5.2.1.	Effet d'une explosion	67
9.5.2.2.	Rupture totale.....	68
9.5.3	Arbre des causes et des événements pour les canaux.....	68
9.5.3.1.	Effets d'une explosion	68
9.5.3.2.	Rupture totale.....	69
10	Mesures de réduction du risque.....	70

Annexe

A	Exemple de calcul pour les habitations.....	A-1
A 1.	Situation.....	A-1
A 2.	Hypothèses d'occupation.....	A-2
A 3.	Estimation de l'ampleur des dommages.....	A-2
A 4.	Etude de risque (diagramme PC).....	A-5
A 4.1.	Identification des endroits à risque pertinents.....	A-5
A 4.2.	Calcul de l'ampleur des dommages.....	A-6
A 4.3.	Calcul des probabilités d'occurrence.....	A-15
A 4.4.	Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque.....	A-18
B	Exemple de calcul pour les entreprises commerciales et artisanales, et les routes.....	B-1
B 1.	Situation.....	B-1
B 2.	Hypothèses d'occupation.....	B-2
B 2.1.	Occupation des personnes pour les entreprises commerciales et artisanales.....	B-2
B 2.2.	Occupation des personnes pour le trafic routier basé sur le TJM.....	B-2
B 3.	Etude de risque (diagramme PC).....	B-3
B 3.1.	Identification des endroits à risque pertinents.....	B-3
B 3.2.	Calcul de l'ampleur des dommages.....	B-4
B 3.3.	Calcul des probabilités d'occurrence.....	B-7
B 3.4.	Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque.....	B-10
C	Exemple de calcul pour le train.....	C-1
C 1.	Situation.....	C-1
C 2.	Hypothèses d'occupation.....	C-2
C 3.	Etude de risque (diagramme PC).....	C-2
C 3.1.	Rayons de létalité.....	C-3
C 3.2.	Calcul des probabilités d'occurrence.....	C-3
C 3.3.	Boule de feu sans suivi d'un feu de torche.....	C-7
C 3.4.	Feu de torche après boule de feu.....	C-9
C 3.5.	Feu de torche.....	C-11
C 3.6.	Domage mécanique aux voies.....	C-13
C 3.7.	Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque.....	C-15
D	Exemple de calcul pour les réservoirs tubulaires.....	D-1
D 1.	Situation.....	D-1
D 2.	Hypothèses d'occupation.....	D-2
D 2.1.	Calcul de l'ampleur des dommages.....	D-2
D 2.2.	Calcul des probabilités d'occurrence.....	D-4
D 2.3.	Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque.....	D-7

Liste des tableaux

Tab. 1	Densité, point d'ébullition et point d'inflammation de quelques gaz (en conditions normales)	6
Tab. 2	Composition du gaz naturel en Suisse (Import 1996)	7
Tab. 3	Doses de rayonnement thermique des différentes létalités	22
Tab. 4	Facteurs de létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre	22
Tab. 5	Létalités standard pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario d'une boule de feu suivie d'un feu de torche	23
Tab. 6	Létalités standard pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario du feu de torche	24
Tab. 7	Rayons de létalité d'une boule de feu pour des personnes se trouvant à l'air libre et rayon $R_{ZI\ FE}$ pour l'inflammation de l'intérieur des bâtiments pendant la combustion de la boule de feu	26
Tab. 8	Rayons de létalité d'un feu de torche et rayon $R_{ZI\ FA}$ pour l'inflammation de l'intérieur d'un bâtiment dans le scénario d'un feu de torche	28
Tab. 9	Létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre en cas de surpression (pneumothorax)	29
Tab. 10	Létalité pour des personnes se trouvant dans des bâtiments pour une surpression de 0.4 bar (effondrement de bâtiments)	29
Tab. 11	Besoin moyen en surface habitable par personne en fonction de la zone d'habitation	31
Tab. 12	Facteurs de présence	32
Tab. 13	Aperçu de différents types de trains	35
Tab. 14	Létalités et durées de séjour lors du passage d'un train en fonction de la distance entre la ligne de chemin de fer et la rupture totale avec boule de feu (longueur du train 100 m)	38
Tab. 15	Létalités lors du passage d'un train en fonction de la distance entre la ligne de chemin de fer et la rupture totale avec boule de feu (longueur du train 300 m)	40
Tab. 16	Rayon R_{FAZ} à l'intérieur duquel on suppose une létalité de 100% pour les personnes dans des trains à une vitesse de 80 km/h en cas de feu de torche	42
Tab. 17	Fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers	50
Tab. 18	Fréquences de rupture minimales à la suite d'interventions de tiers pour les estimations de risque (pression 70 bar)	50

Tab. 19	Fréquences de rupture à la suite de mouvements de terrain (événements naturels)	52
Tab. 20	Fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau	53
Tab. 21	Probabilités d'inflammation selon le Health and Safety Executive (HSE)	57
Tab. 22	Rayons de létalité lors d'une boule de feu d'un réservoir tubulaire	60
Tab. 23	Létalités standardisées pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario d'une boule de feu	61
Tab. 24	Fréquences de rupture des conduites de liaison	62

Liste des illustrations

III. 1	Arbre des causes et des événements pour la rupture de conduites enterrées en environnement non confiné	5
III. 2	Limites entre les phases gazeuse et liquide: comparaison entre le méthane et quelques autres substances	8
III. 3	Limites d'inflammation du méthane en fonction de la température	9
III. 4	Boule de feu après rupture d'une conduite de gaz naturel à haute pression en Russie, en 2009 (Source: inconnue)	10
III. 5	Feu de torche après la rupture d'un gazoduc à haute pression à Gräveneck D, 2007 (Source: Feuerwehr-Weblog, 2007)	10
III. 6	Exemple de profil de l'ampleur des dommages	16
III. 7	Diagramme PC	20
III. 8	Arbre des causes et des événements de dommages pour le train dans la zone d'influence de conduites de gaz naturel à haute pression	36
III. 9	Arbre des causes et des événements calculés pour les conduites de grande taille ($\geq 14"$)	44
III. 10	Arbres des causes et des événements calculés pour des conduites de petite taille ($< 14"$)	44
III. 11	Arbre des causes et des événements pour la rupture de gazoducs à haute pression enterrés dans un environnement non confiné	49
III. 12	Arbre des causes et des événements pour la rupture totale (diamètre de fuite $>$ diamètre de conduite, en anglais "full bore rupture") de gazoducs à haute pression enterrés dans un environnement non confiné	49
III. 13	Influence du coefficient de conception sur les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_{DF})	55
III. 14	Influence de la hauteur de recouvrement sur les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_U)	56
III. 15	Arbre des causes et des événements pour la rupture d'un réservoir tubulaire dans un environnement non confiné	58
III. 16	Arbre des causes et des événements pour la rupture d'un gazoduc à haute pression dans un environnement confiné (poste)	63
III. 17	Arbre des causes et des événements pour la rupture d'une installation de gaz naturel à haute pression dans une galerie	67

- III. 18 Arbre des causes et des événements pour la rupture d'une installation de gaz naturel
à haute pression dans un canal

Index des mots-clés

A

Ampleur	I, II, IV, 14, 18, 19, 33, 44
Ampleur des dommages	I, 21
Ampleur du risque	19
Appréciation de l'acceptabilité du risque	14, 19, 21
Arbre des causes	I, 4
Arbre des événements	9, I, 4, 47, 55, 60
Arbres des événements	5

B

Boule de feu	I, VI, VII, 9, 23, 24, 25, 36, 37, 39, 55, 57, 58
--------------	---

C

Coefficient de conception	II, III, VI
Contrôles du tracé	53
Courbe cumulative	II, III, 14, 18, 19

D

Défauts de matériau	51
Diagramme PC	II, III, 14, 18, 19, 20

E

Endroits à risque	15, 17
Epaisseur de la paroi	48
Estimation de l'ampleur des dommages	1, 13, 15, 16, 17, 18, 29
Etude de risque	1, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 29, 33, 35, 63
Explosion	III, 11, 60, 62

F

Facteur de correction	VI, 49, 53
Facteurs de présence	31
Feu de torche	III, VI, 10, 22, 23, 24, 26, 27, 41, 42, 55, 57, 58, 60, 62
Fréquence de rupture	3, 46, 48, 50, 51, 58, 59, 62

G

Galleries	III, 1, 11, 62, 63
-----------	--------------------

H

Hauteur de recouvrement	53
-------------------------	----

I	
Indice d'accident majeur	II, IV, 19, 21
Interventions de tiers	48
L	
Létalité	19, 21, 22, 23, 24, 34, 37, 39, 44, 57, 58
Longueur de tronçon	18
M	
Mesures	24, 51, 53, 63
Mouvements de terrain	4, 46, 50
P	
Plaques de protection	53
Probabilité d'inflammation	54
Probabilité d'occurrence	14, 18, 19
Probabilité de séjour	IV, 19
Profil de l'ampleur des dommages	13, 16, 17
R	
Rayons de létalité	15, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 55, 56, 57, 58
Réservoir tubulaire	1, 55, 57
Risque	IV, 14, 18
Rupture	I, III, IV, 4, 5, 10, 47, 49, 50, 51, 55, 58, 60
Rupture totale	9, I, IV, 4, 5, 11, 15, 17, 19, 21, 36, 37, 39, 46, 47, 49, 50, 51, 54, 55, 57, 59, 60, 62
S	
Scénarios d'incendie	11, 12, 21
Stations	II, III, 1, 11, 60
Hypothèse d'occupation	3, 29

Définitions des notions

Accident majeur	Événement extraordinaire survenant sur une installation et entraînant des conséquences sérieuses sur la population ou l'environnement en dehors du site d'exploitation.
Ampleur des dommages / Ampleur	Les suites d'un incident peuvent avoir différents effets (rayonnement de chaleur, ondes de pression, projection de débris, etc.) sur la population et l'environnement. Selon l'atteinte occasionnée dans les environs, ces conséquences peuvent être dommageables. L'ampleur des dommages possibles est appelée ampleur des dommages.
Arbre des causes	L'arbre des causes représente, dans le présent rapport-cadre, les événements initiaux (incidents) pouvant entraîner une fuite et ainsi une libération involontaire de gaz naturel.
Arbre des événements	L'arbre des événements représente dans le présent rapport-cadre les événements susceptibles de résulter de la rupture de l'installation de gaz naturel à haute pression.
Boule de feu	La boule de feu est la combustion en forme de boule du gaz naturel après une rupture totale de la conduite avec inflammation immédiate ou à peine retardée du mélange gaz/air.
Coefficient de conception	Le coefficient de conception f_0 est le rapport entre la tension réelle et la limite d'élasticité d'un acier. Synonyme: facteur de design DF

$$f_0 = DF = \frac{P_d \cdot D_a}{20 \cdot R_{t0.5} \cdot s}$$

avec	s =	épaisseur de paroi min.	[mm]
	P_d =	pression de construction	[bar]
	D_a =	diamètre extérieur de conduite	[mm]
	f_0 =	coefficient de conception (=facteur de design DF)	[---]
	$R_{t0.5}$ =	limite élastique pour un allongement total de 0.5% (valeur minimale spécifique) à 20°C	[N/mm ²]

Les tronçons enterrés à l'extérieur des postes doivent respecter un coefficient de conception ≤ 0.6 conformément aux directives ERI.

Courbe cumulative	<p>La courbe cumulative (courbe escalier) est obtenue en ajoutant successivement les probabilités des indices d'accident majeur issus des différents scénarios de danger, en partant du scénario ayant l'indice d'accident majeur le plus élevé.</p> <p>Les rapports entre les indices d'accident majeur (ampleur des dommages) et les probabilités cumulées donnent la courbe cumulative dans le diagramme PC.</p>
Déflagration	<p>Tout comme une détonation, une déflagration est un processus rapide de combustion accompagné d'une génération de pression.</p> <p>La déflagration se différencie de la détonation par les caractéristiques suivantes: la pression d'explosion n'est provoquée que par gaz issus de la combustion qui se dilatent. Le mélange imbrûlé s'enflamme lors de la déflagration en se réchauffant au niveau du front de flammes. Le front de flammes ou de réaction se propage plus lentement que la vitesse du son dans le milieu respectif.</p> <p>Dans certains cas, les déflagrations peuvent se transformer en détonations. Les déflagrations pour lesquelles aucune pression importante n'a été générée sont également appelées " déflagrations étouffées".</p>
Détonation	<p>Tout comme une déflagration, une détonation est un processus rapide de combustion accompagné d'une génération de pression.</p> <p>A l'inverse de la déflagration, il se forme lors de la détonation une onde de choc qui traverse le mélange en feu à une vitesse supersonique. Les détonations atteignent des pressions d'explosion nettement supérieures aux déflagrations.</p> <p>Les détonations sont possibles en environnement confiné.</p>
Diagramme PC	<p>Le diagramme probabilité-conséquences est un instrument de représentation du risque illustrant la probabilité d'un accident majeur par rapport à l'ampleur des dommages sous forme de courbe cumulative.</p>
Dispersion	<p>La dispersion désigne dans ce rapport la propagation de gaz naturel qui s'échappe en raison d'une fuite sur une installation de gaz naturel à haute pression et son mélange (partiel) avec l'air ambiant.</p>
Environnement confiné	<p>Un environnement est dit confiné lorsque, en raison de volumes étroits, la concentration des gaz peut devenir explosive. Etant donné que, lors de l'inflammation du mélange gaz-air en milieu confiné, le gaz ne peut pas se disperser, d'énormes pressions d'explosion peuvent être générées. Les lieux confinés comprennent par exemple les pièces intérieures, les ruelles étroites, les cours intérieures, les galeries et tunnels ainsi que les lieux contenant de nombreux objets tridimensionnels ayant un effet d'obstruction (p. ex. la tuyauterie dans les postes, etc.).</p>

Explosion	Une explosion désigne une réaction d'oxydation ou de dégradation avec une brusque augmentation de la température et/ou de la pression. Il se produit alors une brusque dilatation du volume des gaz et la libération de grandes quantités d'énergie dans un petit espace. Les déflagrations et les détonations sont différents types d'explosions.	
Facteur de design (DF)	Synonyme de coefficient de conception	
Facteur de présence	Le facteur de présence évalue combien de temps (par jour, année, etc.) les personnes se trouvent dans la zone d'influence concernée de l'installation de gaz naturel à haute pression.	
Feu de torche	Lors d'un feu de torche, le gaz qui s'échappe de façon continue d'une fuite brûle sous la forme d'une flamme longitudinale, à la manière d'une torche. Le feu de torche est la forme de combustion la plus fréquente lorsque du gaz naturel s'échappe à la suite de la rupture d'une installation de gaz naturel avec inflammation subséquente.	
Fréquence de rupture	La fréquence de rupture indique la fréquence à laquelle se produit une rupture. L'indication concernant la rupture d'un gazoduc à haute pression est généralement en incidents par an et pour 1000 km de conduite (1000 km * y) ⁻¹ . Appelé anciennement taux de rupture.	
Indicateur de dommages	Variables permettant la représentation et l'évaluation uniformisées de l'ampleur des dommages subis par la population ou les milieux environnementaux potentiellement concernés. Dans le présent rapport-cadre, seul le nombre de personnes mortellement blessées est considéré comme un indicateur de dommages déterminant.	
Indice brut d'utilisation du sol (IBUS)	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 5px;"> $\text{Indice brut d'utilisation du sol (IBUS)} = \frac{\text{surface brut de plancher (SBP)}}{\text{surface de terrain déterminante (STd)}}$ </td> </tr> </table> <p>La définition précise de l'indice d'utilisation du sol figure dans les lois cantonales sur l'aménagement du territoire et les constructions ainsi que dans les réglementations communales de constructions et de zones.</p>	$\text{Indice brut d'utilisation du sol (IBUS)} = \frac{\text{surface brut de plancher (SBP)}}{\text{surface de terrain déterminante (STd)}}$
$\text{Indice brut d'utilisation du sol (IBUS)} = \frac{\text{surface brut de plancher (SBP)}}{\text{surface de terrain déterminante (STd)}}$		
Indice d'accident majeur	L'indice d'accident majeur est une grandeur standard affectée à l'ampleur des dommages calculée pour différents indicateurs de dommages. Il est proportionnel au logarithme de l'indicateur de dommages (p. ex. nombre de personnes tuées).	

Létalité	La létalité désigne, dans le présent rapport-cadre, la proportion de personnes, dans la zone d'influence de l'installation de gaz naturel à haute pression, susceptibles d'être mortellement blessées par l'incident causé par la conduite. En général, la létalité due aux répercussions thermiques est déterminante pour les installations de gaz naturel à haute pression.
Probabilité de séjour	La probabilité de séjour évalue combien de temps (par jour, année, etc.) les personnes se trouvent dans la zone d'influence de l'installation de gaz naturel à haute pression.
Rayon de létalité	Le rayon de létalité est, dans le présent rapport-cadre, la distance séparant l'épicentre d'un accident majeur (en général la fuite dans le cas des gazoducs) et un endroit de létalité donnée.
Risque	Le risque est déterminé par l'ampleur des dommages que subirait la population ou l'environnement à la suite d'accidents majeurs, et par la probabilité d'occurrence de ces derniers (art. 2, 5 ^e al. OPAM).
Rupture	Une rupture désigne, dans le présent rapport-cadre, l'apparition d'une fuite sur une installation de gaz naturel à haute pression, associée à une sortie incontrôlée de gaz naturel.
Rupture totale	La rupture totale d'un gazoduc à haute pression (en anglais "full bore rupture") est une fuite d'un diamètre au moins égal au diamètre de la conduite.
Scénario de danger	Le scénario de danger décrit, dans le cas présent, les conséquences possibles de la rupture d'une installation de gaz naturel à haute pression.
Surface brute de plancher (SBP)	La surface brute de plancher (SBP) est la somme de tous les étages y-c ceux qui sont enterrés en incluant la surface des murs extérieurs. La définition précise de la surface brute de plancher figure dans les lois cantonales d'aménagement et de construction et dans les règlements communaux de construction et de zones.
Surface nette de plancher (SNP)	La surface nette de plancher (SNP) est la portion de surface entre les éléments de construction extérieurs ou intérieurs. La définition précise de la surface nette de plancher figure dans les lois cantonales d'aménagement et de construction et dans les règlements communaux de construction et de zones.

Règle d'or:

$\text{Surface nette de plancher} = \text{Surface brute de plancher} - 15\%$
--

Surface de terrain déterminante (STd)	<p>La surface de terrain déterminante (STd) ou surface de terrain imputable comprend la surface du terrain dans la zone à bâtir, sans compter les surfaces relatives au réseau routier (principal, collecteur et de desserte).</p> <p>La définition précise de la surface constructible nette figure dans les lois cantonales sur l'aménagement du territoire et les constructions ainsi que dans les réglementations communales de constructions et de zones.</p>
---------------------------------------	--

Abréviations

A_b	Nombre de personnes concernées
AZ	Indice d'utilisation du sol [-]
D_a	Diamètre extérieur de conduite [mm]
D_F	Distance moyenne entre deux véhicules sur la route [km ou m]
DF	Facteur de design (= coefficient de conception)
EGIG	European Gas Pipeline Incident Data Group
F	Fréquence des trains [nombre de trains par heure]
f_0	Coefficient de conception (= facteur de design DF) [-]
K	Facteur de compressibilité
K_B	Facteur de correction en fonction de la situation de la conduite dans une zone à bâtir, pour la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers
K_{DF}	Facteur de correction en fonction du coefficient de conception, pour la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers
K_{S-W}	Facteur de correction en fonction de plaques de protection, pour la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers
K_T	Facteur de correction en fonction de contrôles hebdomadaires du tracé, pour la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers
K_{total}	Facteur de correction pour la fréquence de rupture [-]
$K_{\bar{U}}$	Facteur de correction en fonction du recouvrement, pour la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers
L	Longueur [m]
L_i	Létalité de $i\%$ [-]
LNG	Liquefied natural gas
LPG	Liquefied petroleum gas
M_g	Quantité de gaz libérée [kg]
N	Fréquence du trafic par heure et par sens de circulation [véhicules/h]
N_1	Indicateur de dommages pour le nombre de victimes [-]
P	Pression [bar]
P_d	Pression de calcul [bar]
R	Constante spécifique des gaz ($8.314472 \text{ J (mol K)}^{-1}$)
$R_{ZI FA}$	Rayon avec inflammation de l'intérieur des bâtiments en cas de feu de torche [m]
$R_{ZI FE}$	Rayon avec inflammation de l'intérieur des bâtiments en cas de boule de feu [m]

R ₂₅	Rayon de létalité avec létalité 25% [m]
R _{25 FA}	Rayon de létalité pour le feu de torche avec létalité 25% [m]
R _{25 FE}	Rayon de létalité pour la boule de feu avec létalité 25% [m]
R _{FAZ}	Rayon de létalité des passagers d'un train en cas de feu de torche
R _{10,5}	Limite élastique pour une élasticité globale de 0.5% (valeur minimale garantie) à 20 °C [N/mm ²]
S	Épaisseur de la paroi [mm]
SBP	Surface brute de plancher [m ²]
STd	Surface de terrain déterminante [m ²]
T	Température ambiante (290 K)
t _{FE}	Durée de combustion de la boule de feu [s]
TJM	Trafic journalier moyen [véhicules par jour]
V	Dose de rayonnement thermique [s(Wm ⁻²) ^{4/3}]
v	Vitesse [m/s]
μ	Masse moléculaire [kg mol ⁻¹]

1 Introduction

1.1 Domaine d'application

Le présent rapport-cadre constitue la base de l'élaboration de l'évaluation du risque (estimation de l'ampleur des dommages) et de l'étude de risque selon les art. 5 et 7 de l'ordonnance sur les installations de transport par conduites (OITC) pour les installations de gaz naturel à haute pression. Celles-ci comprennent, conformément à l'art. 2a de l'OITC, les installations de conduites dont le produit de la pression de service admise en Pascal (Pa) par le diamètre extérieur en mètres est supérieur à 200'000 Pa m (200 bar cm) et dans le même temps, la pression de service admise est supérieure à 500'000 Pa (5 bar).

Le rapport-cadre aborde l'évaluation du risque (estimation de l'ampleur des dommages) et l'étude de risque standardisées pour:

- les conduites de gaz naturel à haute pression enterrées
- les réservoirs tubulaires
- les installations annexes de transport de gaz telles que les postes
- les conduites de gaz naturel à haute pression dans des galeries accessibles

Ne sont pas prises en compte dans ce rapport-cadre les installations dont la pression de service maximale admise est inférieure ou égale à 5 bar. Ces installations sont décrites dans le rapport-cadre "Sicherheitsbeurteilung von Erdgasleitungen mit Betriebsdruck 1 bis 5 bar" (SSIGE, 1999). Les réservoirs sphériques de gaz naturel à haute pression, ainsi que les installations de transport ou de stockage de gaz liquéfié (LNG: liquefied natural gas, LPG: liquefied petroleum gas), ne sont pas non plus abordées dans ce rapport.

Le présent rapport-cadre remplace le précédent rapport-cadre intitulé "Sécurité des installations de gaz naturel à haute pression", édition révisée 1997, et est applicable aussi bien pour les installations existantes que pour les installations planifiées.

L'actualité des valeurs tirées de la bibliographie et utilisées dans le rapport-cadre est vérifiée si nécessaire par une commission d'experts constituée de représentants de l'industrie gazière et des autorités.

1.2 Bases

1.2.1 Bases légales

Le rapport-cadre s'appuie notamment sur les bases légales et directives suivantes:

- loi fédérale du 4 octobre 1963 sur les installations de transport par conduites de combustibles ou carburants liquides ou gazeux (LITC) (RS 746.1);
- ordonnance du 2 février 2000 sur les installations de transport par conduites (OITC) (RS 746.11), notamment art. 5 et 7;
- ordonnance du 4 avril 2007 concernant les prescriptions de sécurité pour les installations de transport par conduites (RS 746.12);
- directive IFP 2003, révision 2 (en vigueur à partir du 1^{er} mars 2009);
- ordonnance du 27 février 1991 sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM) (RS 814.012);
- critères d'appréciation pour l'ordonnance sur les accidents majeurs, Office fédéral de l'environnement (OFEV);
- manuel I de l'ordonnance sur les accidents majeurs, Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2008, aide à l'exécution pour les entreprises utilisant des substances, des préparations ou des déchets spéciaux;
- loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (Loi sur la protection de l'environnement, LPE) (RS 814.01), notamment l'art. 10;
- ordonnance du 19 octobre 1988 relative à l'étude de l'impact sur l'environnement (OEIE) (RS 814.011).

1.2.2 Bibliographie

- EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group) Statistique 1970 – 2007 (7th Report)
- "Yellow Book", Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials, VROM, 2nd ed. 2005
- IGEM/TD/2 Communication 1737: Application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of high pressure Natural Gas pipelines, IGEM (Institution of Gas Engineers & Managers)

1.3 Structure du rapport-cadre

Le présent rapport-cadre reprend les directives pour le calcul du risque induit par les principales installations de gaz naturel à haute pression en Suisse. Les méthodes de calcul sont expliquées à l'aide de divers exemples en annexe du rapport-cadre. La déduction théorique et l'explication des méthodes de calcul décrites dans le rapport-cadre sont représentées dans des explications séparées pour chaque thème.

Ces explications comprennent les thèmes suivants:

- scénarios de dommages
- létalités dans les scénarios d'incendie
- hypothèses d'occupation
- lignes de chemin de fer dans la zone d'influence de conduites de transport de gaz naturel à haute pression
- fréquence de rupture
- réservoirs tubulaires
- postes
- galeries et canaux

2 Scénarios de dommages pertinents

2.1 Arbre des causes

L'arbre des causes établit les causes possibles de rupture d'une installation de gaz naturel à haute pression. La rupture est définie comme une fuite avec sortie de gaz incontrôlée.

Les causes de dommages pour les conduites de gaz à haute pression enterrées, hors des zones clôturées, sont réparties, conformément à la statistique européenne sur les dommages, dans les catégories suivantes:

- intervention de tiers
- mouvements de terrain ("ground movement")
- défauts de matériau et de construction
- corrosion
- Hot tap made by error
- causes autres/inconnues

Par mouvements de terrain on entend toutes les causes tombant dans la catégorie "ground movement" selon la statistique de l'EGIG (7th report): l'eau ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), glissements de terrain ("Landslide"), minages ("Mining").

"Hot tap made by error" correspond au perçage par erreur d'une conduite de gaz naturel à haute pression en raison d'une confusion avec une conduite de gaz basse pression ou une conduite d'eau.

Lors de la réalisation d'installations de gaz naturel à haute pression (p. ex. postes), une rupture peut également se produire à la suite d'une erreur de manipulation (cf. III. 12).

Dans le cas d'installations de gaz naturel à haute pression s'étendant notamment sur une grande surface (p. ex. réservoirs tubulaires), un crash d'avion peut également, selon les cas, être responsable de la rupture d'une installation (cf. III. 1).

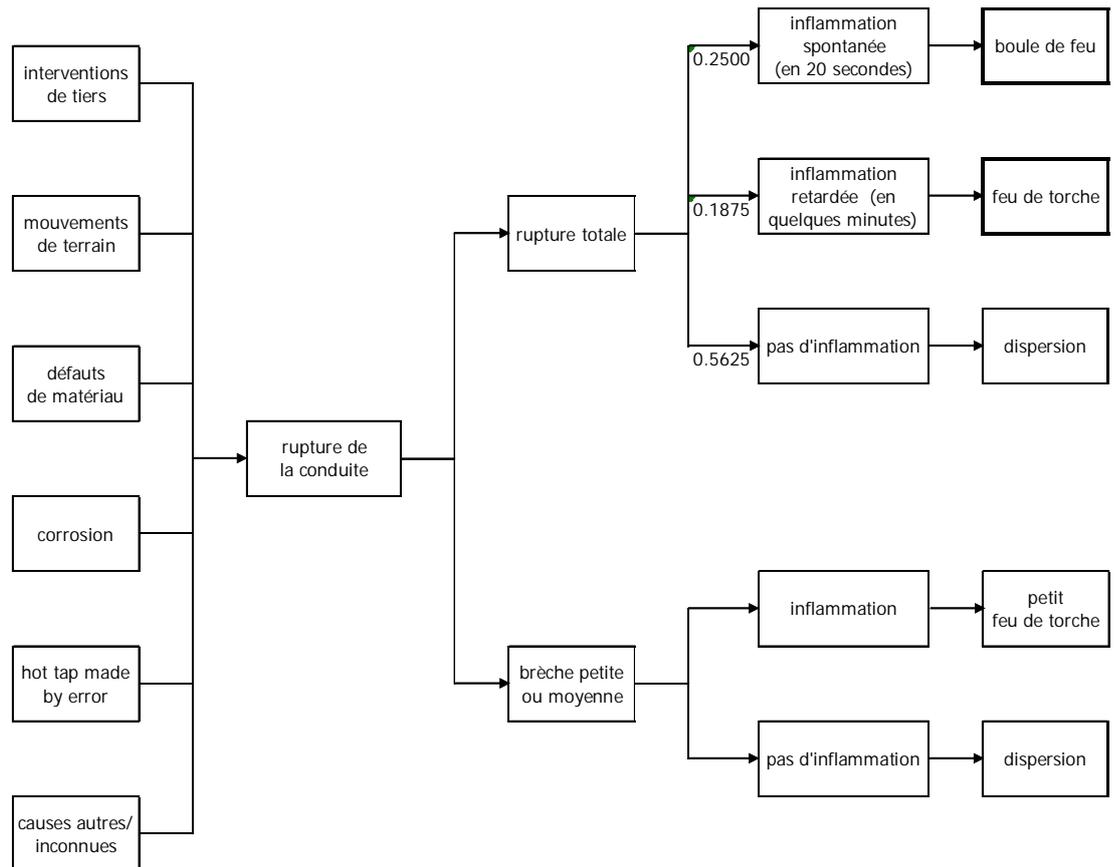
2.2 Arbre des événements

L'arbre des événements pour les conduites de gaz naturel à haute pression illustre les principaux scénarios à risque.

L'incident le plus grave pour les conduites enterrées en environnement confiné est la rupture totale (en anglais "rupture" ou "full bore rupture"). La rupture totale est définie comme une fuite d'une taille d'au moins un diamètre de conduite (cf. III. 12).

Après une rupture totale d'une conduite de gaz à haute pression, le gaz naturel s'échappe des deux extrémités de la conduite et entre en turbulence. Le gaz naturel qui s'échappe peut s'enflammer immédiatement ou après quelques instants, ou se répandre sans inflammation (cf. III. 1).

III. 1 Arbre des causes et des événements pour la rupture de conduites enterrées en environnement non confiné



2.3 Propriétés et effets du gaz naturel

2.3.1 Propriétés chimiques et physiques

En Suisse, le gaz naturel (H) distribué par le réseau est composé à env. 90% de méthane (CH_4) et, pour le reste, de divers hydrocarbures et de faibles parts d'azote et de dioxyde de carbone.

En raison de cette composition, les propriétés chimiques et physiques du gaz naturel sont très proches de celles du méthane.

Le méthane, qui appartient au groupe des hydrocarbures, est un gaz incolore, inodore et non toxique. En cas d'inhalation de très courte durée, il ne provoque qu'un léger sentiment d'étourdissement, mais en plus forte concentration, il peut être source d'asphyxie, par manque d'oxygène.

L'appréciation des risques varie considérablement selon que le gaz est stocké sous forme gazeuse ou liquide. Le présent rapport-cadre évalue uniquement les risques occasionnés par le stockage et le transport de gaz naturel à l'état gazeux.

La densité relative du gaz par rapport à l'air joue un rôle prépondérant pour la propagation et la dispersion des gaz et des vapeurs (cf. Tab. 1): en conditions normales, le méthane – et donc le gaz naturel – sont en effet nettement plus légers que l'air, si bien qu'une fois libérés, ils s'élèvent très rapidement dans l'atmosphère. Toutefois, la densité d'un gaz étant fonction de la pression et de la température, il arrive qu'en conditions extrêmes (pression élevée et/ou température basse), le gaz soit plus lourd que l'air. C'est le cas pour le méthane lorsque sa pression est égale à la pression atmosphérique et que sa température est inférieure à 150°K, soit -123°C

Contrairement au méthane, le butane et le propane sont plus lourds que l'air même dans des conditions normales (0°C et 1,013 bar). En cas de fuite incontrôlée d'une installation, ils peuvent se propager sur de grandes distances sous forme de nuages de gaz lourd.

Tab. 1 Densité, point d'ébullition et point d'inflammation de quelques gaz (en conditions normales)

	Densité rel. (air = 1)	Densité (kg/m ³)	Point d'ébullition dans l'air	Température d'inflammation (auto-inflammation)
Gaz nat. H (high)	0.56-0.64	0.7-0.8	env. -161 °C	env. 600 °C
Méthane CH ₄	0.55	0.72	- 161 °C	595 °C
Propane C ₃ H ₈	1.52	2.01	- 42 °C	460 °C
Butane C ₄ H ₁₀	2.01	2.70	- 1 °C	365 °C
Air	1.00	1.30	-191 °C	-

Tab. 2 Composition du gaz naturel en Suisse (Import 1996)

Eigenschaften der in der Schweiz verteilten Erdgase im Jahre 1996

Blatt 1 von 2

SWISSGAS Schweizerische Aktiengesellschaft für Erdgas, Geschäftsstelle Zürich

Regionalgesellschaften: - EGO Erdgas Ostschweiz AG, Zürich
- GVM Gasverbund Mittelland AG, Arlesheim

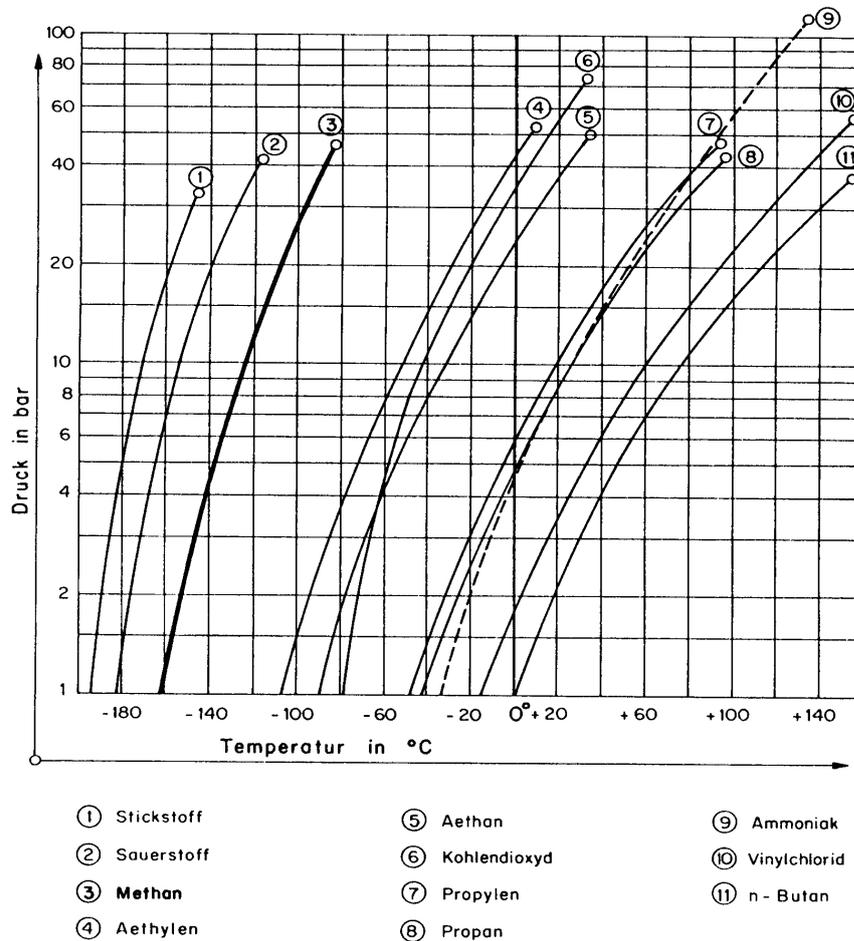
- EGZ Erdgas Zentralschweiz AG, Luzern
- GAZNAT Gaznat SA, Vevey

Zusammenstellung und Berechnung: Erdgas Ostschweiz AG, 8010 Zürich

Herkunft			Swissgas		Gasversorgung Süddeutschland			Gasversorgung Süddeutschland		
Versorgungsgebiet			(via Transitgasleitung)		(via Fallentor und Höchst)			Kleinhütungen		
			EGO, GAZNAT, GVM, EGZ		EGO			GVM		
			Mittelwerte	Grenzen	Mittelwerte	Grenzen	Mittelwerte	Grenzen	Mittelwerte	Grenzen
Kohlendioxid	CO ₂	Vol.-%	0.87	0.6 - 1.0	0.07	0.04 - 0.12	0.84	0.6 - 1.0	0.84	0.6 - 1.0
Sauerstoff	O ₂	"	0.00		0.00		0.00		0.00	
Helium	He	"	0.03	0.02 - 0.03	0.00		0.00		0.00	
Wasserstoff	H ₂	"	0.00		0.00		0.00		0.00	
Stickstoff	N ₂	"	2.31	1.5 - 3.1	0.84	0.80 - 0.86	2.26	1.5 - 3.1	2.26	1.5 - 3.1
Methan	CH ₄	"	92.87	91.5 - 94.9	98.30	98.1 - 98.4	93.03	91.6 - 94.9	93.03	91.6 - 94.9
Ethan	C ₂ H ₆	"	2.81	2.2 - 3.3	0.54	0.49 - 0.64	2.77	2.2 - 3.2	2.77	2.2 - 3.2
Propan	C ₃ H ₈	"	0.76	0.55 - 0.92	0.17	0.14 - 0.20	0.75	0.50 - 0.90	0.75	0.50 - 0.90
i-Butan	i-C ₄ H ₁₀	"	0.10	< 0.01 - 0.12						
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	"	0.15	0.02 - 0.18	¹⁾ 0.06	0.05 - 0.07	¹⁾ 0.24	0.17 - 0.28	¹⁾ 0.24	0.17 - 0.28
i-Pentan	i-C ₅ H ₁₂	"	0.03							
n-Pentan	n-C ₅ H ₁₂	"	0.03		¹⁾ 0.02		¹⁾ 0.07		¹⁾ 0.07	
Hexane	C ₆ H ₁₄	"	< 0.02		< 0.01		0.04		0.04	
Heptane	C ₇ H ₁₆	"	< 0.01							
Oktane	C ₈ H ₁₈	"	< 0.01							
Aromaten	C ₆ +C ₇ Cycl.	"	< 0.01							
Gesamtschwefel										
- in unodoriertem Gas	S	mg/m ³ _{VN}	1.7	0.4 - 2.8	< 3	---	< 3	---	< 3	---
- in odoriertem Gas	S	mg/m ³ _{VN}	8.8	7.8 - 10.1	6.2	3.5 - 9.7	7.4	6.0 - 9.6	7.4	6.0 - 9.6
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	mg/m ³ _{VN}	0.1	< 0.1 - 0.2	< 0.1	---	< 0.1	---	< 0.1	---
Brennwert	Ho,n	kWh/m ³	11.18	10.89 - 11.51	11.06	11.04 - 11.07	11.19	11.13 - 11.24	11.19	11.13 - 11.24
Heizwert	Hu,n	kWh/m ³	10.09	9.83 - 10.39	9.97	9.96 - 9.98	10.10	10.05 - 10.85	10.10	10.05 - 10.85
Wobbeindex	Wo,n	kWh/m ³	14.43	14.08 - 14.76	14.72	14.70 - 14.73	14.44	14.28 - 14.59	14.44	14.28 - 14.59
Rel.Dichte (Luft = 1)	d	---	0.601	0.56 - 0.64	0.565	0.56 - 0.57	0.600	0.59 - 0.61	0.600	0.59 - 0.61
Normdichte	ρ _n	kg/m ³	0.777		0.731		0.776		0.776	
Dyn. Zähigkeit η _{1,n}	(0 °C, 1 bar)	Pa·s	10.37 * 10 ⁻⁶		10.30 * 10 ⁻⁶		10.36 * 10 ⁻⁶		10.36 * 10 ⁻⁶	
Dyn. Zähigkeit η _{2,n}	(20 °C, 1 bar)	Pa·s	10.98 * 10 ⁻⁶		10.91 * 10 ⁻⁶		10.97 * 10 ⁻⁶		10.97 * 10 ⁻⁶	
Explosionsbereich	(20 °C, 1 bar)	Vol.-%	4,4 - 15		4,4 - 15		4,4 - 15		4,4 - 15	
Zündgeschwindigkeit	v max. in Luft	m/s	0.39		0.39		0.39		0.39	
Mittl. spez. Wärme c _{pm}	(0°C bis 300°C)	kWh/m ³ * K	0.54 * 10 ⁻³		0.53 * 10 ⁻³		0.54 * 10 ⁻³		0.54 * 10 ⁻³	
Sutherland Konstante C		---	128		129		128		128	
Stöchiometrische Verbrennung:										
Luftbedarf	Vol. / Vol. Gas		9.61		9.52		9.61		9.61	
Abgasmenge	Vol. / Vol. Gas		10.64		10.53		10.64		10.64	
Wassergehalt	trockene Abgase	g/m ³ _n	185		188		185		185	
Abgasanalyse "feucht"	H ₂ O	Vol.-%	18.7		18.9		18.7		18.7	
	CO ₂	"	9.7		9.5		9.7		9.7	
	N ₂	"	71.6		71.5		71.6		71.6	
Taupunkt		°C	59		59		59		59	
Abgasanalyse "trocken"	CO ₂	Vol.-%	11.9		11.8		11.9		11.9	
	N ₂	"	88.1		88.2		88.1		88.1	
- von unodoriertem Gas	SO ₂	mg/m ³ _{VN}	0.4		< 0.7		< 0.7		< 0.7	
- von odoriertem Gas	SO ₂	mg/m ³ _{VN}	2.0		1.5		1.7		1.7	

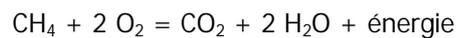
III. 2 Limites entre les phases gazeuse et liquide: comparaison entre le méthane et quelques autres substances

Températures d'ébullition de quelques gaz



2.3.2 Processus de combustion

La combustion est la réaction d'une substance avec l'oxygène – généralement sous forme de flammes – au cours de laquelle l'énergie chimiquement liée est libérée sous forme de chaleur. Pour le méthane, l'équation est la suivante:



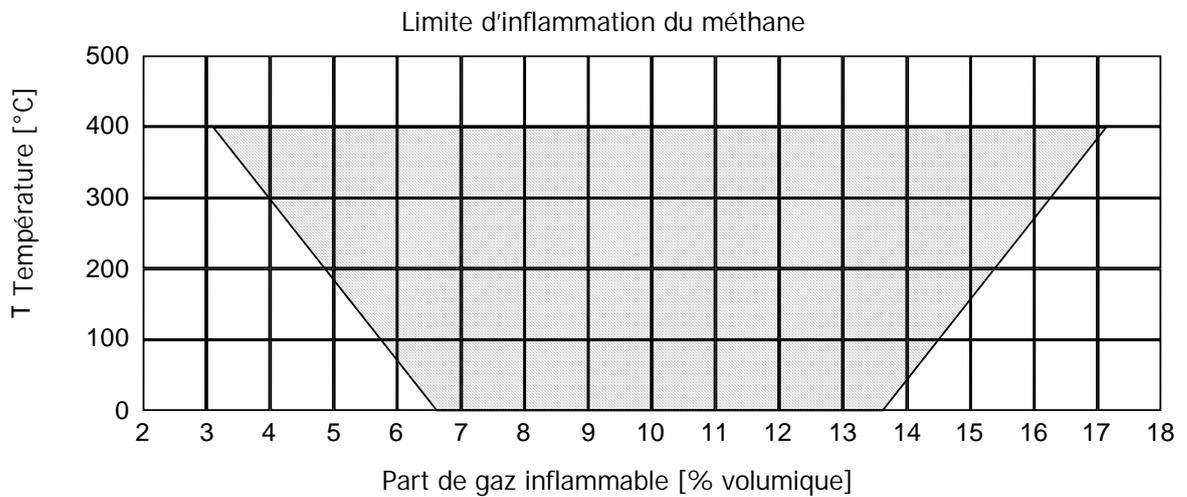
Transformé en dioxyde de carbone et en eau, le méthane libère une énergie d'environ $3.58 \times 10^7 \text{ Jm}^{-3}$, soit 10 kWh par m^3 (pour 20°C et 1 bar).

Pour qu'il y ait combustion, les conditions suivantes doivent être réunies:

- une inflammabilité du gaz libéré;

- de l'oxygène en quantité suffisante pour qu'il y ait réaction. En cas de combustion, le besoin en air est de 10 unités de volume d'air par unité de volume de gaz naturel;
- un mélange donné d'air ambiant et de gaz combustible. Les limites (dépendant de la température) dans lesquelles le méthane s'enflamme se situent entre 3 et 17% vol. (cf. III. 3). Plus le courant est turbulent, plus l'apport d'oxygène favorise la combustion;
- une inflammation du mélange. L'énergie requise pour que le mélange prenne feu est de 0.28 J. C'est-à-dire que la formation d'étincelles peut être suffisante pour provoquer un accident majeur.

III. 3 Limites d'inflammation du méthane en fonction de la température



2.4 Scénarios d'incendie

2.4.1 Boule de feu

Si le gaz naturel s'enflamme instantanément ou après quelques secondes, il peut générer dans la phase initiale une combustion en forme de boule, qui se transforme rapidement en un feu de torche stable. Cette boule de feu émet pendant un bref instant un rayonnement thermique dont l'intensité est supérieure à celle d'un feu de torche stationnaire.

- III. 4 Boule de feu après rupture d'une conduite de gaz naturel à haute pression en Russie, en 2009 (Source: inconnue)



2.4.2 Feu de torche

En cas d'accident majeur sur un gazoduc à haute pression entraînant une inflammation, le gaz naturel brûle en règle générale sous la forme d'un feu de torche. Le gaz s'échappe de façon continue par une fuite et brûle sous la forme d'une flamme longitudinale, à la manière d'une torche.

- III. 5 Feu de torche après la rupture d'un gazoduc à haute pression à Gräveneck D, 2007 (Source: Feuerwehr-Weblog, 2007)



2.5 Scénarios d'explosion

Dispersion

En cas de rupture totale d'une conduite de gaz naturel à haute pression sans inflammation du gaz naturel, celui-ci s'échappe de la fuite sous forme de jet. A la pression normale, son expansion provoque un refroidissement, rapidement compensé par son mélange avec l'air ambiant, qui entraîne un réchauffement du gaz jusqu'à la température ambiante. La densité du mélange gaz naturel/air est alors quasiment identique à celle de l'air ambiant, ce qui exclut la formation de gaz lourd.

C'est ainsi que dans le cas de conduites enterrées dans un environnement non confiné, on considère que le gaz qui s'échappe s'évapore sans générer d'inflammation ni de feu de nuage de gaz (en anglais "flash fire"). Dans un environnement confiné, la dispersion peut présenter un important risque d'explosion.

Explosion

Dans un environnement non confiné, les explosions significatives sont rares, car on considère que le gaz s'évapore rapidement et que l'absence de confinement ne permet pas la génération de pressions d'explosion importantes.

Dans des situations de confinement important (postes, galeries, canaux, etc.), le scénario d'explosion doit toutefois être envisagé (cf. chap. 9.5.2 et 9.5.3).

Déflagration

Tout comme une détonation, une déflagration est un processus rapide de combustion accompagné d'une génération de pression.

La déflagration se différencie de la détonation par les caractéristiques suivantes: la pression d'explosion n'est provoquée que par le gaz issu de la combustion qui se dilatent. Le mélange imbrûlé s'enflamme lors de la déflagration en se réchauffant au niveau du front de flammes. Le front de flammes ou des réactions se propagent plus lentement que la vitesse du son dans le milieu respectif.

Dans certains cas, les déflagrations peuvent se transformer en détonations. Les déflagrations pour lesquelles aucune pression importante n'a été générée sont également appelées "déflagrations étouffées".

Détonation

Une détonation est, de même qu'une déflagration, un processus de combustion rapide accompagné d'une génération de pression.

A l'inverse de la déflagration, la détonation produit une onde de choc qui traverse le mélange en feu à une vitesse supersonique. Les détonations atteignent des pressions d'explosion nettement supérieures à celles des déflagrations.

Les détonations peuvent se produire dans un environnement confiné.

2.6 Dommages subséquents

Rayonnement thermique

Lorsque du gaz s'échappe de manière involontaire en raison d'une fuite sur la conduite et que ce phénomène s'accompagne d'une inflammation immédiate ou retardée, le gaz brûle sous la forme d'un feu de torche ou, si la fuite est importante, sous la forme d'une boule de feu émettant un rayonnement thermique intense.

Les dommages subis par les personnes exposées à ce rayonnement thermique (létalités) sont détaillés dans le chapitre 6.2.

Onde de pression

Lorsque du gaz s'échappe de manière involontaire en raison d'une fuite sur la conduite, celui-ci peut former un mélange inflammable et, dans un environnement confiné et en présence d'une source d'inflammation, provoquer une explosion.

Les dommages directs et indirects subis par les personnes exposées à l'onde de pression (létalités induites par un pneumothorax ou par l'effondrement d'un bâtiment) sont décrits dans le chapitre 6.3.

Projection de débris

Lorsque le gazoduc à haute pression est endommagé, le gaz s'échappe sous haute pression et des débris peuvent être projetés, par exemple des fragments de conduite.

Le potentiel d'endommagement par une projection de débris après l'endommagement d'un gazoduc à haute pression est très faible, dans un environnement non confiné, par rapport aux scénarios d'incendie. Il peut donc en général être négligé.

Il est néanmoins possible que des débris projetés endommagent d'autres installations, par exemple des installations industrielles contenant des produits dangereux (ainsi que d'autres installations de gaz). Une projection de débris peut dans ce cas déclencher d'autres processus de libération de produits ainsi que les incidents qui en découlent.

Les explosions peuvent également induire une projection de débris.

3 Marche à suivre pour l'évaluation et l'appréciation du risque

3.1 Bases légales

La procédure d'évaluation et d'appréciation du risque pour les installations de gaz naturel à haute pression s'appuie sur les articles 5 à 7 de l'ordonnance sur les accidents majeurs et sur les critères d'appréciation de l'OFEV.

L'estimation de l'ampleur des dommages et l'étude de risque pour les installations de gaz naturel à haute pression conformément au présent rapport-cadre répondent aux exigences définies dans l'art. 5 § 1 let. f respectivement dans l'annexe 4 OPAM (art. 6 § 4).

3.2 Indicateurs de dommages

Pour apprécier les risques des installations de gaz naturel à haute pression, on considère en général, en termes d'atteinte à la population, uniquement l'indicateur de dommages n_1 (nombre de décès). Dans certains cas de dommages consécutifs (p. ex. dommages dus à la chaleur sur des installations sensibles à proximité immédiate d'installations de gaz naturel à haute pression), des indicateurs supplémentaires doivent être pris en considération. La limite de l'incident doit dans ce cas être déterminée de concert avec les autorités compétentes.

3.3 Estimation de l'ampleur des dommages (rapport succinct)

Pour estimer *l'ampleur des dommages*, on détermine le nombre de décès possibles au sein d'une zone à risque déterminée. Si, à aucun endroit, l'incident le plus grave ne peut occasionner plus de 10 décès, les accidents sont considérés comme ne portant pas gravement atteinte à la population. Dans ce cas, la procédure d'évaluation et d'appréciation est close.

Si le profil de l'ampleur des dommages donne des indices d'accident majeur supérieurs à 0.3 (ce qui correspond à 10 décès), on ne peut alors exclure une atteinte grave à la population et une étude de risque doit être réalisée pour le tronçon de conduite concerné.

Il est également possible d'utiliser un *procédé de screening* à la place de l'estimation de l'ampleur des dommages. Il s'agit d'un procédé permettant de vérifier les risques sur l'ensemble d'un réseau (de voies de transport ou de conduites), qui fournit des courbes cumulatives pour le diagramme PC, calculées de façon simple et conservative et normalisées pour un tronçon de 100 m, ainsi qu'une liste de segments considérés comme

sans danger sur la base de critères d'exclusion. Les méthodes utilisées pour le screening sont développées conjointement avec les autorités d'exécution et l'OFEV.

3.4 Analyse des risques (étude de risque et appréciation du risque)

Le risque présenté par les installations de gaz naturel à haute pression est déterminé par la probabilité d'occurrence et par l'ampleur des dommages possibles sur la population à la suite d'accidents. Le risque doit être quantifié dans le cadre de l'*étude de risque* et être représenté sous forme de courbe cumulative dans un diagramme PC.

L'*appréciation* de l'acceptabilité du risque s'effectue sur la position de la courbe cumulative dans le diagramme probabilité-conséquences. Les critères d'appréciation valides sont ceux figurant dans le document "critères d'appréciation pour l'ordonnance sur les accidents majeurs" de l'Office fédéral de l'environnement.

3.5 Dommages consécutifs

Les responsabilités pour les exploitations ayant subi un accident majeur à la suite de dommages consécutifs à la rupture d'un gazoduc à haute pression sont délimitées de la manière suivante:

Si l'exploitation sur laquelle la fuite a été déclenchée tombe dans le champ d'application de l'ordonnance sur les accidents majeurs, l'exploitant doit déposer en son propre nom un rapport succinct et, dans le cas où l'on ne peut exclure la possibilité d'un grave dommage à la population et de l'environnement, réaliser une étude de risque. Dans le rapport succinct ou dans l'étude de risque (tout comme lors de la mise en œuvre de mesures), la rupture du gazoduc à haute pression doit alors y être considérée comme une cause possible du déclenchement d'un accident majeur. L'exploitant de l'installation de gaz naturel doit mettre à disposition les bases nécessaires à ces estimations mais ne doit pas traiter des dommages consécutifs dans son rapport.

4 Démarche d'estimation de l'ampleur des dommages

L'estimation de l'ampleur des dommages comprend plusieurs étapes:

- Détermination des incidents
- Détermination des conséquences, de l'ampleur des dommages
- Détermination des endroits à risque pertinents

Les incidents pertinents sont déterminés sur la base de l'arbre des causes et de l'arbre des événements (cf. chap. 2). Pour les conduites enterrées en environnement non confiné, le scénario de dommages déterminant est celui de la rupture totale avec sortie de gaz et inflammation immédiate ou retardée, émettant un fort rayonnement thermique sous la forme d'une boule de feu ou d'un feu de torche (cf. III. 4 et III. 5).

Pour estimer l'ampleur des dommages, on évalue tous les 10 m le nombre maximum de décès possibles au sein de la zone à risque déterminante, le long de l'installation de gaz naturel à haute pression.

La zone à risque déterminante d'une conduite de gaz naturel à haute pression enterrée dans un environnement non confiné est déterminée par la rupture totale de cette conduite (fuite d'un diamètre supérieur à celui de la conduite) avec inflammation immédiate du gaz naturel sortant. Pour estimer l'ampleur des dommages, on ne prend en considération que le scénario d'incendie "boule de feu". On tient compte de toute la zone jusqu'au rayon de létalité R_0 de la boule de feu pour des personnes se trouvant à l'air libre. La dimension des rayons de létalité est déterminée conformément au chapitre 6.2.2.

Pour estimer l'ampleur des dommages dans le profil de l'ampleur des dommages, la létalité des personnes présentes est déterminée sur plusieurs niveaux, avec des rayons de létalité R_0 à R_{100} (chap. 6.2.2) auxquels correspondent des létalités, conformément au chap. 6.2.1. En outre, pour déterminer les dommages les plus graves pouvant être occasionnés, on prend également en compte l'effet protecteur des bâtiments, conformément au chapitre 6.2.1.2.

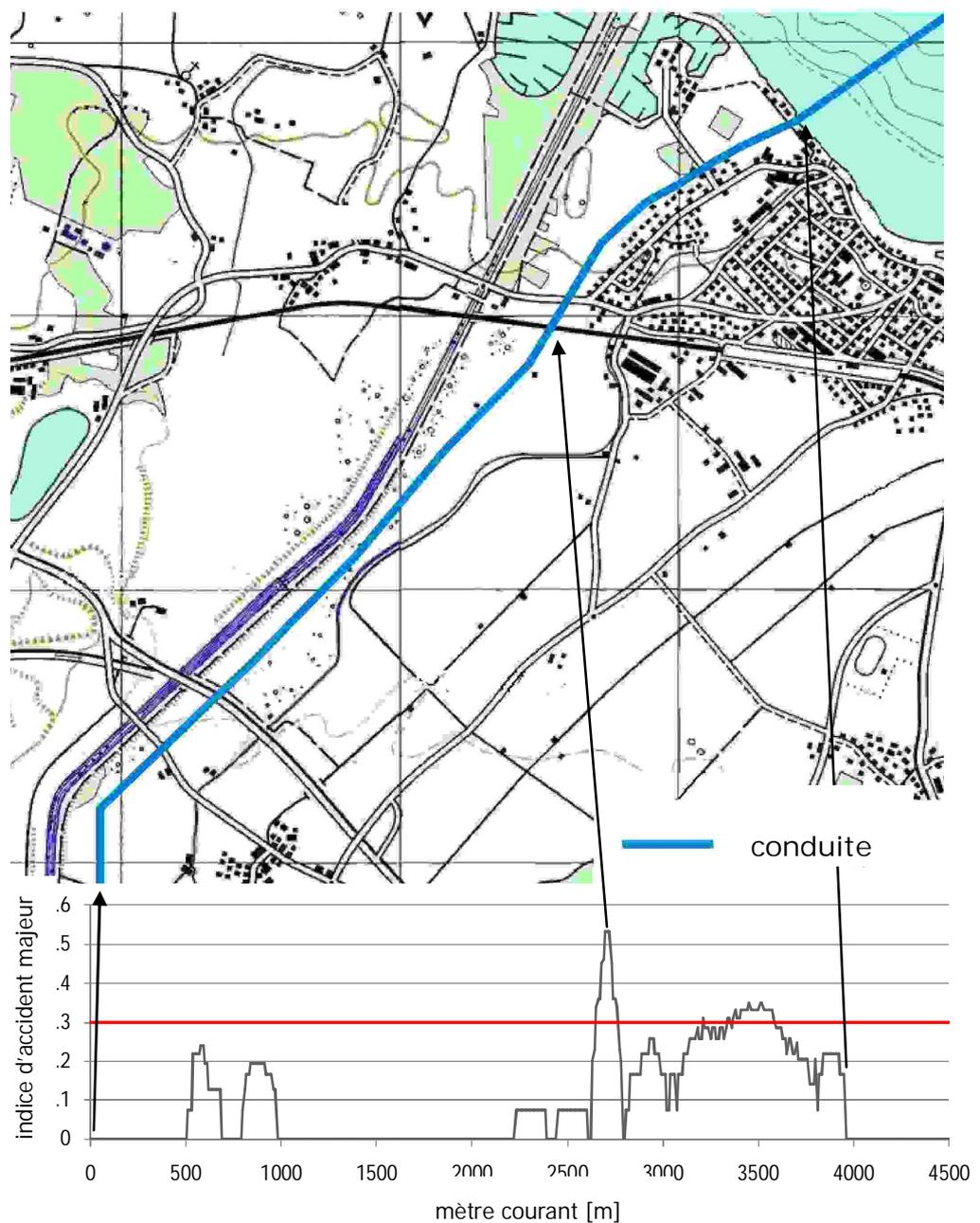
Pour les voies ferrées se trouvant dans la zone d'influence de gazoducs à haute pression, on considère la vitesse de circulation des trains dans la zone du rayonnement thermique, les létalités des passagers étant déterminées conformément au chapitre 8.2.

Pour estimer l'ampleur des dommages, on détermine les dommages les plus graves pouvant être occasionnés sur un nombre de personnes présentes à un moment donné. Dans le cas des utilisations pour lesquelles une simultanéité peut être envisagée, les personnes présentes doivent ainsi être prises en compte avec les létalités correspondantes. A l'inverse, les utilisations non simultanées ne doivent pas être incluses dans l'estimation de l'ampleur des dommages. En règle générale, on calcule ainsi

l'utilisation avec la plus grande ampleur, par exemple des commerces pendant les jours de semaine ou la population résidente pendant la nuit. Le cas échéant (degré d'occupation mixte par des personnes), il y a lieu de calculer différentes utilisations. Dans ce cas, on n'établit pas un profil de l'ampleur des dommages séparé pour chaque utilisation, mais un profil global comportant les valeurs des accidents majeurs les plus importants.

Les résultats de l'estimation de l'ampleur des dommages sont représentés dans un profil de l'ampleur des dommages:

III. 6 Exemple de profil de l'ampleur des dommages



Si, à aucun endroit, une rupture totale ("full bore rupture") ne peut occasionner plus de 10 décès, un accident majeur sur l'installation de gaz naturel à haute pression sera considéré comme ne portant pas gravement atteinte à la population. Dans ce cas, la procédure de contrôle et d'appréciation est close.

Si le profil de l'ampleur des dommages donne des indices d'accident majeur supérieurs à 0.3 (ce qui correspond à 10 décès), une étude de risque doit être réalisée pour le tronçon de conduite concerné.

L'identification des endroits à risque pertinentes s'effectue en général par une estimation de l'ampleur des dommages associée à un profil de l'ampleur des dommages.

Si, pour la densité de personnes maximale sur un tronçon de conduite, on détermine avec certitude que plus de 10 personnes sont en danger de mort, l'estimation de l'ampleur des dommages n'est plus nécessaire et l'on peut effectuer directement une étude de risque.

5 Démarche d'étude de risque

5.1 Définition du risque

Dans l'art. 2 § 5 de l'Ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM), le risque est défini comme suit:

"Le risque est déterminé par l'ampleur des dommages que subirait la population ou l'environnement à la suite d'accidents majeurs, et par la probabilité d'occurrence de ces derniers."

Le risque R résulte de la probabilité d'occurrence P d'un incident et de ses conséquences C présentée par l'ampleur des dommages.

On distingue le risque individuel et le risque collectif. Le risque collectif est déterminé pour une zone géographique donnée dans laquelle la répartition de la population dans l'espace et dans le temps est connue. Une modification de cette répartition a pour effet d'accroître le risque collectif. Ce dernier est égal à la somme des risques individuels dans la zone géographique donnée.

5.2 Marche à suivre pour l'étude de risque (diagramme PC)

Dans l'étude de risque telle qu'elle est définie dans l'ordonnance sur les accidents majeurs, seul le risque collectif est déterminé. Le présent rapport-cadre ne traitera ainsi pas de la détermination du risque individuel.

L'étude de risque comprend les étapes suivantes:

- Délimitation du système
- Détermination des probabilités d'occurrence
- Détermination des conséquences, de l'ampleur des dommages
- Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque

Le calcul de la courbe cumulative pour les conduites de gaz naturel à haute pression s'effectue sur une longueur de tronçon de 100 m.

L'étude de risque doit permettre l'estimation du risque sur les tronçons de conduite présentant des valeurs d'accidents majeurs > 0.3 , c'est-à-dire que chaque endroit de la conduite présentant une valeur d'accidents majeurs > 0.3 doit se voir attribuer un diagramme PC représentatif.

La *probabilité d'occurrence* pour un accident d'une ampleur donnée se compose de la probabilité de la cause des dommages, de l'incident et de la probabilité de séjour de

personnes dans la zone d'influence d'un scénario de danger de la conduite de gaz naturel à haute pression.

Les *conséquences* qui résultent du nombre de décès, déterminés sur la base des personnes présentes au moment des faits, et des létalités pour les scénarios d'accident majeur déterminants sont indiqués par l'ampleur des dommages, qui est converti en l'indice d'accident majeur correspondant.

Dans le cas des conduites de gaz naturel à haute pression, on considère une rupture totale de la conduite à intervalles réguliers de 10 m sur un tronçon de conduite de 100 m considéré.

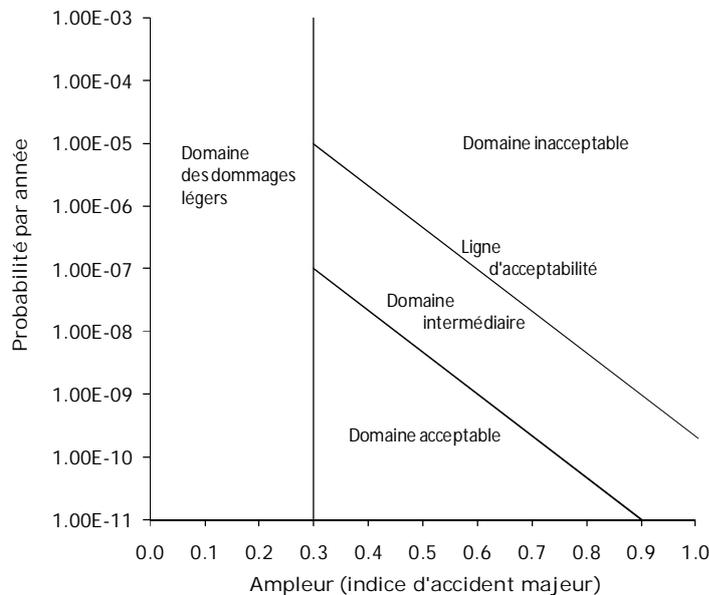
Les probabilités et indices d'accident majeur des incidents forment la base de la *courbe cumulative* (fonction de distribution complémentaire-cumulative), représentée dans le diagramme PC (probabilité – conséquences). Pour le calcul de la courbe cumulative, les incidents sont classés dans l'ordre décroissant selon l'importance de leur indice d'accident majeur et les probabilités des incidents individuels cumulés en partant de l'incident ayant l'indice d'accident majeur le plus élevé. La courbe cumulative indique ainsi approximativement les probabilités de dépasser des valeurs données d'ampleur de dommages à la suite d'accidents majeurs sur l'installation de gaz naturel à haute pression considérée.

5.3 Marche à suivre pour l'appréciation de l'acceptabilité du risque

L'ampleur est déterminée conformément au chapitre 6. La probabilité d'occurrence d'une certaine ampleur se compose des fréquences de rupture et des probabilités des scénarios (cf. chapitre 9) et des probabilités de séjour de personnes (cf. chapitre 7.4).

L'appréciation du risque s'effectue sur la courbe cumulative dans le diagramme probabilité-conséquences (ampleur du risque), voir III. 7). Les critères d'appréciation retenus sont ceux de la procédure "critères d'appréciation pour l'ordonnance sur les accidents majeurs" de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

III. 7 Diagramme PC



6 Ampleur des dommages

6.1 Détermination de l'indice d'accident majeur

Le nombre de personnes tuées lors d'un accident majeur est représenté par l'indice d'accident majeur pour l'indicateur de dommages n_1 . Celui-ci est proportionnel au logarithme du nombre de personnes tuées:

$$n_1 = 0.3 \times \log \sum_{i=1}^N (A_{b,i} \times L_i)$$

Avec $A_{b,i}$ = nombre de personnes concernées dans la zone de létalité i
 L_i = létalité dans la zone de létalité i

Pour l'appréciation du risque représenté par des installations de gaz naturel à haute pression, le nombre de décès possibles (indicateur de dommages n_1) est déterminant.

6.2 Scénarios d'incendie

Pour les conduites enterrées en environnement non confiné, le scénario de dommages déterminant est celui d'une sortie de gaz due à une rupture totale de la conduite (diamètre de la fuite supérieur ou égal au diamètre de la conduite) avec inflammation immédiate ou retardée, émettant un fort rayonnement thermique sous la forme d'une boule de feu ou d'un feu de torche.

6.2.1 Détermination des létalités

Pour calculer les rayons de létalité pour des personnes, on utilise les doses de rayonnement thermique suivantes:

Tab. 3 Doses de rayonnement thermique des différentes létalités

Létalité	Dose de rayonnement thermique V à l'air libre
100%	à partir d'env. $3'415 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
75%	dès env. $2'745 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
50%	dès env. $2'075 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
25%	dès env. $1'405 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
0%	jusqu'à env. $735 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$

La détermination du nombre de personnes concernées s'effectue sur cinq rayons de létalité R_0 , R_{25} , R_{50} , R_{75} et R_{100} . Les indices indiquent la létalité en % sur chaque rayon.

6.2.1.1. Létalités pour des personnes se trouvant à l'air libre

A l'intérieur de ces rayons, les facteurs de létalité moyens suivants s'appliquent pour des personnes se trouvant à l'air libre:

Tab. 4 Facteurs de létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre

Zone de létalité	Létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre
dans la zone R_{100}	100%
entre R_{75} et R_{100}	85%
entre R_{50} et R_{75}	60%
entre R_{25} et R_{50}	35%
entre R_0 et R_{25}	10%

6.2.1.2. Létalités pour des personnes se trouvant dans des bâtiments

Pour des personnes séjournant dans des bâtiments, on considère un effet protecteur standard du bâtiment. On utilise dans ce cas les rayons de létalité d'un feu de torche pour des personnes se trouvant à l'air libre (R_{FA}), mais avec les létalités suivantes:

Tab. 5 Létalités standard pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario d'une boule de feu suivie d'un feu de torche

Rayons de létalité	Létalité ^a dans le $R_{ZI\ FE}$	Létalité ^a hors du $R_{ZI\ FE}$
dans la zone $R_{100\ FA}$	100%	75%
entre $R_{75\ FA}$ et $R_{100\ FA}$	95%	65%
entre $R_{50\ FA}$ et $R_{75\ FA}$	80%	45%
entre $R_{25\ FA}$ et $R_{50\ FA}$	70%	25%
entre $R_{0\ FA}$ et $R_{25\ FA}$	-- ^b	10%

En plus des rayons correspondant à un feu de torche pour des personnes se trouvant à l'air libre, on utilise le rayon $R_{ZI\ FE}$. Ce rayon marque la distance maximale, à partir du foyer de l'incendie, au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment s'enflamme pendant la durée de combustion de la boule de feu, les fenêtres étant intactes.

Dans le cas du feu de torche, on utilise également un rayon supplémentaire, le rayon $R_{ZI\ FA}$. Ce rayon marque la distance maximale au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment prend feu en maximum 15 s ^c, en présence d'un feu de torche et avec des fenêtres intactes.

^a Les létalités indiquées s'appliquent à des personnes normalement mobiles dans des bâtiments présentant un effet protecteur moyen sans obstruction des chemins de fuite

^b Dans les paramètres relatifs aux conduites en Suisse, le rayon $R_{ZI\ FE}$ n'est jamais supérieur au rayon $R_{25\ FA}$

^c La valeur de seuil de 15 s jusqu'à l'inflammation malgré des fenêtres intactes est utilisée comme valeur moyenne pour le feu de torche, afin d'avoir des valeurs comparables à la durée de combustion de la boule de feu (env. 4 à 25 s).

Tab. 6 Létalités standard pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario du feu de torche

Rayons de létalité	Létalité pour des personnes se trouvant dans des bâtiments ^a
dans la zone $R_{Z1\text{ FA}}$	100%
entre $R_{100\text{ FA}}$ et $R_{Z1\text{ FA}}$	75%
entre $R_{75\text{ FA}}$ et $R_{100\text{ FA}}$	35%
entre $R_{50\text{ FA}}$ et $R_{75\text{ FA}}$	10%
entre $R_{25\text{ FA}}$ et $R_{50\text{ FA}}$	5%
entre $R_{0\text{ FA}}$ et $R_{25\text{ FA}}$	0%

Selon les cas, des mesures constructives supplémentaires peuvent être quantifiées.

6.2.2 Détermination des rayons de létalité

Pour l'étude de risque, les rayons de létalité sont déterminés sur la base de la pression autorisée. En présence de fortes variations d'exploitation saisonnières, l'estimation du risque peut toutefois également se rapporter à la pression de service effective. Les pressions de service effectives (généralement les valeurs moyennes journalières) sont alors rapportées à la durée (part de jours par année). Ces estimations du risque s'appliquent alors au régime d'exploitation particulier à évaluer et doivent être adaptées en cas de modification importante du régime d'exploitation.

6.2.2.1. Boule de feu

Dans le scénario de la boule de feu, le temps d'exposition est assimilé à la durée de combustion de celle-ci. Cette durée se calcule en fonction de la quantité de gaz libérée M_g [kg]:

$$t_{FE} = 0.38 \times M_g^{0.333}$$

Avec t_{FE} = temps d'exposition = durée de combustion de la boule de feu [s]

M_g = quantité de gaz libérée [kg]

^a Les létalités indiquées s'appliquent à des personnes normalement mobiles dans des bâtiments présentant un effet protecteur moyen sans obstruction des chemins de fuite

En considérant les intensités de rayonnement et la durée de combustion, on obtient, pour un incident de boule de feu survenant sur une conduite de gaz naturel à haute pression, les rayons de létalité suivants.

Tab. 7 Rayons de létalité d'une boule de feu pour des personnes se trouvant à l'air libre et rayon $R_{ZI\ FE}$ pour l'inflammation de l'intérieur des bâtiments pendant la combustion de la boule de feu

Largeur nominale [pouces] ou diamètre ext. de la conduite	Pres-sion	Durée de com-bustion	$R_{100\ FE}$ [m]	$R_{75\ FE}$ [m]	$R_{50\ FE}$ [m]	$R_{25\ FE}$ [m]	$R_{0\ FE}$ [m]	$R_{ZI\ FE}$ [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	3 s	5	5	10	15	20	5
	50 bar	3 s	5	10	15	20	30	5
	64 bar	3 s	10	10	15	25	35	10
	70 bar	4 s	10	15	20	25	35	10
6" (168.3 mm)	25 bar	3 s	10	15	15	25	35	10
	64 bar	5 s	20	25	30	40	55	15
	70 bar	5 s	20	25	30	40	60	20
8" (219.1 mm)	25 bar	4 s	15	20	25	35	50	15
	50 bar	5 s	25	30	40	50	70	25
	64 bar	6 s	30	35	45	55	70	25
	70 bar	6 s	30	40	45	60	80	25
10" (273.0 mm)	25 bar	5 s	25	30	35	45	65	20
	50 bar	7 s	35	45	50	65	90	30
	64 bar	7 s	40	50	60	75	100	35
	70 bar	7 s	45	50	60	75	105	35
12" (323.9 mm)	25 bar	6 s	30	40	45	60	80	25
	50 bar	8 s	45	55	65	80	110	40
	54 bar	8 s	50	60	70	85	115	40
	70 bar	9 s	55	65	80	95	130	45
14" (355.6 mm)	50 bar	9 s	60	70	80	100	130	45
	70 bar	10 s	70	80	95	115	155	55
16" (406.4 mm)	70 bar	11 s	85	95	110	135	180	65
	80 bar	11 s	90	100	120	145	190	65
20" (508.0 mm)	70 bar	13 s	110	125	145	175	230	80
22" (559.0 mm)	25 bar	10 s	75	85	95	120	160	55
	45 bar	12 s	100	110	130	155	205	75
24" (609.6 mm)	70 bar	15 s	140	155	180	210	280	95
28" (711.0 mm)	70 bar	17 s	165	185	210	250	330	115
34" (863.6 mm)	70 bar	20 s	205	230	260	310	405	135
36" (914.0 mm)	67.5 bar	20 s	215	240	275	325	425	140
	70 bar	21 s	220	245	280	330	430	145
	85 bar	22 s	245	270	305	360	470	155
48" (1219 mm)	67.5 bar	25 s	300	330	375	445	575	185
	70 bar	26 s	305	335	380	450	585	185
	75 bar	26 s	315	350	395	465	600	190

Pour les rayons de létalité pour des personnes se trouvant dans des bâtiments, on utilise en supplément le rayon $R_{ZI\ FE}$. Ce rayon marque la distance maximale, à partir du foyer de l'incendie, au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment prend feu pendant la durée de combustion de la boule de feu, les fenêtres étant fermées et intactes.

6.2.2.2. Feu de torche

Dans le cas d'un feu de torche, on considère un temps d'exposition des personnes de 30 secondes.

En considérant les intensités de rayonnement et une durée d'exposition de 30 secondes, on obtient, dans le cas d'un feu de torche survenant sur la plupart des conduites de gaz naturel à haute pression, les rayons de létalité suivants selon le Tab. 8.

Pour les rayons de létalité de personnes se trouvant dans des bâtiments, on utilise en supplément le rayon $R_{ZI\ FA}$. Ce rayon marque la distance maximale au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment prend feu en maximum 15 s, dans le cas d'un feu de torche et avec des fenêtres fermées et intactes.

Tab. 8 Rayons de létalité d'un feu de torche et rayon $R_{ZI\ FA}$ pour l'inflammation de l'intérieur d'un bâtiment dans le scénario d'un feu de torche

Largeur nominale [pouces] ou diamètre ext. de la conduite	Pres-sion	$R_{100\ FA}$ [m]	$R_{75\ FA}$ [m]	$R_{50\ FA}$ [m]	$R_{25\ FA}$ [m]	$R_{0\ FA}$ [m]	$R_{ZI\ FA}$ [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	10	10	10	15	20	5
	50 bar	10	15	15	20	30	5
	64 bar	10	15	15	20	35	5
	70 bar	15	15	20	25	35	5
6" (168.3 mm)	25 bar	10	15	15	20	30	5
	64 bar	20	20	25	35	50	10
	70 bar	20	20	25	35	50	10
8" (219.1 mm)	25 bar	15	20	20	30	40	5
	50 bar	20	25	30	40	55	10
	64 bar	25	30	35	45	65	10
	70 bar	25	30	35	45	65	10
10" (273.0 mm)	25 bar	20	20	25	35	50	10
	50 bar	25	30	35	45	70	10
	64 bar	30	35	40	55	80	15
	70 bar	30	35	45	55	85	15
12" (323.9 mm)	25 bar	22	26	31	40	60	10
	50 bar	30	35	45	55	85	14
	54 bar	30	35	45	60	85	15
	70 bar	35	40	50	65	100	15
14" (355.6 mm)	50 bar	35	40	50	65	95	15
	70 bar	40	50	60	75	115	20
16" (406.4 mm)	70 bar	50	55	65	85	130	20
	80 bar	50	60	70	90	135	25
20" (508.0 mm)	70 bar	60	70	80	105	160	25
22" (559.0 mm)	25 bar	40	45	55	70	105	20
	45 bar	50	60	75	95	140	25
24" (609.6 mm)	70 bar	70	80	95	125	190	30
28" (711.0 mm)	70 bar	80	95	110	145	220	40
34" (863.6 mm)	70 bar	95	110	135	175	260	45
36" (914.0 mm)	67.5 bar	100	115	140	180	270	45
	70 bar	100	120	140	185	275	50
	85 bar	110	130	155	200	300	55
48" (1219 mm)	67.5 bar	130	150	185	235	355	60
	70 bar	135	155	185	240	360	65
	75 bar	140	160	190	250	375	65

6.3 Scénarios d'explosion

Dans les postes ainsi que les conduites de gaz dans un environnement confiné (galeries, canaux etc.), une fuite de gaz peut produire un mélange inflammable et entraîner une explosion en présence d'une source d'inflammation. Dans le cas de conduites enterrées dans un environnement non confiné, les scénarios d'explosion ne sont pas pertinents.

On considère qu'une surpression occasionne les létalités suivantes sur des personnes:

Tab. 9 Létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre en cas de surpression (pneumothorax)

Surpression	Létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre
1 bar	1%
2 bar	99%

Tab. 10 Létalité pour des personnes se trouvant dans des bâtiments pour une surpression de 0.4 bar (effondrement de bâtiments)

Surpression	Létalité pour des personnes se trouvant dans des bâtiments
0.4 bar (effondrement de bâtiments)	20 - 50%

En cas d'effondrement de bâtiment, on estime la létalité des personnes se trouvant à l'intérieur du bâtiment à environ 20 à 50%, dépendamment de la taille de l'édifice.

7 Hypothèses d'occupation

7.1 Méthode

L'estimation de l'ampleur des dommages et l'étude de risque nécessitent la formulation des hypothèses d'occupation selon les critères mentionnés ci-dessous. Les incertitudes résiduelles dans le relevé de l'occupation doivent être discutées dans le cadre de l'étude de risque.

L'estimation de l'ampleur des dommages ainsi que l'étude de risque impliquent la prise en compte de la situation après un développement complet de l'implantation de la population, conformément au plan d'affectation des zones en vigueur. Les plans d'aménagement en cours doivent être joints aux documents de l'étude de risque.

Pour calculer l'ampleur des dommages, il convient de prendre en compte le nombre maximum de personnes présentes simultanément.

7.2 Habitations

Dans les *zones à bâtir déjà construites*, il existe différentes bases de détermination de l'occupation humaine:

- Pour les bâtiments résidentiels, on considère par unité d'habitation d'un immeuble à logements multiples une occupation moyenne de 2 personnes, contre une occupation moyenne de 3 personnes pour les habitations individuelles.
- Lorsque la surface brute ou nette de plancher est connue, la population peut être estimée par le biais du besoin moyen en surface habitable.
- La population résidente peut également être déterminée à partir des données du contrôle des habitants des différentes communes ou des données des recensements de la population.

Dans les *zones à bâtir encore non construites*, l'occupation est déterminée à partir des calculs de capacité des différentes zones. Le nombre maximal de personnes d'un terrain est calculé en fonction de la somme des surfaces nettes de plancher (calculée à partir de la surface de terrain déterminante et de l'indice brut d'utilisation du sol):

Surface nette de plancher = surface brute de plancher -15%

Surface brute de plancher = Indice d'utilisation du sol x Surface de terrain déterminante

Pour ce qui est du besoin moyen en surface habitable, on considère pour différents types de constructions les valeurs suivantes:

Tab. 11 Besoin moyen en surface habitable par personne en fonction de la zone d'habitation

Type de zone	Surface nette de plancher par personne [m ²]	
R2 à R4 urbaine	45	Indice pour l'espace urbain ^d
R2 rurale	60	Indice pour l'espace rural
R3 rurale	50	
R4 rurale	45	

7.3 Entreprises commerciales et artisanales, industries, services

Pour déterminer l'occupation de bâtiments artisanaux, commerciaux ou industriels, il est parfois nécessaire de collecter des informations (indications fournies par les recensements des entreprises, demandes de renseignements auprès des communes et unions des arts et métiers, recherche sur Internet, visite sur le terrain etc.).

On peut ainsi considérer trois principaux groupes en termes d'occupation humaine:

- Exploitations artisanales, commerciales ou industrielles employant peu de personnes (env. 200 m² de surface brute de plancher par personne)
- Exploitations artisanales, commerciales et industrielles moyennes (surface moyenne brute de plancher de 100 m² par personne)
- Entreprises de services employant un grand nombre de personnes (pour les immeubles de bureaux, env. 10 à 50 m² de surface nette par étage par personne)

^d Définition de l'Office fédéral de la statistique (OFS):

L'espace urbain correspond à la somme des villes et agglomérations. Les agglomérations désignent des zones connexes de plusieurs communes de plus de 20 000 habitants et dotées d'un centre.

L'espace rural comprend, pour la présente estimation d'occupation, toutes les zones restantes.

Dans les zones industrielles, artisanales ou commerciales non encore construites, l'occupation est déterminée le cas échéant d'après l'utilisation planifiée ou habituelle du lieu (p. ex. entreprises de production, entrepôts, entreprises de services, etc.).

7.4 Probabilités de séjour (facteurs de présence)

Tab. 12 Facteurs de présence

	Jour en semaine (7 – 19h)	Nuit en semaine (19 – 7h)	Jour de week-end (7 – 19h)	Nuit de week-end (19 – 7h)
Population résidente	30% de la population résidente présente (dont 10% à l'extérieur)	90% de la population résidente présente (dont 1% à l'extérieur)	60% de la population résidente présente (dont 10% à l'extérieur)	100% de la population résidente présente (dont 1% à l'extérieur)
Population active	80% de la population active présente (dont 10% à l'extérieur)	5% de la population active présente (dont 5% à l'extérieur)	5% de la population active présente (dont 10% à l'extérieur)	0% de la population active présente

Les entreprises ayant des facteurs de présence très variables, p. ex. les sociétés fonctionnant en travail par équipes, peuvent nécessiter une adaptation (p. ex.: travail par équipes 24 heures par jour et 7 jours sur 7 par semaine: 20% des employés présents jour et nuit).

7.5 Lieux et bâtiments accessibles au public

Les lieux publics comprennent toutes les installations librement accessibles au public, gratuitement ou non (terrains de sport, aires de loisirs, campings, gares, haltes, embarcadères, etc.).

Les taux d'occupation de ces installations sont collectés auprès des communes ou des exploitants et administrateurs concernés. Si aucune donnée relative à l'occupation n'est disponible, une visite sur le terrain permettra de réaliser une estimation.

Si l'installation dispose d'un parc de stationnement relativement important, une partie de l'occupation à l'air libre sur le parc de stationnement doit être prise en compte.

Dans le cas des gares, haltes, etc., on considère l'occupation du véhicule (train, tram, etc.) plus les passagers en attente sur le quai, trottoir, etc. pour déterminer l'ampleur des dommages.

Pour les véhicules ferroviaires (train, tramway), on calcule une durée de séjour moyenne en gares de 0.5 à 5 minutes, selon la taille de la gare ou de la halte et selon les véhicules (train, tramway) correspondant au nombre de déplacements de passagers.

7.6 Manifestations

Par exemple, manifestations sportives, culturelles tels que projections en plein air, etc.

Le nombre de personnes présentes et la durée de séjour doivent être collectés auprès des organisateurs ou des autorités compétentes.

7.7 Objets particuliers bâtiments

Les données relatives à l'occupation des objets particuliers tels que les centres commerciaux ou les hôpitaux, établissements de soins etc. figurent au chap. 8.3.

8 Objets particuliers dans la zone d'influence d'installations de gaz naturel à haute pression

8.1 Routes

Le trafic est déterminé à partir des comptages existants. On considère alors en règle générale le trafic moyen de jour (trafic horaire entre 6 et 22h) à 5.8% du trafic journalier moyen (TJM = nombre moyen de véhicules par jour (24 h) et section de route), le trafic moyen de nuit (trafic horaire entre 22 et 6h) à 0.9% du TJM. En moyennant le trafic de 7h à 19h, le trafic horaire de jour est égal à 6.7% du trafic journalier moyen (TJM), et le trafic horaire de nuit (19h à 7h) correspond à 1.6% du TJM.

Dans le cas du trafic routier, l'ampleur des dommages est estimée via la distance moyenne entre les véhicules:

$$D_F = \frac{v}{N}$$

Avec D_F = distance moyenne entre deux véhicules par sens de circulation [km]

v = vitesse [km/h]

N = fréquence du trafic par heure et par sens de circulation [véhicules/h]

Le cas échéant, d'autres scénarios de trafic (heures de pointe, embouteillages, week-end, vacances scolaires, etc.) doivent également être pris en compte. Dans un embouteillage, (colonne à l'arrêt), on considère un véhicule tous les 6.5 m; on peut également déterminer une circulation en accordéon.

On considère en général une occupation de 1.5 personne par véhicule. Dans un trafic quotidien typique aux heures de pointe, le nombre de passagers peut être réduit à 1.3 personne par véhicule, tandis que dans le cas d'un trafic de vacances, il convient de considérer au minimum 2 personnes par véhicule. Sur les itinéraires, aux principales heures de circulation, on suppose que jusqu'à 0.5% de tous les véhicules sont des autocars (50 passagers par véhicule). Les autocars circulant sont recensés indirectement par le biais d'une augmentation du nombre moyen de passages par véhicule. Les lignes de bus ne sont prises en compte dans le calcul qu'au niveau des arrêts de bus (cf. chap. 7.5).

Les routes présentant un TJM < 10'000 (c'est-à-dire les routes collectrices et routes de desserte) ne doivent pas être prises en compte dans l'étude de risque sauf en cas d'embouteillages. Les catégories "routes nationales" et "routes principales" doivent être incluses dans l'analyse du risque.

Dans le calcul du risque, aucun facteur pour l'effet protecteur des véhicules routiers n'est utilisé: la létalité est calculée de la même manière que pour les personnes se trouvant à l'air libre. Dans le cas des véhicules routiers, il est à craindre qu'en cas d'accident majeur sur la conduite de gaz, on assistera à des accidents de la route ou que les personnes dans des véhicules endommagés seront gênées dans leur fuite.

8.2 Lignes de chemin de fer

Dans la zone d'influence de conduites de gaz naturel à haute pression, l'occupation humaine résultant du trafic ferroviaire doit être prise en compte dans le calcul du risque.

8.2.1 Hypothèses d'occupation pour le trafic ferroviaire

Les fréquences des trains sont indiquées sur l'horaire de la période en cours.

Les taux d'occupation correspondant aux différentes compositions de train circulant sur le tronçon concerné doivent être demandés aux organes compétents ou être déterminés par des relevés effectués sur place. Les différentes compositions de train sont répertoriées dans les gares ou peuvent être consultées sur le site Internet www.reisezuege.ch pour les trains IC, IR, EC, CIS, TGV, RE etc.

Si des indications sont manquantes pour déterminer les taux d'occupation, on se reportera au Tab. 13 qui illustre les taux d'occupation de trains. Ces taux d'occupation élevés se produisent en général pendant le trafic pendulaire ou pendant les vacances, tandis que pour les autres liaisons, on peut s'attendre à une occupation beaucoup plus réduite (10 à 50% de l'occupation forte).

Tab. 13 Aperçu de différents types de trains

Type de train	Nombre de wagons	Nombre de personnes
Trains de banlieue	3 – 10 ^e	100 – 1'000 personnes ^e
REG / RX	4 – 6	100 – 200 personnes
IC / EC / CIS	6 – 12	500 personnes
ICN / EN	6 – 12	500 personnes

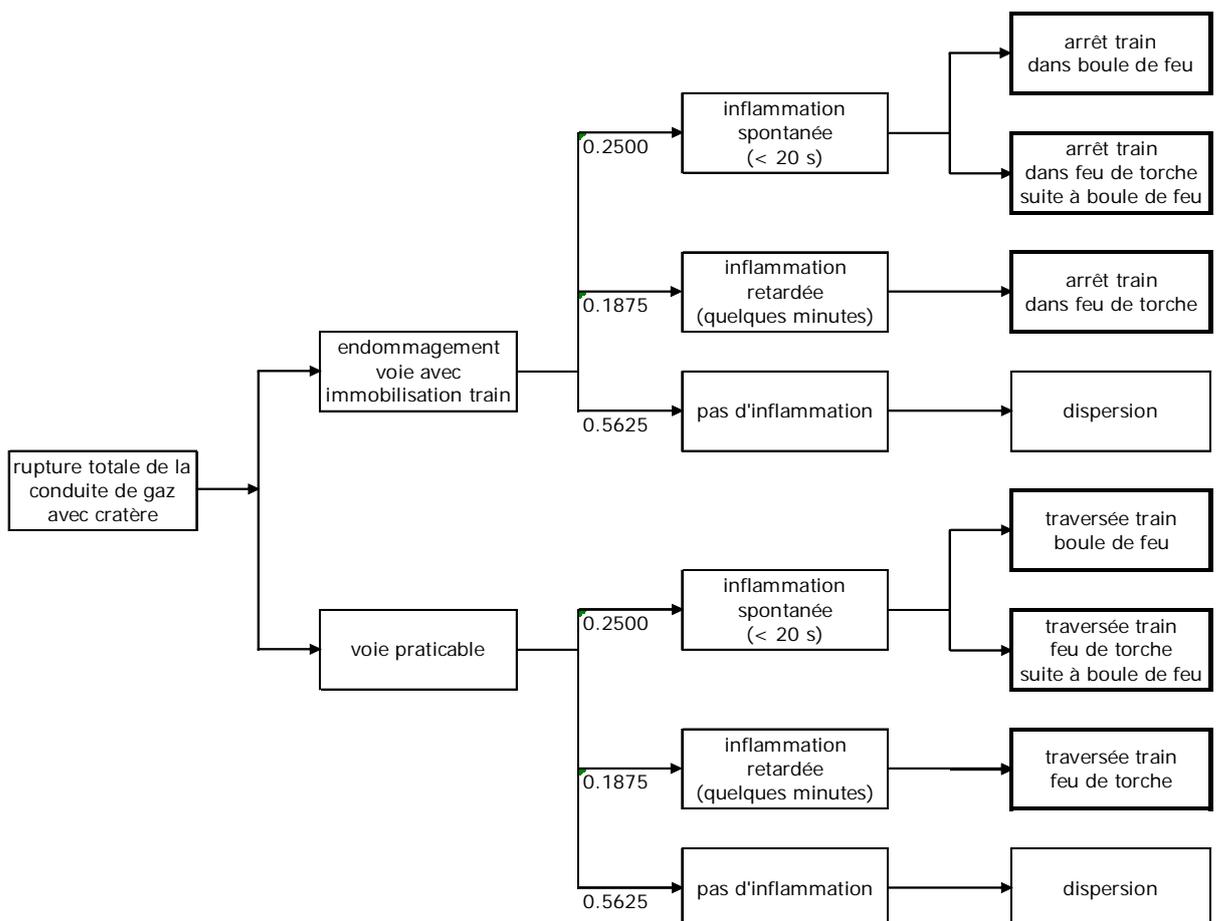
^e L'importante marge d'occupation pour les trains régionaux est due aux différents types de trains et de wagons (cf. les exemples dans les explications)

Etant donné que les taux d'occupation des trains varient fortement d'une région à l'autre, ces taux ainsi que les liaisons ferroviaires à forte occupation doivent toujours être adaptés à la situation par des relevés sur place et des informations communiquées par les organes compétents.

L'effet protecteur des véhicules ferroviaires est pris en compte indirectement dans le calcul des létalités et ne doit pas être intégré séparément dans le calcul de l'ampleur des dommages.

8.2.2 Scénarios de dommages

III. 8 Arbre des causes et des événements de dommages pour le train dans la zone d'influence de conduites de gaz naturel à haute pression



8.2.3 Mode de calcul

(cf. également l'exemple de calcul, annexe C)

Les véhicules ferroviaires dans la zone de gares et de haltes sont considérés dans l'étude de risque comme des objets stationnaires.

Les véhicules ferroviaires en circulation, quant à eux, se déplacent rapidement à travers le champ de rayonnement thermique de l'incendie. Cela doit être pris en compte dans le calcul de la dose de rayonnement thermique reçue par chaque passager ainsi que dans la détermination de la durée de séjour. Pour calculer les doses de rayonnement thermique reçues par chaque passager, on considère une vitesse de circulation standard du train de 80 km/h. La répartition des passagers dans le train a été calculée avec deux longueurs de trains normalisées représentatives de 100 et 300 m.

Les létalités et probabilités de séjour qui en résultent sont représentées dans les tableaux Tab. 14 à Tab. 16, et Chap. 8.2.5 compilés, ils sont nécessaires au calcul des courbes cumulatives. Pour le calcul du profil de l'ampleur de dommages, seules les létalités sont nécessaires.

8.2.4 Boule de feu suivi d'un feu de torche

A la vitesse normalisée, la distance entre la ligne de chemin de fer et le lieu de la rupture totale sur la conduite de gaz naturel à haute pression est déterminante pour la dose de rayonnement thermique reçue par les passagers, et de ce fait également pour la *létalité*. La létalité des passagers dans un train passant près d'une rupture totale de la conduite de gaz naturel à haute pression pendant la combustion de la boule de feu peut être déterminée conformément aux tableaux Tab. 14 et Tab. 15 ci-dessous.

La *probabilité* qu'un train soit frappé par une boule de feu résulte de la durée de séjour d'un train dans la zone à risque. Pour obtenir la durée de séjour de tous les trains, on multiplie cette durée de séjour d'un train unique par la fréquence des trains sur le tronçon concerné. Les tableaux Tab. 14 et Tab. 15 ci-dessous illustrent les durées de séjour d'un train pour différentes longueurs de train.

En outre, il est impératif de considérer le scénario du feu de torche succédant à la boule de feu étant donné que les trains passant à proximité de la fuite à la fin de la boule de feu, peuvent être touchés par le feu de torche succédant à la boule de feu. Dans une estimation approximative, dans le cas où un train est concerné par un feu de torche suivant une boule de feu, on calcule cette probabilité de la manière suivante: la durée du passage d'un train à travers une zone de danger d'un feu de torche (cf. Chap. 8.2.5), est multipliée par 50% de la fréquence des trains sur le tronçon concerné. La létalité de ces passagers du train est déterminée selon le Chap. 8.2.5.

Tab. 14 Létalités et durées de séjour lors du passage d'un train^f en fonction de la distance entre la ligne de chemin de fer et la rupture totale avec boule de feu (longueur du train 100 m)

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	Pression [bar]	Létalité [%] et durée de séjour d'un train versus distance entre la rupture totale et la ligne de chemin de fer pour une longueur de train de 100 m									
		< 10 m	10 m à < 30 m	30 m à < 50 m	50 m à < 70 m	70 m à < 90 m	90 m à < 125 m	125 m à < 175 m	175 m à < 225 m	225 m à < 275 m	275 m à < 325 m
4" (114.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6" (168.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	40% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8" (219.1 mm)	25 bar	30% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	55% / 10 s	35% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	55% / 10 s	40% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-
10" (273.0 mm)	25 bar	45% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	60% / 11 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	60% / 11 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	60% / 12 s	60% / 11 s	-	-	-	-	-	-	-	-

^f La probabilité de séjour d'un train doit être multipliée par le nombre de trains dans les deux sens de circulation pour le calcul de la courbe cumulative (voir l'exemple de calcul dans l'annexe C).

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	Pression [bar]	Létalité [%] et durée de séjour d'un train versus distance entre la rupture totale et la ligne de chemin de fer pour une longueur de train de 100 m									
		< 10 m	10 m à < 30 m	30 m à < 50 m	50 m à < 70 m	70 m à < 90 m	90 m à < 125 m	125 m à < 175 m	175 m à < 225 m	225 m à < 275 m	275 m à < 325 m
12" (323.9 mm)	25 bar	55% / 10 s	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	65% / 12 s	60% / 11 s	25% / 6 s	-	-	-	-	-	-	-
	54 bar	65% / 12 s	60% / 12 s	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	65% / 14 s	65% / 13 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-	-
14" (355.6)	50 bar	65% / 14 s	65% / 13 s	55% / 11 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	70% / 15 s	70% / 15 s	65% / 13 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-
16" (406.4 mm)	70 bar	75% / 17 s	75% / 17 s	70% / 15 s	65% / 13 s	-	-	-	-	-	-
	80 bar	75% / 18 s	75% / 17 s	75% / 16 s	70% / 14 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-
20" (508.0 mm)	70 bar	80% / 20 s	80% / 20 s	75% / 19 s	75% / 18 s	70% / 15 s	55% / 10 s	-	-	-	-
22" (559.0 mm)	25 bar	70% / 16 s	70% / 15 s	65% / 14 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-
	45 bar	75% / 19 s	75% / 19 s	75% / 18 s	70% / 16 s	65% / 13 s					
24" (609.6 mm)	70 bar	80% / 24 s	80% / 24 s	80% / 23 s	80% / 22 s	80% / 20 s	75% / 18 s	-	-	-	-
28" (711.0 mm)	70 bar	85% / 27 s	85% / 27 s	85% / 27 s	85% / 26 s	80% / 25 s	80% / 23 s	70% / 14 s	-	-	-
34" (863.6 mm)	70 bar	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 31 s	85% / 30 s	85% / 29 s	80% / 24 s	65% / 12 s	-	-
36" (914.0 mm)	67.5 bar	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 30 s	80% / 26 s	70% / 16 s	-	-
	70 bar	85% / 34 s	85% / 34 s	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 32 s	85% / 31 s	85% / 27 s	75% / 18 s	-	-
	85 bar	90% / 36 s	90% / 36 s	90% / 36 s	85% / 36 s	85% / 35 s	85% / 34 s	85% / 30 s	80% / 24 s	-	-
48" (1219 mm)	67.5 bar	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s	90% / 41 s	90% / 39 s	85% / 35 s	85% / 27 s	65% / 13 s
	70 bar	90% / 44 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s	90% / 42 s	90% / 39 s	85% / 35 s	85% / 28 s	70% / 15 s
	75 bar	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 41 s	90% / 37 s	85% / 31 s	75% / 20 s

Tab. 15 Létalités lors du passage d'un train⁹ en fonction de la distance entre la ligne de chemin de fer et la rupture totale avec boule de feu (longueur du train 300 m)

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	Pression [bar]	Létalité [%] et durée de séjour d'un train versus distance entre la rupture totale et la ligne de chemin de fer pour une longueur de train de 300 m									
		< 10 m	10 m à < 30 m	30 m à < 50 m	50 m à < 70 m	70 m à < 90 m	90 m à < 125 m	125 m à < 175 m	175 m à < 225 m	225 m à < 275 m	275 m à < 325 m
4" (114.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6" (168.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	20% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	20% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8" (219.1 mm)	25 bar	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	30% / 19 s	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	30% / 19 s	20% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-
10" (273.0 mm)	25 bar	25% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	30% / 20 s	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	35% / 20 s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	35% / 21 s	30% / 20 s	-	-	-	-	-	-	-	-

⁹ La probabilité de séjour d'un train doit être multipliée par le nombre de trains dans les deux sens de circulation pour le calcul de la courbe cumulative (voir l'exemple de calcul dans l'annexe C).

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	Pression [bar]	Létalité [%] et durée de séjour d'un train versus distance entre la rupture totale et la ligne de chemin de fer pour une longueur de train de 300 m									
		< 10 m	10 m à < 30 m	30 m à < 50 m	50 m à < 70 m	70 m à < 90 m	90 m à < 125 m	125 m à < 175 m	175 m à < 225 m	225 m à < 275 m	275 m à < 325 m
12" (323.9 mm)	25 bar	30% / 19 s	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	35% / 21 s	35% / 20 s	10% / 15 s	-	-	-	-	-	-	-
	54 bar	35% / 21 s	35% / 21 s	20% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	40% / 23 s	40% / 22 s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-	-
14" (355.6 mm)	50 bar	40% / 23 s	40% / 22 s	30% / 20 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	45% / 24 s	45% / 24 s	40% / 22 s	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-
16" (406.4 mm)	70 bar	50% / 26 s	45% / 26 s	45% / 24 s	40% / 22 s	-	-	-	-	-	-
	80 bar	50% / 27 s	50% / 26 s	45% / 25 s	40% / 23 s	25% / 15 s	-	-	-	-	-
20" (508.0 mm)	70 bar	55% / 29 s	55% / 29 s	55% / 28 s	50% / 27 s	45% / 24 s	30% / 19 s	-	-	-	-
22" (559.0 mm)	25 bar	45% / 25 s	45% / 24 s	40% / 23 s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-
	45 bar	50% / 28 s	50% / 28 s	50% / 27 s	45% / 25 s	40% / 22 s					
24" (609.6 mm)	70 bar	60% / 33 s	60% / 33 s	60% / 32 s	55% / 31 s	55% / 29 s	50% / 27 s	-	-	-	-
28" (711.0 mm)	70 bar	65% / 36 s	65% / 36 s	60% / 36 s	60% / 35 s	60% / 34 s	60% / 32 s	40% / 23 s	-	-	-
34" (863.6 mm)	70 bar	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 40 s	65% / 39 s	65% / 38 s	60% / 33 s	35% / 21 s	-	-
36" (914.0 mm)	67.5 bar	70% / 42 s	70% / 42 s	70% / 42 s	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 39 s	60% / 35 s	45% / 25 s	-	-
	70 bar	70% / 43 s	70% / 43 s	70% / 42 s	70% / 42 s	65% / 41 s	65% / 40 s	60% / 36 s	50% / 27 s	-	-
	85 bar	70% / 45 s	70% / 45 s	70% / 45 s	70% / 45 s	70% / 44 s	70% / 43 s	65% / 39 s	60% / 33 s	-	-
48" (1219 mm)	67.5 bar	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 51 s	75% / 50 s	70% / 48 s	70% / 44 s	65% / 36 s	40% / 22 s
	70 bar	75% / 53 s	75% / 53 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 51 s	75% / 51 s	70% / 48 s	70% / 44 s	65% / 37 s	45% / 24 s
	75 bar	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 53 s	75% / 52 s	75% / 50 s	70% / 46 s	65% / 40 s	55% / 29 s

8.2.5 Feu de torche

Dans le cas de conduites relativement petites, le feu de torche n'induit aucune létalité importante pour les passagers d'un train lors de son passage. Dans le cas de conduites plus grandes, on a calculé un rayon au sein duquel les passagers de trains traversant ce rayon ont une létalité de 100%. Les passagers de trains passant en dehors de ce rayon par rapport à la rupture totale de la conduite de gaz naturel à haute pression ont une létalité de 0%.

Tab. 16 Rayon R_{FAZ} à l'intérieur duquel on suppose une létalité de 100% pour les personnes dans des trains à une vitesse de 80 km/h en cas de feu de torche

Diamètre: largeur nominale [pouces] ou diamètre extérieur de la conduite	Pression	R_{FAZ} [m]	Diamètre: largeur nominale [pouces] ou diamètre extérieur de la conduite	Pression	R_{FAZ} [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	-	14" (355.6 mm)	50 bar	5
	50 bar	-		70 bar	15
	64 bar	-	16" (406.4 mm)	70 bar	15
	70 bar	-		80 bar	20
6" (168.3 mm)	25 bar	-	20" (508.0 mm)	70 bar	25
	64 bar	-	22" (559.0 mm)	25 bar	10
	70 bar	-		45 bar	20
8" (219.1 mm)	25 bar	-	24" (609.6 mm)	70 bar	30
	50 bar	-	28" (711.0 mm)	70 bar	40
	64 bar	-	34" (863.6 mm)	70 bar	60
	70 bar	-	36" (914.0 mm)	67,5 bar	65
10" (273.0 mm)	25 bar	-		70 bar	70
	50 bar	-		85 bar	85
	64 bar	-	48" (1219 mm)	67.5 bar	125
	70 bar	-		70 bar	130
12" (323.9 mm)	25 bar	-		75 bar	140
	50 bar	-			
	54 bar	-			
	70 bar	-			

La probabilité que, lors d'un feu de torche, un seul train soit concerné (t_{FAGZ}), résulte du temps de passage du train sur la longueur du tronçon de voie ferrée dans la zone à risque directe (R_{50} Feu de torche pour des personnes se trouvant à l'air libre), de la distance d'arrêt et de la longueur du train. La distance d'arrêt retenue pour un train ayant une vitesse de 80 km/h est de 400 m. La longueur du tronçon de voie dans la zone à risque $R_{50 FA}$ est, selon la distance entre la brèche et la voie ferrée, inférieure ou égale au diamètre du rayon de létalité $R_{50 FA}$.

Cette durée de passage d'un train est multipliée par la fréquence des trains sur le tronçon concerné.

8.2.6 Dommages mécaniques aux voies

Lors d'une rupture totale à proximité immédiate de la voie (p. ex. croisement de la ligne de chemin de fer avec la conduite de gaz naturel à haute pression), la formation d'un cratère entraîne en peu de temps une destruction mécanique de la voie.

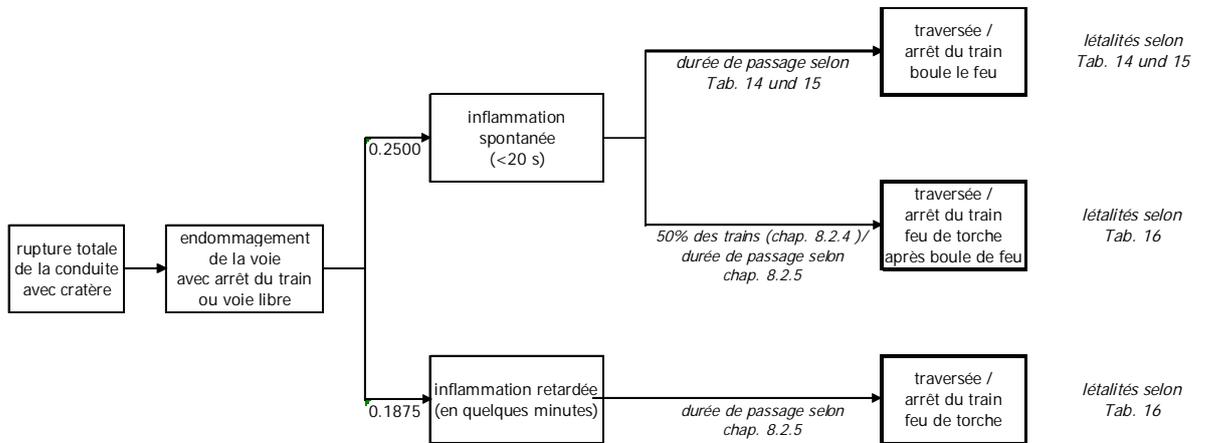
Pour les conduites de grande taille ($\geq 14''$), le cas de l'endommagement de la voie avec arrêt du train est calculé de la même manière que le passage du train.

Pour les conduites de petite taille ($< 14''$), le cas de l'endommagement de la voie avec arrêt du train pour la boule de feu est calculé de la même manière que le passage du train. Pour le feu de torche, on considère que les trains passant à moins de 5 m de la brèche s'arrêtent. Il est alors supposé que la tête du train se trouve au point le plus proche de la brèche. Les létalités des passagers du train sont dans ce cas calculées comme pour des personnes se trouvant à l'air libre, tout en supposant que les passagers sont répartis dans le train de façon uniforme.

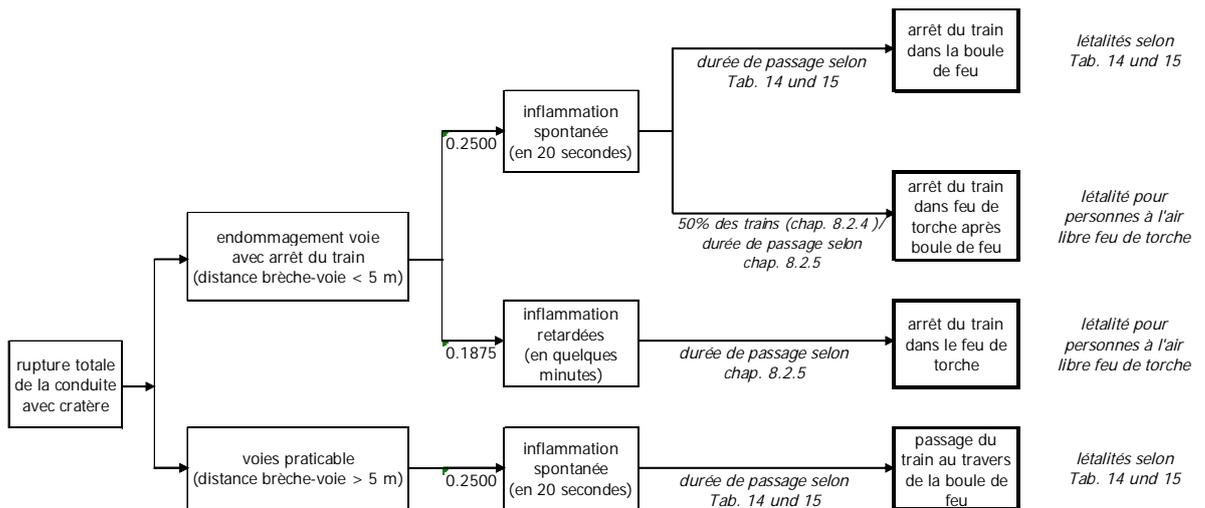
8.2.7 Aperçu des scénarios à calculer

Les scénarios ci-après montrent de façon synoptique la méthode de calcul pour les grandes et les petites conduites. Ils ne comprennent que les scénarios devant être effectivement calculés.

III. 9 Arbre des causes et des événements calculés pour les conduites de grande taille ($\geq 14''$)



III. 10 Arbres des causes et des événements calculés pour des conduites de petite taille (< 14'')



* calcul comme passage train au travers de la boule de feu

8.3 Objets particuliers bâtiments

8.3.1 Exposition des personnes

La catégorie des objets particuliers comprend tous les bâtiments pour lesquels les létalités standard pour des personnes se trouvant dans des bâtiments ne sont pas applicables sans vérification. Cela concerne notamment des bâtiments accueillant d'importants rassemblements de personnes tels que les centres commerciaux, les salles de concerts, les centres de congrès, les hôtels, les écoles, les stades, les hôpitaux, les maisons de retraite, les maisons pour personnes handicapées, les grandes crèches, etc.

Dans le cas de ces objets, les chemins de fuite et les doses de rayonnement thermique qui en résultent pour les personnes ne peuvent pas être calculées avec les hypothèses normalisées.

Dans ces bâtiments souvent de grande taille, il convient d'une part de prendre en compte les possibilités de fuite à l'intérieur du bâtiment vers d'autres parties du bâtiment plus à l'écart, sans que les personnes ne soient obligées de fuir à l'air libre.

Dans le cas d'importants rassemblements de personnes, d'autre part, il faut considérer également les réactions de panique dans le comportement de fuite.

Pour certains groupes de personnes (p. ex. dans le cas de maisons de retraite et de maisons pour personnes handicapées, de crèches), la mobilité réduite lors de la fuite doit être prise en considération.

Les létalités dans ces cas spéciaux doivent être déterminées individuellement en prenant en compte les différentes situations.

8.3.2 Centres commerciaux

Dans le cas des centres commerciaux et des grands centres d'achats avec des courbes de fréquentation sur la semaine, on calcule, pour la détermination de l'ampleur des dommages, d'une part le jour de plus forte fréquentation de la semaine et d'autre part, tous les autres jours de la semaine en tant qu'états pertinents.

La probabilité de séjour des personnes est déterminée sur la base des horaires d'ouverture.

8.3.3 Hôpitaux, centres de soins, etc.

Dans le cas des institutions comprenant des installations de soins, on considère une occupation spécifique moyenne de 1.5 à 2.5 personnes par lit. Ces hypothèse d'occupation sont utilisées pour le jour. Pour les heures de visite, on intègre en outre également les visiteurs présents. Le personnel présent la nuit doit être déterminé le cas échéant.

Lors de l'estimation de l'ampleur des dommages, il convient de prendre en compte la mobilité fortement réduite des personnes.

9 Rupture des installations de gaz naturel à haute pression

9.1 Aperçu des installations de gaz naturel à haute pression

9.1.1 Les gazoducs à haute pression (conduites de transport)

Dans toute la Suisse, on comptait environ 2'000 km de gazoducs à haute pression en service à fin 2007, avec des diamètres de 4" (114.3 mm) à 48" (1219 mm) et des pressions de service de 16 à 80 bar.

Les gazoducs sont construits uniquement avec des tubes en acier. Les différents éléments sont raccordés entre eux par une soudure transversale et enterrés sous un recouvrement de 1 m au minimum. La conduite est protégée cathodiquement et enveloppée dans une couche d'isolation, généralement en polyéthylène adhérent bien au matériau.

9.1.2 Les réservoirs tubulaires

Les réservoirs tubulaires se composent de segments de conduite de gros calibre mesurant plusieurs centaines de mètres de long et généralement disposés en parallèle. Le diamètre des installations présentes en Suisse se situe en général entre 36" (0,90 m) et 100" (2.5 m). La longueur des tubes individuels se situent souvent aux environs de 200 à 300 m.

9.1.3 Les postes

Les postes de détente et de comptage (PDC) et les postes de livraison sont des éléments de liaison entre des réseaux ayant des pressions de service différentes.

La *détente* a pour but d'abaisser la pression du gaz à la valeur pour laquelle le réseau est dimensionné, à savoir, le plus souvent, 5 bar (pression de distribution des entreprises régionales). Des organes de sécurité (clapets de sécurité ou soupapes de purge) empêchent automatiquement que la pression maximale admise soit dépassée dans le réseau aval. Pour éviter que la température du gaz ne s'abaisse trop au moment de la détente, celui-ci est préchauffé. Par ailleurs, des filtres d'entrée protègent contre d'éventuelles impuretés les appareils situés en aval (notamment les compteurs). Les données d'exploitation et les dérangements sont communiqués à la centrale de commande par télétransmission.

Les *postes douaniers* permettent de mesurer la quantité de gaz importée et d'en réguler le débit. C'est en règle générale là que le gaz est odorisé avant d'être dirigé vers le réseau de transport.

Le comptage de la quantité de gaz et la régulation de son débit permettent de calculer les quantités de gaz livrées et consommées en termes de volume et d'énergie.

Pour pouvoir acheminer le gaz naturel, il faut générer une pression de transport. Cette pression étant consommée pour le transport, une *station de compresseurs* est disposée tous les 150 à 200 km afin d'augmenter la pression. Les compresseurs fonctionnent généralement avec des turbines à gaz qui utilisent directement le gaz naturel de la conduite de transport, ou à l'électricité.

Les *postes* sont généralement situés dans des bâtiments de construction légère afin de protéger les appareils des intempéries et d'atténuer les émissions sonores.

Les *conduites extérieures* sont situées à proximité du bâtiment. On y trouve en particulier les vannes anti-feu d'entrée et de sortie du poste, les gares de racleurs et les purges qui sont placées de part et d'autre du poste de sectionnement motorisé placé sur le gazoduc. L'ensemble de l'installation est en principe clôturé.

9.2 Rupture de conduites de transport

La Suisse ne dispose aujourd'hui d'aucune statistique de rupture suffisante. Pour les calculs du risque, on utilise ainsi les fréquences de rupture issues de la statistique de l'EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group). Pour la Suisse, ces données issues du 7^e rapport de l'EGIG sont adaptées au moyen de statistiques partielles.

La fréquence totale de rupture est la somme des fréquences de rupture dus à des interventions de tiers, à des mouvements de terrain, à des défauts de matériau, à des perçages effectués par erreur, à la corrosion ainsi qu'à une part de causes inconnues.

La rupture totale (en anglais rupture ou full bore rupture) se définit par une fuite d'une dimension supérieure au diamètre de la conduite.

La rupture totale est envisageable en conséquence des causes suivantes:

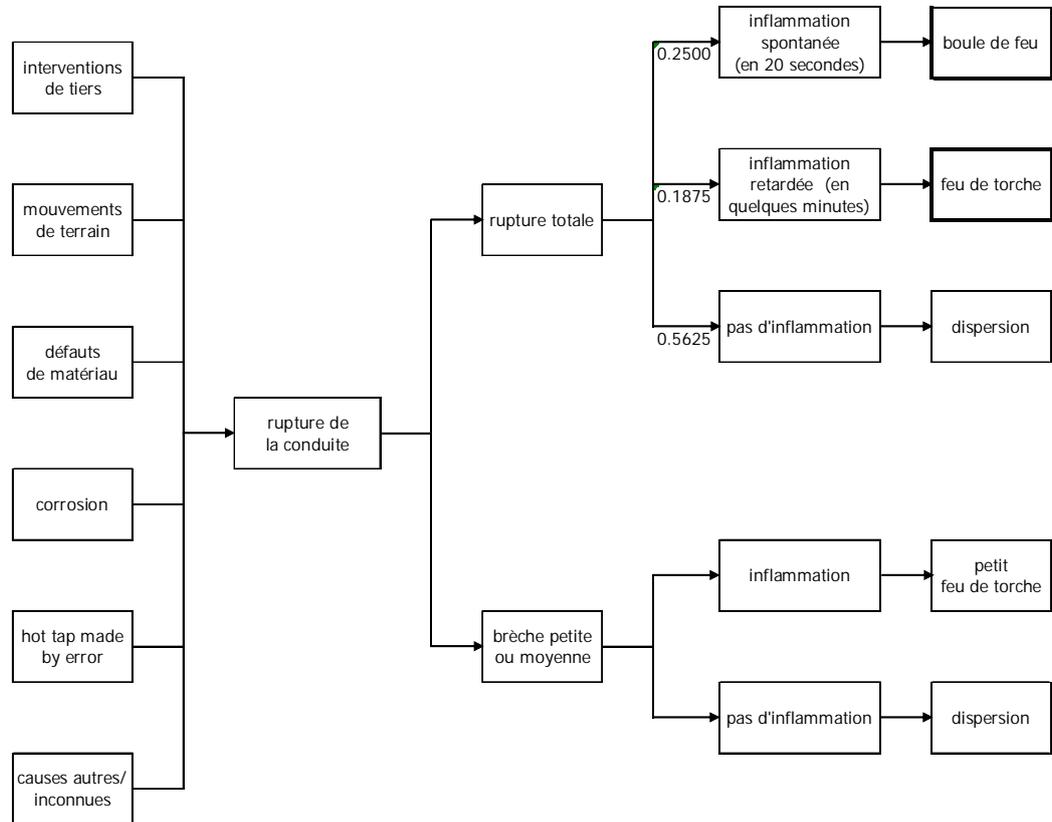
- interventions de tiers
- mouvements de terrain ^h et
- défauts de matériau.

Selon les données statistiques, les autres causes de rupture sont peu susceptibles d'entraîner une rupture totale.

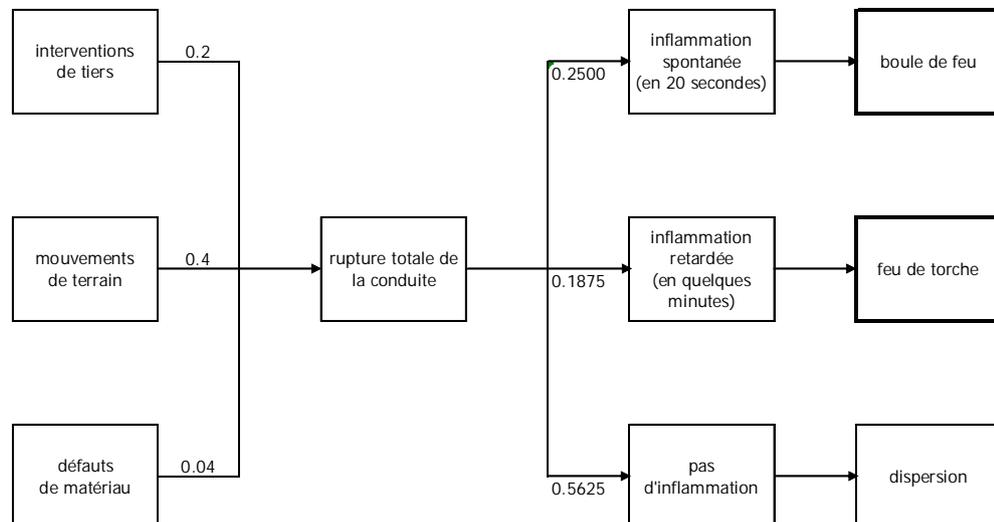
^h Par mouvements de terrain on entend toutes les causes tombant dans la catégorie "ground movement" selon la statistique de l'EGIG (7th report): l'eau ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), glissements de terrain ("Landslide"), minages ("Mining").

9.2.1 Arbre des causes et des événements

III. 11 Arbre des causes et des événements pour la rupture de gazoducs à haute pression enterrés dans un environnement non confiné



III. 12 Arbre des causes et des événements pour la rupture totale (diamètre de fuite > diamètre de conduite, en anglais "full bore rupture") de gazoducs à haute pression enterrés dans un environnement non confiné



9.2.2 Fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers

Les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers sont déterminées comme suit sur la base de la statistique de l'EGIG, en fonction de l'épaisseur de la paroi (1970 – 2007):

Tab. 17 Fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers

Épaisseur de la paroi [mm]	Fréquence de rupture [(1'000 km y) ⁻¹] à la suite d'interventions de tiers	Épaisseur de la paroi [mm]	Fréquence de rupture [(1'000 km y) ⁻¹] à la suite d'interventions de tiers
5	0.340	12.5	0.008
5.6	0.260	14.2	0.004
6.3	0.180	16	0.001
7.1	0.120	17.5	0.001
8	0.070	20	0.001
8.8	0.040	22.2	0.001
10	0.020	25	0.001
11	0.012		

Lorsque l'on augmente l'épaisseur de la paroi pour réduire la fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers, on peut utiliser le Tab. 17 jusqu'à un facteur de conception de 0.35. Pour les types de conduites les plus courants (pression autorisée 70 bar, qualité de l'acier avec une limite élastique de 360 N/mm²), ce tableau donne, pour le calcul des courbes cumulatives, les fréquences de rupture suivantes (Tab. 18):

Tab. 18 Fréquences de rupture minimales à la suite d'interventions de tiers pour les estimations de risque (pression 70 bar)

Diamètre	Fréquence de rupture minimale [(1'000 km y) ⁻¹] à la suite d'interventions de tiers
≤ 6"	0.340
8"	0.260
10"	0.120
12"	0.040
14"	0.020
16"	0.012
18"	0.008
20"	0.004
> 20"	0.001

Pour les conduites ayant un coefficient de conception < 0.35 , l'évaluation de la réduction du risque s'effectue par l'augmentation de l'épaisseur de la paroi et se fait en accord avec les autorités compétentes.

Lorsque l'on augmente l'épaisseur de la paroi pour réduire la fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers, il ne faut pas utiliser une qualité d'acier inférieure.

Lorsque le gazoduc à haute pression se trouve dans des zones à bâtir, les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers sont multipliées par le facteur de correction $K_U = 3.0$. Les conduites dans les routes entourées des deux côtés par des zones à bâtir sont considérées comme étant situées dans une zone à bâtir.

La *proportion de ruptures totales* par rapport au nombre total de ruptures à la suite d'interventions de tiers est fixée à 20% conformément à la statistique de l'EGIG 1970 – 2007.

9.2.3 Fréquences de rupture à la suite de mouvements de terrain

La fréquence de rupture à la suite de mouvements de terrain est déterminée comme suit sur la base de la statistique de l'EGIG (1970 – 2007), en fonction du diamètre:

Tab. 19 Fréquences de rupture à la suite de mouvements de terrain (événements naturels) ⁱ

Diamètre [pouces]	Fréquence de rupture [(1'000 km y) ⁻¹] à la suite de mouvements de terrain
4" (114.3 mm)	0.039
6" (168.3 mm)	0.036
8" (219.1 mm)	0.033
10" (273.0 mm)	0.030
12" (323.9 mm)	0.028
14" (355.6 mm)	0.026
16" (406.4 mm)	0.023
18" (457.2 mm)	0.021
20" (508.0 mm)	0.019
22" (558.8 mm)	0.017
24" (609.6 mm)	0.016
26" (660.0 mm)	0.014
28" (711.0 mm)	0.013
34" (864.0 mm)	0.009
36" (914.0 mm)	0.007
48" (1219 mm)	0.003
60" (1524 mm)	0.003

La *proportion de ruptures totales* par rapport au nombre total de ruptures à la suite de mouvements de terrain est fixée à 40% conformément à la statistique de l'EGIG 1970 – 2007.

Sur la base d'expertises géologiques, il est possible d'adapter les fréquences de rupture dues à des mouvements de terrain sur des tronçons spécifiques. Il est donc possible de

ⁱ Par mouvements de terrain on entend toutes les causes tombant dans la catégorie "ground movement" selon la statistique de l'EGIG (7th report): l'eau ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), glissements de terrain ("Landslide"), minages ("Mining").

réduire les fréquences de rupture dues à des mouvements de terrain dans des régions exemptes de dangers naturels. De même, on augmentera les fréquences de rupture dues à des mouvements de terrain dans les régions particulièrement sujettes à des dangers naturels:

- Lorsque l'axe de la conduite n'est pas situé dans une zone de danger conformément à la carte des dangers naturels des cantons, la fréquence de rupture due au "ground movement" (mouvement de terrain) est réduite dans la Tab. 19 d'un facteur 10.
- Lorsqu'il n'existe pas de cartes des dangers naturels, il est possible de recourir aux Recommandations 1997 "Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire" et "Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire".
- Lorsque l'axe de la conduite est situé dans une zone de danger conformément à la carte des dangers naturels des cantons, la fréquence de rupture due au "ground movement" doit être augmentée de façon proportionnée si le danger naturel cartographié peut déclencher une rupture totale.

9.2.4 Fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau

Les fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau sont déterminées comme suit conformément à la statistique de l'EGIG (1970 – 2007), en fonction de l'âge de la conduite (année de construction):

Tab. 20 Fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau

Année de construction	Fréquence de rupture [(1'000 km y) ⁻¹] à la suite de défauts de matériau
1964 – 1973	0.060
1974 – 1983	0.033
après 1984	0.006

La *proportion de ruptures totales* par rapport au nombre total de ruptures à la suite de défauts de matériau est estimée à 4%.

9.2.5 Effet des mesures

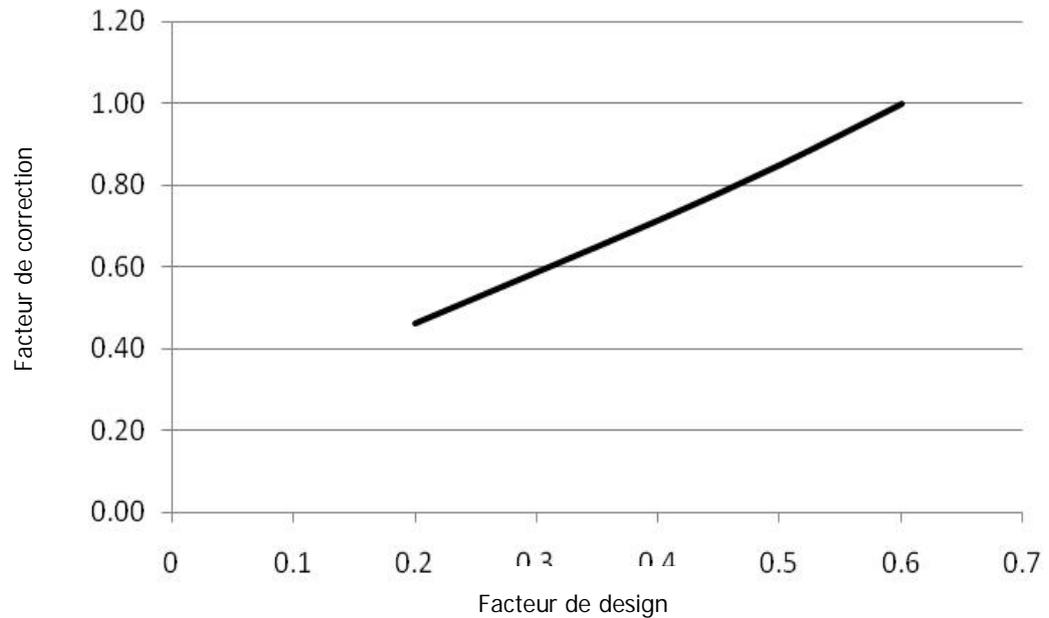
L'effet de mesures individuelles sur les fréquences de rupture peut être déterminé comme suit:

9.2.5.1. Augmentation de l'épaisseur de la paroi

En cas d'augmentation de l'épaisseur de la paroi, les fréquences de rupture dues à des interventions de tiers sont déterminées selon le Tab. 17 dans le Chap. 9.2.2. On tiendra compte des restrictions selon le Tab. 18.

9.2.5.2. Facteur de design

III. 13 Influence du coefficient de conception sur les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_{DF})



Le facteur de design DF (= coefficient de conception f_0) se calcule comme suit:

$$f_0 = DF = \frac{P_d \cdot D_a}{20 \cdot R_{t0.5} \cdot s}$$

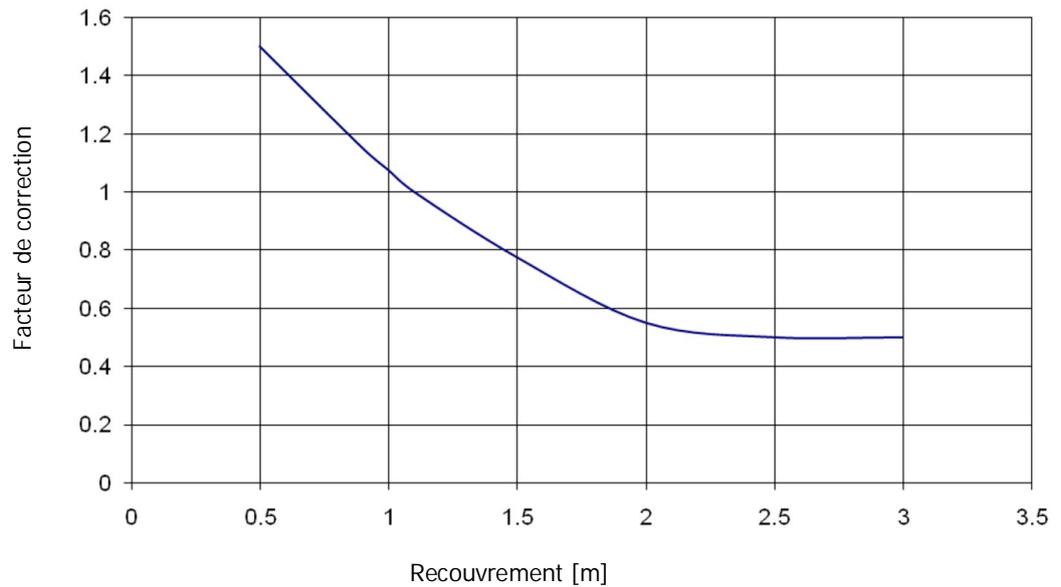
avec	s =	épaisseur de la paroi	[mm]
	P_d =	pression de construction	[bar]
	D_a =	diamètre extérieur de conduite	[mm]
	f_0 =	coefficient de conception (=facteur de design DF)	[---]
	$R_{t0.5}$ =	limite élastique pour un allongement total de 0.5% (valeur minimale spécifique) à 20°C	[N/mm ²]

9.2.5.3. Abaissement de la pression

Un abaissement de la pression (pression de service) entraîne une réduction de l'ampleur des dommages (Chap. 6.2.2) ainsi qu'une réduction du coefficient de conception et donc de la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers (selon III. 13, Chap. 9.2.5.2 Hauteur de recouvrement)

9.2.5.4. Recouvrement

III. 14 Influence de la hauteur de recouvrement sur les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_U)



9.2.5.5. Plaques de protection

Influence de plaques de protection sur la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_S)

Plaque de protection + ruban avertisseur: $K_{S-W} = 0.1$

9.2.5.6. Contrôle du tracé

Influence de la fréquence de contrôles du tracé sur la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers (K_T)

Contrôle hebdomadaire: $K_T = 0.7$

9.2.5.7. Cumul des mesures

Si l'on cumule les mesures précitées de réduction d'une rupture à la suite d'interventions de tiers, les facteurs de correction peuvent être multipliés car les mesures sont indépendantes les unes des autres:

Facteur de correction total:	$K_{\text{Total}} = K_{\text{DF}} \times K_{\text{U}} \times K_{\text{S-W}} \times K_{\text{T}}$
------------------------------	--

Dans le cas de gazoducs à haute pression situés dans des zones à bâtir, le facteur de correction total doit encore être multiplié par le facteur de correction pour les zones à bâtir ($K_{\text{U}} = 3$). Les conduites dans les routes entourées des deux côtés par des zones à bâtir sont considérées comme étant situées dans une zone à bâtir.

La prise en compte, dans l'étude de risque, d'autres mesures constructives visant à réduire le risque, s'effectue en accord avec les autorités compétentes.

9.2.6 Probabilités d'inflammation

La probabilité d'inflammation lors d'une rupture totale dans un environnement non confiné est estimée en moyenne à 0.4375. La proportion d'inflammations immédiates et retardées est évaluée conformément au Tab. 21

Tab. 21 Probabilités d'inflammation selon le Health and Safety Executive (HSE)

Inflammation	Probabilité d'inflammation
Inflammation immédiate	0.2500
Inflammation retardée	0.1875
Aucune inflammation	0.5625

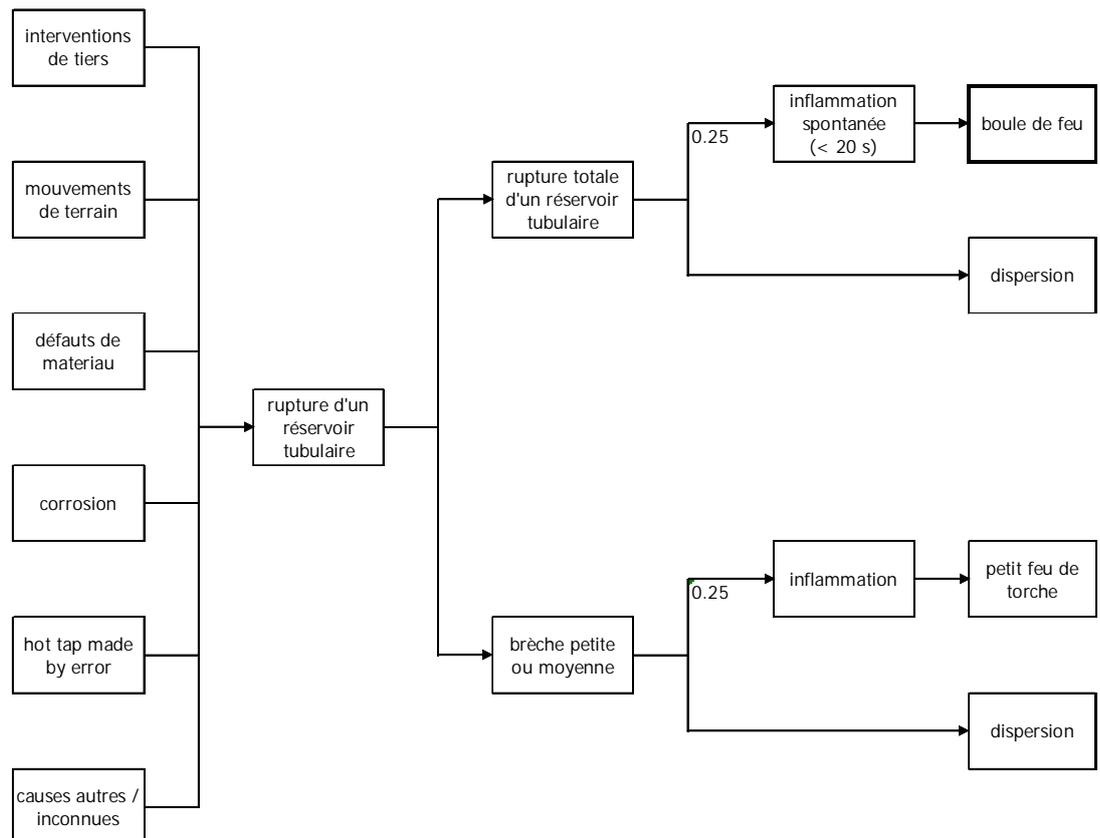
9.3 Rupture de réservoirs tubulaires

9.3.1 Arbre des causes et des événements

Le scénario de dommages le plus grave dans le cas d'un réservoir tubulaire est la rupture totale d'un tube-réservoir. La totalité du gaz qu'il contient peut s'échapper en quelques secondes et brûler sous la forme d'une boule de feu en cas d'inflammation immédiate. Lors de la rupture d'un tube-réservoir, ce ne sont pas, comme dans le cas de conduites de transport, de grandes quantités de gaz qui s'échappent sur un temps relativement long, car très vite, l'apport de gaz naturel ne se fait que par les conduites de liaison de petit diamètre.

Il convient en outre de vérifier si la rupture de conduites de liaison ou d'armatures implique des létalités importantes pour le calcul de la courbe cumulative.

III. 15 Arbre des causes et des événements pour la rupture d'un réservoir tubulaire dans un environnement non confiné



La quantité de gaz qui s'échappe d'un tube-réservoir brûle sous forme de boule de feu, le feu de torche ultérieur n'étant alimenté que par la quantité de gaz provenant des conduites de liaison.

9.3.2 Rayonnement thermique et rayons de létalité

Les rayons de létalité dépendent directement de la quantité de gaz qui s'échappe. Cette dernière se calcule à partir du volume d'un tube et de la pression ainsi que de constantes spécifiques des gaz. On obtient ainsi, pour la quantité de gaz qui s'échappe:

$$M_g = \frac{V \times P \times \mu}{R \times T} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times \mu}{R \times T \times K}$$

avec	M_g	Quantité de gaz libérée M_g [kg]
	P	Pression [bar]
	D	Diamètre intérieur [m]
	L	Longueur du tube-réservoir [m]
	μ	Poids moléculaire du gaz naturel (17.5×10^{-3} kg / mol)
	R	Constante spécifique des gaz (8.314472 J (mol K) ⁻¹)
	T	Température absolue du gaz comprimé °K (290 K)
	K	Facteur de compressibilité ^j

Pour le gaz naturel, il s'applique ($\mu = 17.5 \times 10^{-3}$ kg / mol et T = 290 °K):

$$M_g = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times 1 / K \times 0.726$$

avec	M_g	Quantité de gaz libérée M_g [kg]
	P	Pression [bar]
	D	Diamètre intérieur [m]
	L	Longueur du tube-réservoir [m]
	K	Facteur de compressibilité ^j

^j Le facteur de compressibilité est entre autres dépendant de la pression et de la composition du gaz et pour des mélanges de gaz relativement difficile à estimer. En règle général ce facteur est fourni par l'exploitante.

Les rayons de létalité peuvent être déterminés sur la base des quantités de gaz qui s'échappent, conformément au Tab. 22:

Tab. 22 Rayons de létalité lors d'une boule de feu d'un réservoir tubulaire

Quantité de gaz d'un tube-réservoir	Durée de combustion	R _{100 FE} [m]	R _{75 FE} [m]	R _{50 FE} [m]	R _{25 FE} [m]	R _{0 FE} [m]	R _{ZI FE} [m]
15'000 kg	9.4 s	67	77	91	110	148	52
20'000 kg	10.3 s	78	90	104	127	169	59
25'000 kg	11.1 s	88	100	117	141	187	66
30'000 kg	11.8 s	97	110	127	154	203	71
35'000 kg	12.4 s	105	119	137	165	218	77
40'000 kg	13.0 s	112	127	146	176	232	81
45'000 kg	13.5 s	119	134	155	186	245	85
50'000 kg	14.0 s	126	142	163	195	257	89
55'000 kg	14.5 s	132	148	170	204	268	93
60'000 kg	14.9 s	138	155	178	212	279	97
65'000 kg	15.3 s	143	161	185	221	290	100
70'000 kg	15.7 s	149	167	191	228	300	103
75'000 kg	16.0 s	154	173	198	236	309	106
80'000 kg	16.4 s	159	178	204	243	318	109
85'000 kg	16.7 s	164	183	210	250	327	112
150'000 kg	20.2 s	216	241	274	325	423	141

Les létalités de personnes se trouvant à l'air libre lors d'une boule de feu sont déterminées comme pour les conduites de transport enterrées conformément au Tab. 4.

Les létalités de personnes se trouvant dans des bâtiments lors d'une boule de feu sont nettement plus faibles que lors d'une rupture totale de conduites de transport, car après la boule de feu, seule la quantité de gaz maximale contenue dans les conduites de liaison peut continuer à brûler sous forme de feu de torche. Les létalités sont déterminées conformément au Tab. 23 ci-dessous:

Tab. 23 Létalités standardisées pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le scénario d'une boule de feu

Rayons de létalité	Létalité
dans la zone $\frac{3}{4} R_{Z1FE}$	100%
entre $\frac{3}{4} R_{Z1FE}$ et R_{Z1FE}	80%
dans la zone R_{75FE}	10%
en dehors de R_{75FE}	0%

Pour le feu de torche des conduites de liaison après la boule de feu sur le tube-réservoir, ainsi que pour la rupture des conduites de liaison, on applique les létalités de la même manière que pour les conduites de transport, conformément à létalité Tab. 5 et Tab. 6, rayons de létalité Tab. 8).

9.3.3 Fréquences de rupture

Les fréquences de rupture pour les *tubes-réservoirs* sont déterminés comme suit:

Rupture à la suite d'interventions de tiers:

- Pour les réservoirs tubulaires situés sur un site d'exploitation clôturé, on peut, le cas échéant, réduire les fréquences de rupture à la suite d'interventions de tiers utilisés pour les conduites de transport (cf. Tab. 17).
- D'autres causes de rupture (p. ex. crash d'avion) doivent éventuellement être envisagées.
- La proportion de ruptures totales pour cause "d'intervention de tiers" est évaluée à 20%, comme pour les conduites de transport.

Rupture à la suite de mouvements de terrain:

- Pour déterminer les fréquences de rupture des tubes à la suite de mouvements de terrain, on peut réduire de 6% les fréquences de rupture des conduites de transport (cf. Tab. 19).
- Pour déterminer les fréquences de rupture des sections de tubes à la suite de mouvements de terrain, on peut réduire de 50% les fréquences de rupture des conduites de transport (cf. Tab. 19) lorsque le réservoir tubulaire ne se trouve pas dans une pente ou au pied d'une pente.
- Pour déterminer les fréquences de rupture des tubes à la suite de mouvements de terrain, on peut réduire de 25% les fréquences de rupture des conduites de transport (cf. Tab. 19 dans le rapport-cadre) lorsque le réservoir tubulaire ne se trouve pas dans la zone d'influence de cours ou de plans d'eau (carte des risques des cantons).
- La proportion de ruptures totales pour cause de "mouvements de terrain" est évaluée à 40%, comme dans le cas des conduites de transport.

Rupture à la suite de défauts de matériau et de construction:

- Les fréquences de rupture à la suite de défauts de matériau et de construction sont déterminés de la même manière que pour les conduites de transport (cf. Tab. 20).
- La proportion de ruptures totales pour cause de "défauts de matériau et de construction" est évaluée à 4%, comme dans le cas des conduites de transport.

Les fréquences de rupture pour les *autres parties de l'installation* (conduites de liaison, armatures, brides, etc.) sont déterminés comme suit:

Tab. 24 Fréquences de rupture des conduites de liaison

Conduite de liaison	Fréquence de rupture [(1000 km y) ⁻¹]	Rupture totale [(1000 km y) ⁻¹]
4" (114.3 mm)	2	0.3
6" (168.3 mm)	2	0.3
8" (219.1 mm)	0.5	0.1
10" (273.0 mm)	0.5	0.1

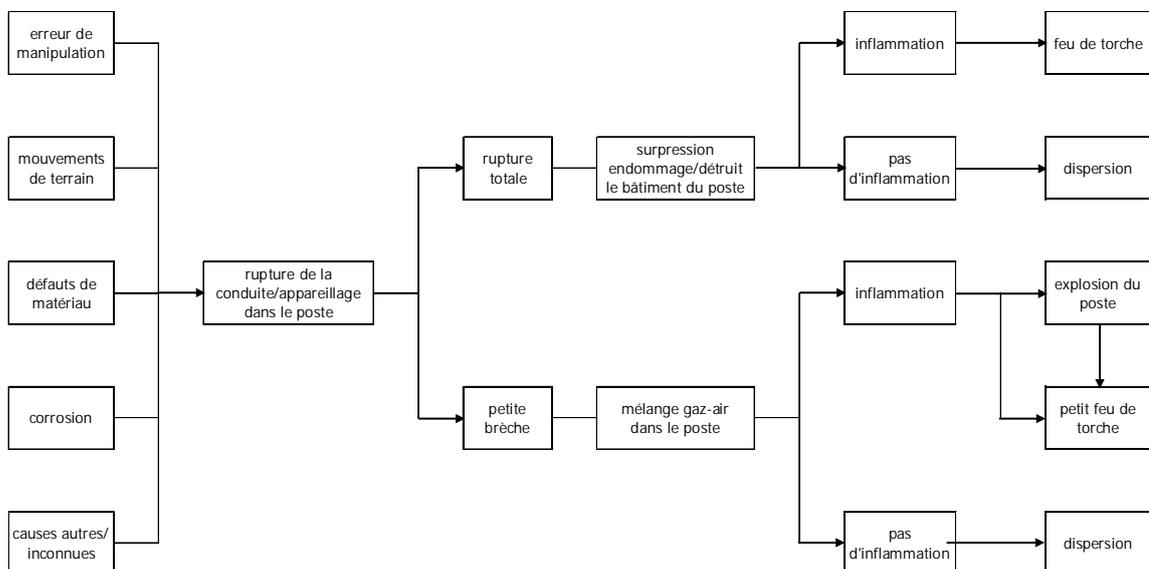
9.3.4 Calcul de la courbe cumulative

Pour l'analyse du risque d'un réservoir tubulaire, on calcule la courbe cumulative pour la totalité du réservoir tubulaire en tant qu'unité technique fonctionnelle. On considère des

ruptures totales tous les 10 m le long du tracé effectif de chaque tube-réservoir pris individuellement.

9.4 Rupture d'installations de gaz naturel à haute pression dans des postes

III. 16 Arbre des causes et des événements pour la rupture d'un gazoduc à haute pression dans un environnement confiné (poste)



9.4.1 Rupture totale de l'installation de gaz naturel à haute pression

Lors de la rupture totale d'une installation de gaz naturel à haute pression dans le bâtiment d'un poste, l'espace intérieur se remplit immédiatement de gaz naturel. Le mélange gaz naturel-air n'est pas inflammable en raison de la concentration élevée en gaz naturel. Seule la rupture d'éléments constructifs du bâtiment peut causer une dispersion du gaz et générer un feu de torche. On applique ainsi les rayons de létalité normaux pour le feu de torche.

9.4.2 Petites fuites sur l'installation de gaz naturel à haute pression

Dans le cas d'une petite fuite, le gaz qui s'échappe peut former un mélange inflammable susceptible d'entraîner une explosion en présence d'une source d'inflammation. Les conséquences de l'explosion dépendent fortement de la géométrie et de la structure constructive du poste.

9.4.3 Dommages en cas de rupture d'installations de gaz naturel à haute pression dans des postes

Les dommages causés aux personnes et aux composants sont fonction des effets de la pression lors de l'explosion du poste (surpression et type d'impulsion) ainsi que de l'effet thermique d'un feu de torche.

Les conséquences d'explosions pour les *installations auxiliaires petites et moyennes* (vérifié jusqu'à un volume intérieur de 720 m³) se différencient selon leur situation à l'intérieur de la zone de sécurité (30 m) ou dans l'environnement en dehors de la zone de sécurité:

En dehors des zones de sécurité, aucune létalité n'est attendue pour les personnes se trouvant à l'air libre, autant en termes de conséquences directes de l'onde de pression (pneumothorax) qu'en termes d'effondrement des bâtiments.

A l'intérieur de la zone de sécurité, les conséquences directes d'une explosion (pneumothorax) pour des postes d'un volume < 720 m³ sont en règle générale négligeables. Les létalités en termes de conséquences indirectes (effondrement de bâtiments, personnes projetées par le souffle de l'explosion, projection de débris) doivent être déterminées le cas échéant dans le cas d'une occupation humaine notable à l'intérieur de la zone de sécurité.

Dans le cas des postes dont le *volume est > 720 m³*, il convient le cas échéant de déterminer et d'évaluer les incidents envisageables et les létalités à l'intérieur des zones de sécurité.

9.4.4 Fréquences de rupture

Les fréquences de rupture *d'éléments de l'installation* peuvent être estimées conformément aux données du "Purple Book".

DNV Consulting a développé une méthodologie plus récente et plus détaillée pour estimer les fréquences de rupture des différents éléments de l'installation sur la base des "hydrocarbon release database (HCRD)" du HSE britannique (Spouge, John / DNV Consulting 2005).

En mars 2010, l'International Association of Oil and Gas Producers (OGP) a publié une interprétation des données HCRD jusqu'à 2006 et actualisée par DNV (OGP Report n°434-1: <http://www.ogp.org.uk/pubs/434-1.pdf>). Ces fréquences de rupture peuvent également être utilisées.

9.4.5 Calcul de la courbe cumulative

Les postes sont considérés dans l'étude de risque comme des entreprises dans le sens de l'ordonnance sur les accidents majeurs.

Pour l'analyse du risque au niveau des postes, on considère en général la zone clôturée (limite juridique de surveillance).

Les postes de sectionnement, en règle générale enterrés, sont considérés dans l'étude de risque comme des conduites de transport.

9.5 Rupture de gazoducs à haute pression dans des galeries, des canaux et autres environnements confinés

Dans certains cas, les conduites de gaz traversent des endroits partiellement ou complètement fermés (galeries, canaux, etc.). Lors d'une rupture totale d'une conduite, un tel espace se remplit immédiatement de gaz naturel, qui n'est ainsi pas inflammable. Seule la rupture d'éléments aux portails de galeries et au niveau de points faibles des canaux peut entraîner la dispersion du gaz et générer ainsi un feu de torche.

Dans le cas d'une petite fuite, le gaz qui s'échappe peut former un mélange inflammable susceptible d'entraîner une explosion en présence d'une source d'inflammation. Les conséquences dépendent fortement de la géométrie.

9.5.1 Galeries et canaux

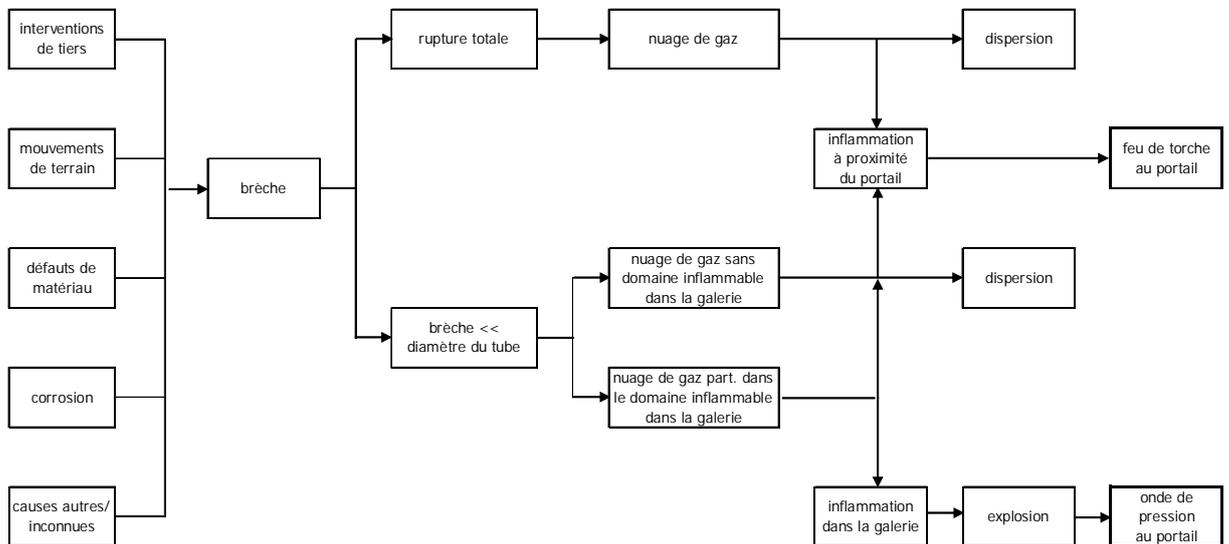
Les conduites sont parfois disposées dans des galeries (minières, en général dans la montagne) ou des canaux (fabriqués, le plus souvent dans une zone à bâtir), ou encore dans des éléments de ponts. Leur longueur peut être de plusieurs kilomètres et elles sont en général accessibles. Les fréquences de rupture de conduites dans des galeries et canaux n'ont fait l'objet d'aucune étude statistique et doivent être déterminées individuellement. La sécurité dépend entre autres du type d'utilisation et de l'accès de tiers.

Les *galeries* désignent des tunnels accessibles, en général réalisés par des mineurs, dotés d'un recouvrement plus ou moins important et d'une longueur variable.

Les *canaux* peuvent présenter une section transversale similaire à celle des galeries, mais sont toutefois des constructions réalisées à ciel ouvert, en général pour traverser des places et routes ou intégrées dans d'autres constructions enterrées. Les canaux sont en général moins longs que les galeries.

9.5.2 Arbre des causes et des événements pour les galeries

III. 17 Arbre des causes et des événements pour la rupture d'une installation de gaz naturel à haute pression dans une galerie



9.5.2.1. Effet d'une explosion

Dans le cas des galeries, on s'intéressera notamment aux pressions régnant aux portails étant donné que les galeries avec un recouvrement suffisant résistent aux pressions générées à l'intérieur et peuvent les transmettre jusqu'aux portails. La force des pressions dépend en principe du volume du mélange inflammable et du trajet parcouru. Les éléments déterminants sont alors, outre la géométrie et la rugosité de la galerie, l'emplacement de la fuite, la vitesse de la fuite, le sens et la vitesse du vent dans la galerie, l'emplacement de la source d'inflammation et le moment de l'inflammation.

Pour une galerie accessible typique présentant une section transversale d'env. 6 à 10 m² et une longueur de plusieurs centaines de mètres, cette combinaison permet d'envisager des pressions au portail de <1 bar à 20 bar.

Une estimation grossière peut être réalisée en formulant les hypothèses suivantes:

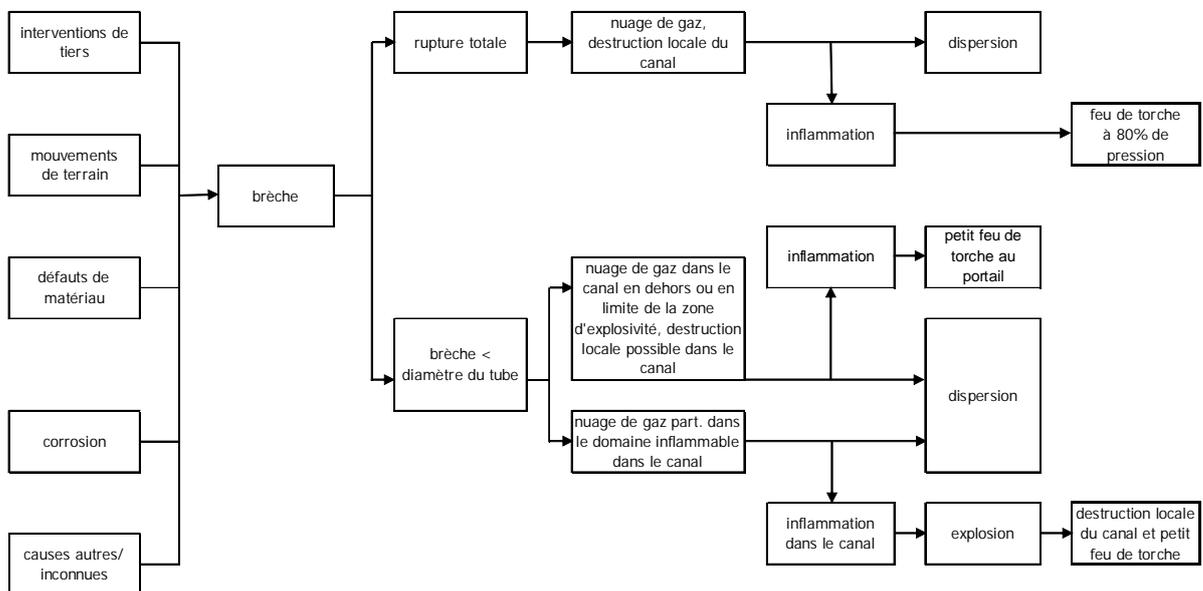
- Pour 99% de toutes les combinaisons dans le cas d'une fuite et d'une inflammation subséquente, les pressions d'explosion au portail ou au niveau d'un point faible déterminant le long de la galerie ou du canal seront < 3 bar. Dans ce cas, il convient éventuellement de mettre en œuvre des mesures constructives.
- La probabilité que des pressions nettement supérieures puissent être observées est <1%. Ces scénarios rares doivent malgré tout être pris en compte dans une étude de risque.

9.5.2.2. Rupture totale

Le feu de torche au portail est considéré de la même manière que le feu de torche pour les conduites de transport. On part du principe qu'aucune boule de feu ne se forme au portail de la galerie.

9.5.3 Arbre des causes et des événements pour les canaux

III. 18 Arbre des causes et des événements pour la rupture d'une installation de gaz naturel à haute pression dans un canal



9.5.3.1. Effets d'une explosion

Bien que construit en béton armé, un canal de transport n'est généralement pas conçu pour être particulièrement résistant à la pression et devrait se déchirer à une pression de 1 bar. Ainsi, en cas d'inflammation d'un mélange inflammable, il est détruit sur une certaine longueur, ce qui cause localement des projections de débris. La déflagration est suivie d'un incendie qui peut être alimenté uniquement dans la mesure de la dimension de la fuite (petite).

C'est l'environnement du canal, en particulier ses points faibles connus, qui déterminera si ce scénario est déterminant dans le sens de l'ordonnance sur les accidents majeurs.

9.5.3.2. Rupture totale

Lors de la rupture d'une conduite dans un canal, la structure peut être localement détruite par la pression du gaz s'échappant. La situation est alors comparable à celle d'une rupture dans une fouille enterrée. La dispersion rapide du gaz sur un tronçon de canal donné, et la destruction consécutive probable du canal sur ce même tronçon, rendent quasiment impossible la formation d'une boule de feu. De même, le feu de torche se développera en plusieurs points le long de la ligne de rupture.

Pour mettre en évidence l'accident majeur, si tant est que des points faibles de la construction ne laissent pas supposer un autre scénario, on recommande les éléments suivants:

- Boule de feu: aucune, uniquement feu de torche consécutif (calcul de la géométrie de flamme à 80% de la pression (calcul des fréquences de rupture à 100% de la pression)
- Feu de torche: calcul de la géométrie de flamme à 80% de la pression (calcul des fréquences de rupture à 100% de la pression)

10 Mesures de réduction du risque

Pour la prévention des accidents majeurs, il s'impose de planifier des mesures de protection sous forme de mesures ciblées de réduction du risque.

Des mesures de réduction du risque peuvent soit réduire la probabilité d'occurrence (fréquence de rupture, probabilité d'occurrence de l'incident), soit réduire l'ampleur des dommages d'un accident majeur sur l'installation de gaz naturel à haute pression, soit les deux.

L'effet de différentes mesures visant à réduire la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers est présenté dans le chapitre 9.2.5 (Facteurs de correction pour le calcul de la courbe cumulative).

Un abaissement de la pression (pression de service) entraîne une réduction de l'ampleur des dommages (Chap. 6.2.1.2) ainsi qu'une réduction du coefficient de conception et donc de la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers.

La réduction de l'ampleur des dommages avec l'effet protecteur de bâtiments normalisé est abordée dans le chapitre 6.2.1.2. D'autres mesures de réduction du risque dans l'environnement de l'installation de gaz naturel à haute pression (p. ex. mesures constructives sur des bâtiments situés dans la zone d'influence de l'installation de gaz naturel à haute pression) peuvent être prises en compte dans une situation donnée, en fonction de l'effet protecteur du bâtiment et des possibilités de fuite pour les personnes (Chap. 8.3: Objets particuliers: bâtiments).

La prise en compte d'autres mesures de réduction du risque (p. ex. mesures de protection constructives autour de la conduite) dans l'étude de risque s'effectue en accord avec les autorités compétentes.

Annexe:

Exemples de calcul

- A Zones résidentielles
- B Entreprises commerciales et artisanales, et routes
- C Train
- D Réservoirs tubulaires

A Exemple de calcul pour les habitations

A 1. Situation

Dans l'exemple de calcul choisi, on considère la situation suivante:

On prévoit de faire passer une conduite en bordure d'un lotissement. La conduite ne se trouve pas dans une zone à bâtir, mais une zone d'habitation se trouve dans la zone d'influence de cette conduite prévue.

Les caractéristiques techniques de la conduite prévue sont les suivantes:

Diamètre	12"
Diamètre extérieur	323.9 mm
Épaisseur de la paroi de la conduite	5.6 mm
Matériau de la conduite	StE 360.7
Pression maximale de service (MOP)	70 bar
Recouvrement	1.2 m
Année de construction	1980

III. A 1 Plan détaillé de la situation



A 2. Hypothèses d'occupation

- Dans la zone d'influence de la conduite prévue se trouve une zone d'habitation W2 (à 2 étages) comprenant des maisons individuelles et des immeubles.
- L'occupation est de 2 personnes par logement pour les immeubles et de 3 personnes par maison individuelle (cf. Chap. 7.2, p. 30).
- Facteurs de présence: cf. Tab. 12, Chap. 7.4, p. 32 (on considère p. ex. que les jours ouvrables (lu à ve), 30% des habitants sont présents en journée, dont 10% se trouvent à l'extérieur.)

A 3. Estimation de l'ampleur des dommages

Dans l'exemple des "habitations", des personnes sont surtout présentes simultanément pendant la nuit, le week-end; ce scénario est ainsi déterminant pour le profil de l'ampleur des dommages. Pour une rupture totale au point A (cf. III. A), on obtient ainsi:

Tab. A 1 Calcul de l'indice d'accident majeur pour le point A pour le scénario "Nuit de week-end" (scénario d'incendie de la boule de feu). Les rayons de létalité figurent dans l'A2 et dans l'A 3.

	Nombre de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R _{100 FE}	$1^k \times 0.01^l \times 8 P. = 0.08 P.$	1.00	0.08
entre R _{100 FE} et R _{75 FE}	0.03	0.85	0.03
entre R _{75 FE} et R _{50 FE}	0.22	0.60	0.13
entre R _{50 FE} et R _{25 FE}	0.33	0.35	0.12
entre R _{25 FE} et R _{0 FE}	0.75	0.10	0.08
<i>Nombre total de décès à l'air libre</i>			0.43

	Nombre de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans les bâtiments	Nb de décès dans des bâtiments
dans la zone R _{100 FA}	$1^k \times 0.99^m \times 16P. = 15.84P$	1.00	15.84
entre R _{100 FA} et R _{75 FA}	15.84	0.95	15.05
entre R _{75 FA} et R _{ZI FE}	0.00	0.80	0.00
entre R _{ZI FE} et R _{50 FA}	0.00	0.45	0.00
entre R _{50 FA} et R _{25 FA}	10.89	0.25	2.72
entre R _{25 FA} et R _{0 FA}	65.34	0.10	6.53
<i>Nombre total de décès dans des bâtiments</i>			40.14

Nombre total de décès pour la boule de feu

40.57

Indice d'accident majeur

$0.3 \times \log(40.57) = 0.48$

Le profil de l'ampleur des dommages pour l'ensemble du tronçon est calculé de la même manière que pour l'exemple ci-dessus; généralement, on calcule un indice d'accident majeur tous les 10 m (chap. 4, p. 15).

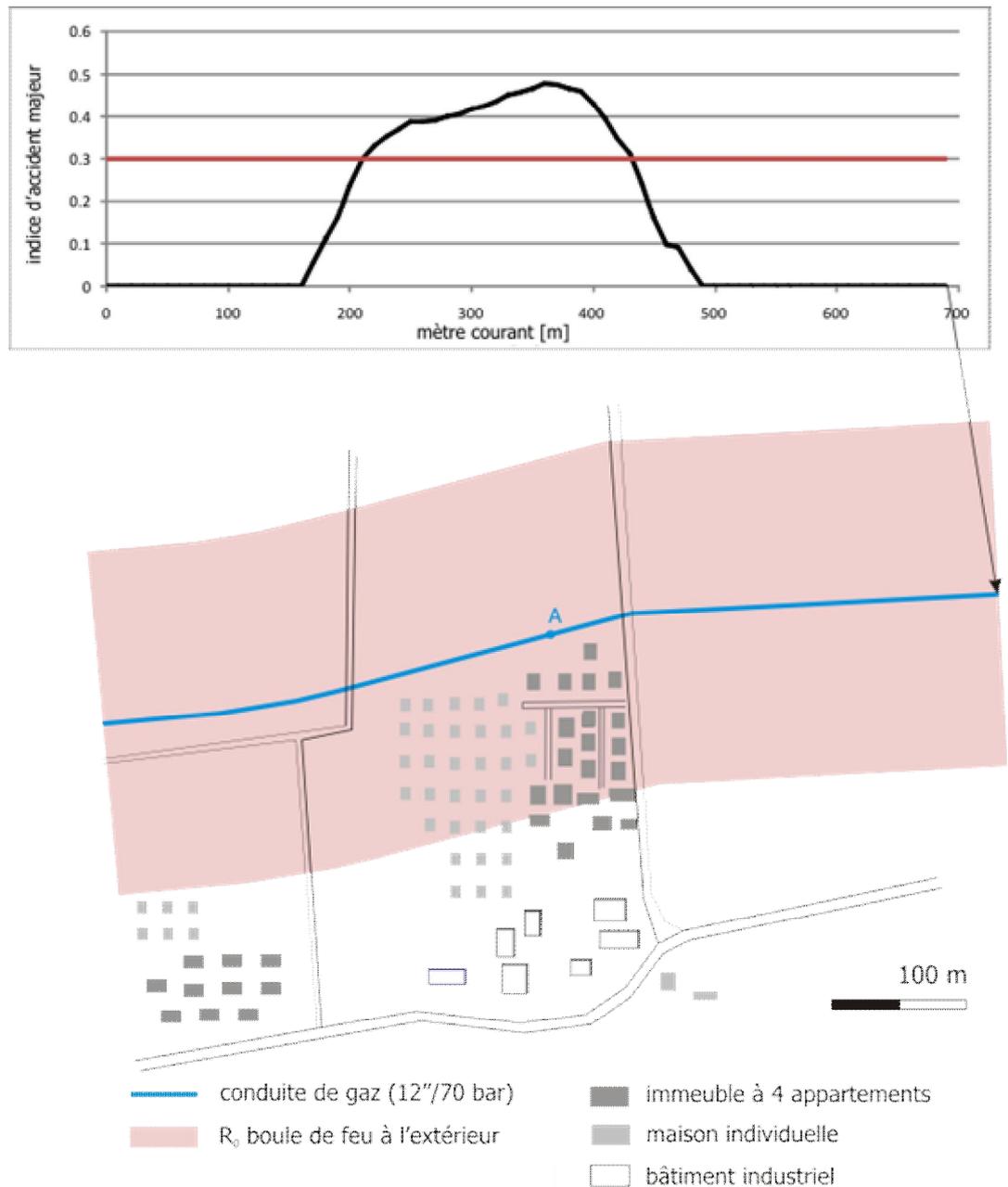
^k Personnes présentes = 100% des habitants;

^l Personnes à l'air libre = 1% des habitants présents;

^m Personnes dans des bâtiments = 99% des habitants présents (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p.31)

L'illustration suivante (III. A 2) montre l'ampleur des dommages de l'exemple calculé pour tout le tronçon.

III. A 2 Profil de l'ampleur des dommages



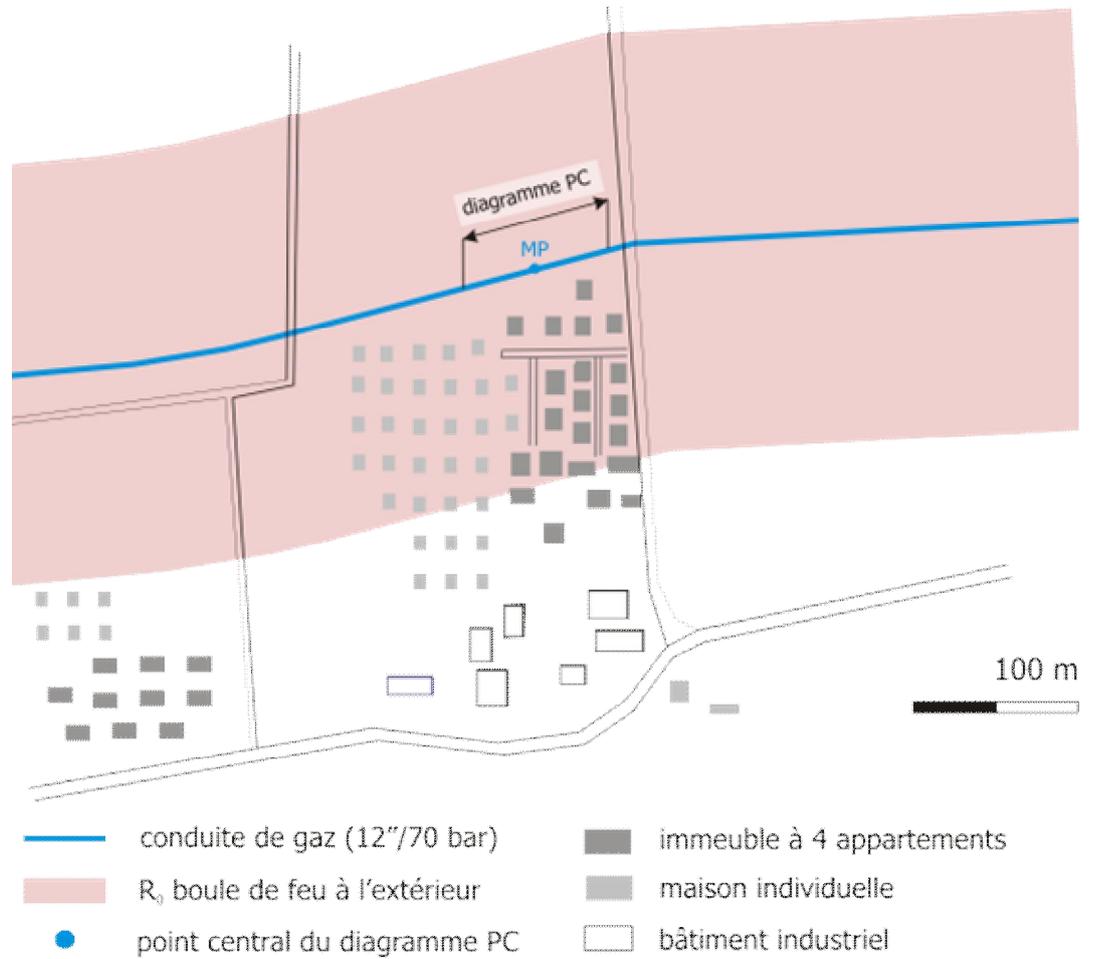
Etant donné que les indices d'accident majeur sont supérieurs à 0,3, une étude de risque (diagramme PC) doit être réalisée (chap. 5.3, p. 20).

A 4. Etude de risque (diagramme PC)

A 4.1. Identification des endroits à risque pertinents

Dans le présent exemple, le risque le plus important est obtenu sur le tronçon de diagramme PC suivant:

III. A 3 Plan détaillé pour le calcul du diagramme PC



A 4.2. Calcul de l'ampleur des dommages

Tab. A 2 Rayons de létalité (à partir du Tab. 7 et du Tab. 8) et létalités (à partir du Tab. 4) pour des personnes se trouvant à l'air libre après la rupture totale de la conduite 12"/70 bar

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀	
Boule de feu	9 s	130 m	95 m	80 m	65 m	55 m	
Feu de torche	30 s	100 m	65 m	50 m	40 m	35 m	
Létalité ⁿ		env.	10%	35%	60%	85%	100%

Tab. A 3 Rayons de létalité (à partir du Tab. 8) et létalités (à partir du Tab. 5 et du Tab. 6) pour des personnes se trouvant dans des bâtiments après la rupture totale de la conduite 12"/70 bar (FA = feu de torche, FE = boule de feu)

	R _{0 FA}	R _{25 FA}	R _{50 FA}	R _{ZI FE} ^o	R _{75 FA}	R _{100 FA}	R _{ZI FA} ^p
Rayons de létalité	100 m	65 m	50 m	45 m	40 m	35 m	15 m
Létalité pour une boule de feu suivie d'un feu de torche	env. 10%	25%	45%	80%	95%	100%	100%
Létalité pour un feu de torche	env. 0%	5%	10%	10%	35%	75%	100%

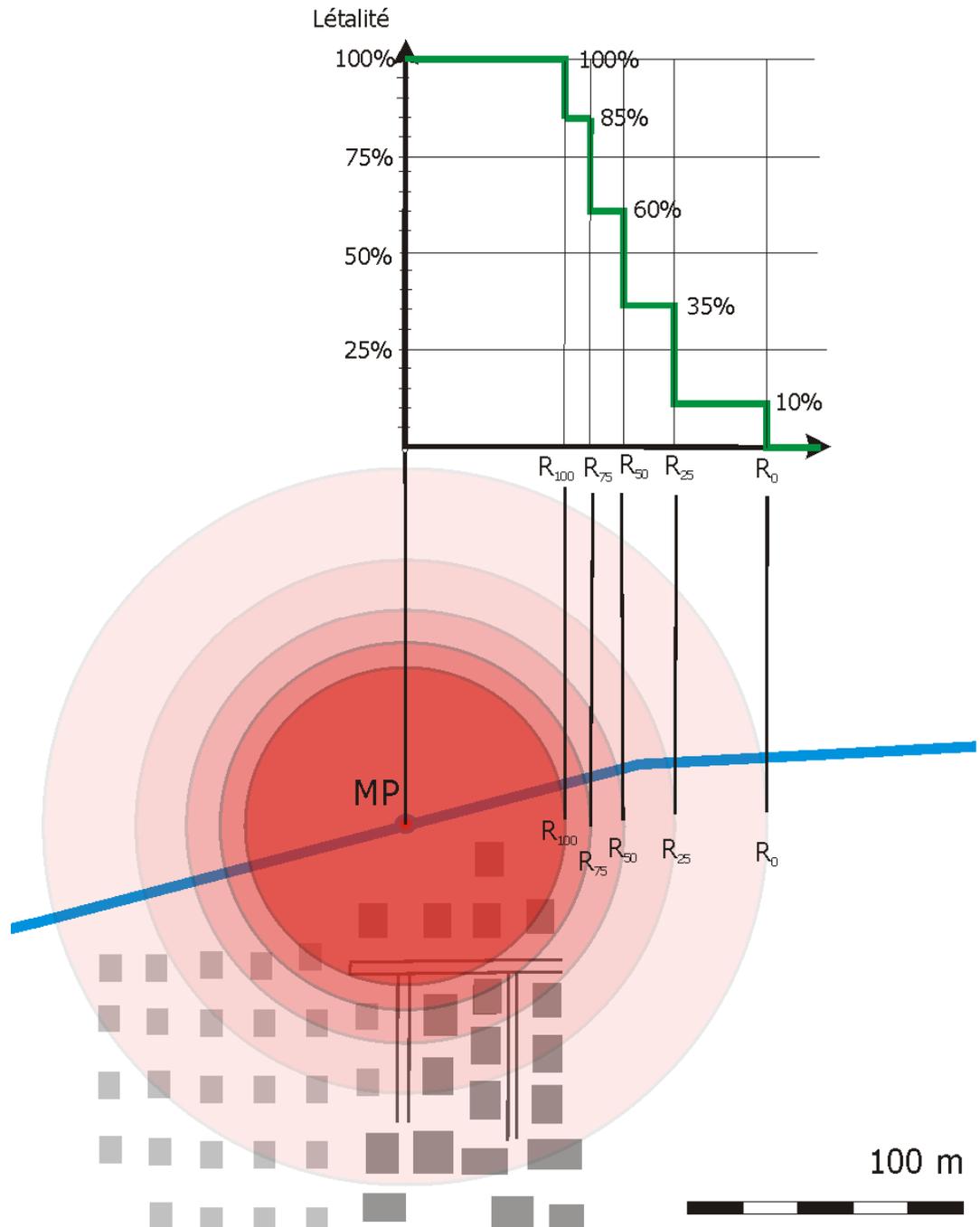
ⁿ Les létalités s'appliquent aux deux scénarios d'incendie (boule de feu et feu de torche)

^o Le rayon R_{ZI} Boule de feu marque la distance maximale, à partir du foyer de l'incendie, au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment s'enflamme pendant la durée de combustion de la boule de feu avec des fenêtres intactes.

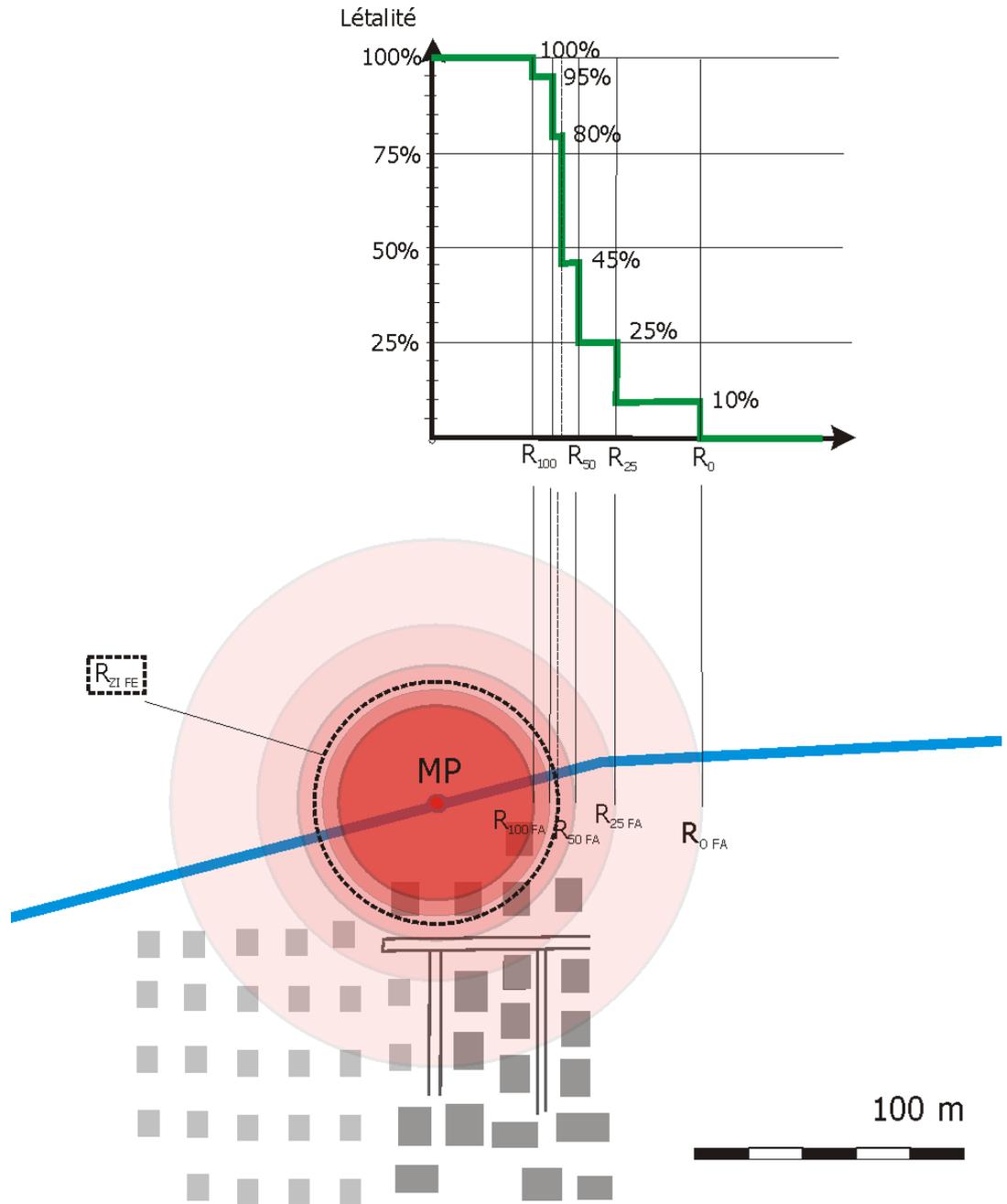
^p Le rayon R_{ZI} Feu de torche marque la distance maximale au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment prend feu en maximum 15 s, en présence d'un feu de torche et avec des fenêtres intactes.

Les illustrations suivantes présentent la corrélation entre les rayons de létalité et les létalités, dans le cas présent:

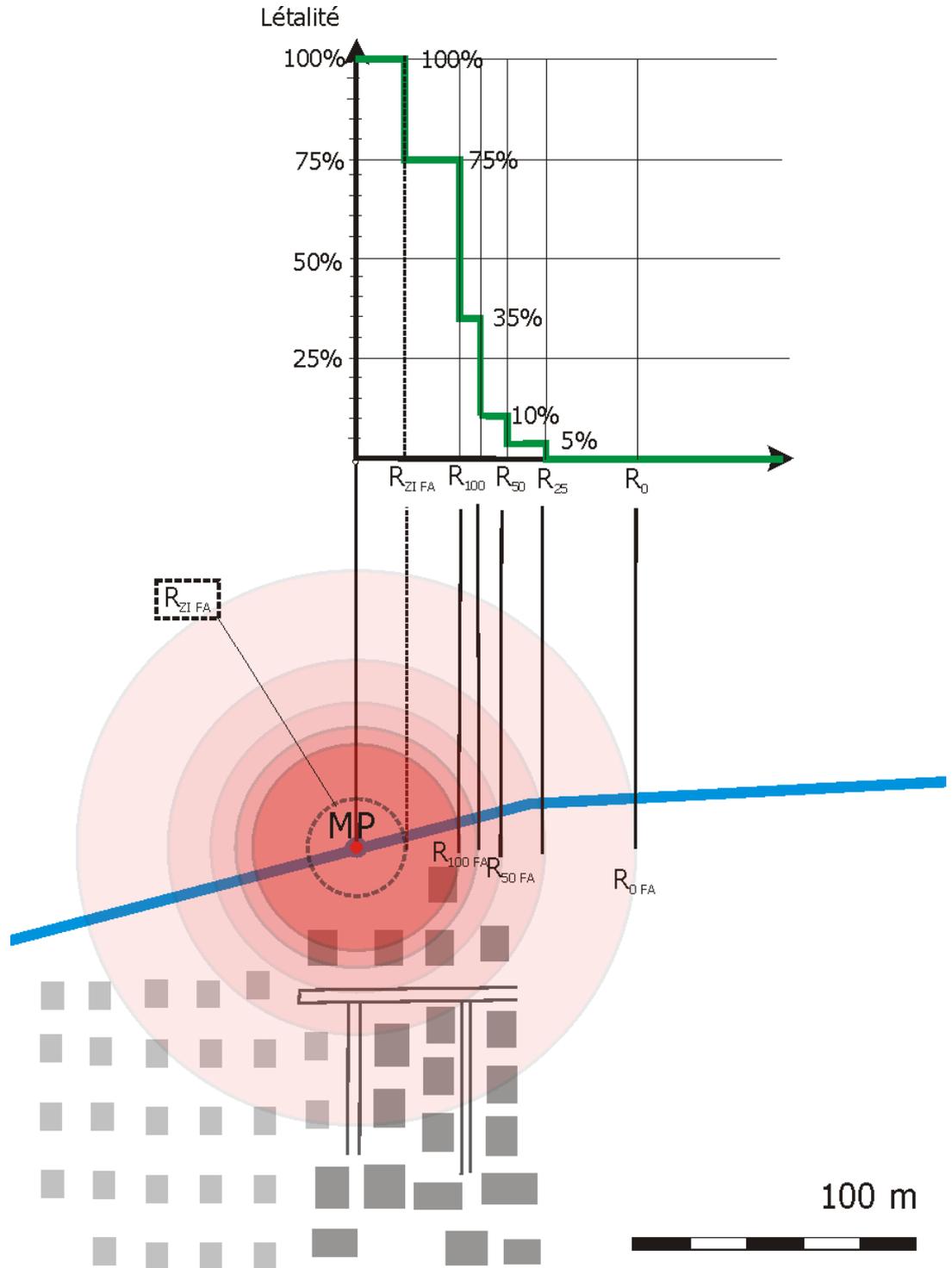
III. A 4 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant à l'air libre dans le cas d'une boule de feu suivie d'un feu de torche (dans l'exemple d'une conduite 12"/770 bar)



III. A 5 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le cas d'une boule de feu suivie d'un feu de torche (dans l'exemple d'une conduite 12"/70 bar)



III. A 6 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant dans des bâtiments dans le cas d'un feu de torche (dans l'exemple d'une conduite 12"/70 bar)



Dans l'exemple choisi, quatre scénarios sont déterminants: "Jour ouvrable en journée", "Jour ouvrable la nuit" (12 h chacun), ainsi que "Week-end en journée" et "Week-end la nuit". Les tableaux suivants illustrent les calculs des indices d'accident majeur dans l'exemple du point central (MP) du tronçon PC d'une longueur de 100 m (cf. III. A 3) pour les quatre scénarios "Jour ouvrable en journée / la nuit" et "Week-end en journée / la nuit".

L'ampleur des dommages pour les 9 autres points avec rupture totale dans le tronçon de 100 m est calculée de la même manière.

Tab. A 4 Calcul des indices d'accident majeur pour une rupture totale au niveau du point central MP, scénario "Jour ouvrable en journée" (lu-ve, 7-19h)

Feu de torche				Boule de feu			
	Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre		Nb de personnes à présente l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R _{100 FA}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16 P. = 0.48 P.$	1.00	0.48	dans la zone R _{100 FE}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 8 P. = 0.24 P.$	1.00	0.24
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16 P. = 0.48 P.$	0.85	0.41	entre R _{100 FE} et R _{75 FE}	0.09	0.85	0.08
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 0 P. = 0.0 P.$	0.60	0.00	entre R _{75 FE} et R _{50 FE}	0.66	0.60	0.40
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 11 P. = 0.33 P.$	0.35	0.12	entre R _{50 FE} et R _{25 FE}	0.99	0.35	0.35
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 66 P. = 1.98 P.$	0.10	0.02	entre R _{25 FE} et R _{0 FE}	2.25	0.10	0.23
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			1.20	<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			1.28
	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments		Nb de personnes présente dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{ZI FA}	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 0 P. = 0.48 P.$	1.00	0.00	dans la zone R _{100 FA}	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16 P. = 4.32 P.$	1.00	4.32
entre R _{ZI} et R _{100 FA}	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16 P. = 4.32 P.$	0.75	3.24	entre R _{100 FA} et R _{75 FA}	4.32	0.95	4.10
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	4.32	0.35	1.51	entre R _{75 FA} et R _{ZI FE}	0.00	0.80	0.00
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	0.00	0.10	0.00	entre R _{ZI FE} et R _{50 FA}	0.00	0.45	0.00
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	2.97	0.05	0.15	entre R _{50 FA} et R _{25 FA}	2.97	0.25	0.74
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	17.82	0.00	0.00	entre R _{25 FA} et R _{0 FA}	17.82	0.10	1.27
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			4.90	<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			10.95
Total des décès pour le feu de torche			6.10	Total des décès pour la boule de feu			12.23
Indice d'accident majeur dans le scénario du feu de torche			$0.3 \times \log(6.1) = 0.24$	Indice d'accident majeur dans le scénario de la boule de feu			$0.3 \times \log(12.23) = 0.33$

¹⁾ Personnes présentes = 30%; ²⁾ Personnes à l'air libre = 10%; ³⁾ Personnes dans des bâtiments = 90% (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p. 32)

Tab. A 5 Calcul des indices d'accident majeur pour le point central MP pour le scénario "Jour ouvrable la nuit" (Lu – Ve, 19 – 7h)

Feu de torche				Boule de feu			
	Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre		Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R _{100 FA}	$0.9^{1)} \times 0.01^{2)} \times 16P. = 0.14 P.$	1.00	0.14	dans la zone R _{100 FE}	$0.9^{1)} \times 0.01^{2)} \times 8 P. = 0.14 P.$	1.00	0.07
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	0.14	0.85	0.12	entre R _{100 FE} et R _{75 FE}	0.03	0.85	0.02
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	0.00	0.60	0.00	entre R _{75 FE} et R _{50 FE}	0.20	0.60	0.12
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	0.10	0.35	0.03	entre R _{50 FE} et R _{25 FE}	0.30	0.35	0.10
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	0.59	0.10	0.06	entre R _{25 FE} et R _{0 FE}	0.68	0.10	0.07
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			0.36	<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			0.39
	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments		Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans les bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{ZI FA}	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 0P. = 0.0 P.$	1.00	0.00	dans la zone R _{100 FA}	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 16P. = 14.26 P.$	1.00	14.26
entre R _{ZI} et R _{100 FA}	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 16P. = 14.26P.$	0.75	10.69	entre R _{100 FA} et R _{75 FA}	14.26	0.95	13.54
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	14.26	0.35	4.99	entre R _{75 FA} et R _{ZI FE}	0.00	0.80	0.00
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	0.00	0.10	0.00	entre R _{ZI FE} et R _{50 FA}	0.00	0.45	0.00
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	9.80	0.05	0.49	entre R _{50 FA} et R _{25 FA}	9.80	0.25	2.45
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	58.81	0.00	0.00	entre R _{25 FA} et R _{0 FA}	58.81	0.10	5.88
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			16.17	<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			36.13

Nombre total de décès pour le feu de torche

16.53

Nombre total de décès pour la boule de feu

36.52

Indice d'accident majeur feu de torche

 $0.3 \times \log(16.53) = 0.37$

Indice d'accident majeur boule de feu

 $0.3 \times \log(36.52) = 0.47$

¹⁾ Personnes présentes = 90%; ²⁾ Personnes à l'air libre = 1%; ³⁾ Personnes dans des bâtiments = 99% (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p. 32)

Tab. A 6 Calcul des indices d'accident majeur pour le point central MP pour le scénario "Week-end en journée" (Sa/Di, 7 – 19h)

Feu de torche

	Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R _{100 FA}	$0.6^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16P. = 0.96 P.$	1.00	0.96
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	0.96	0.85	0.82
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	0.00	0.60	0.00
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	0.66	0.35	0.23
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	3.96	0.10	0.4
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			2.4

	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{ZI FA}	$0.6^{1)} \times 0.9^{3)} \times 0P. = 0.0 P.$	1.00	0.00
entre R _{ZI} et R _{100 FA}	8.64	0.75	6.48
entre R ₁₀₀ et R _{75 FA}	8.64	0.35	3.02
entre R ₇₅ et R _{50 FA}	0.00	0.10	0.00
entre R ₅₀ et R _{25 FA}	5.94	0.05	0.30
entre R ₂₅ et R _{0 FA}	35.64	0.00	0.00
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			9.80

Nombre total de décès pour le feu de torche 12.20
 Indice d'accident majeur pour le scénario du feu de torche $0.3 \times \log(12.2) = 0.33$

Boule de feu

	Nb de personnes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R _{100 FE}	$0.6^{1)} \times 0.1^{2)} \times 8 P. = 0.48 P.$	1.00	0.48
entre R _{100 FE} et R _{75 FE}	0.18	0.85	0.15
entre R _{75 FE} et R _{50 FE}	1.32	0.60	0.79
entre R _{50 FE} et R _{25 FE}	1.98	0.35	0.69
entre R _{25 FE} et R _{0 FE}	4.50	0.10	0.45
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			2.57

	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans les bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{100 FA}	$0.6^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16P. = 8.64P.$	1.00	8.64
entre R _{100 FA} et R _{75 FA}	8.64	0.95	8.21
entre R _{75 FA} et R _{ZI FE}	0.00	0.80	0.00
entre R _{ZI FE} et R _{50 FA}	0.00	0.45	0.00
entre R _{50 FA} et R _{25 FA}	5.94	0.25	1.49
entre R _{25 FA} et R _{0 FA}	35.64	0.10	3.56
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			21.90

Nombre total de décès pour la boule de feu 24.47
 Indice d'accident majeur pour le scénario de la boule de feu $0.3 \times \log(24.47) = 0.42$

¹⁾ Personnes présentes = 60%; ²⁾ Personnes à l'air libre = 10%; ³⁾ Personnes dans des bâtiments = 90% (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p.32)

Tab. A 7 Calcul des indices d'accident majeur pour le point central MP pour le scénario "Week-end la nuit" (Sa/Di, 19 – 7h)

Feu de torche

	Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R ₁₀₀ FA	1 ¹⁾ x 0.01 ²⁾ x 16P. = 0,16P.	1.00	0.16
entre R ₁₀₀ et R ₇₅ FA	0.16	0.85	0.14
entre R ₇₅ et R ₅₀ FA	0.00	0.60	0.00
entre R ₅₀ et R ₂₅ FA	0.11	0.35	0.04
entre R ₂₅ et R ₀ FA	0.66	0.10	0.07
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			0.4

	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{ZI} FA	1 ¹⁾ x 0.99 ³⁾ x 0P. = 0.0 P.	1.00	0.00
entre R _{ZI} et R ₁₀₀ FA	15.84	0.75	11.88
entre R ₁₀₀ et R ₇₅ FA	15.84	0.35	5.54
entre R ₇₅ et R ₅₀ FA	0.00	0.10	0.00
entre R ₅₀ et R ₂₅ FA	10.89	0.05	0.54
entre R ₂₅ et R ₀ FA	65.34	0.00	0.00
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			17.97

Nombre total de décès pour le feu de torche 18.37
 Indice d'accident majeur feu de torche $0.3 \times \log(18.37) = 0.38$

Boule de feu

	Nb de personnes à présente l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R ₁₀₀ FE	1 ¹⁾ x 0.01 ²⁾ x 8 P. = 0.08 P.	1.00	0.08
entre R ₁₀₀ FE et R ₇₅ FE	0.03	0.85	0.03
entre R ₇₅ FE et R ₅₀ FE	0.22	0.60	0.13
entre R ₅₀ FE et R ₂₅ FE	0.33	0.35	0.12
entre R ₂₅ FE et R ₀ FE	0.75	0.10	0.08
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			0.43

	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans les bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R ₁₀₀ FA	1 ¹⁾ x 0.99 ³⁾ x 16P. = 15.84P	1.00	15.84
entre R ₁₀₀ FA et R ₇₅ FA	15.84	0.95	15.05
entre R ₇₅ FA et R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
entre R _{ZI} FE et R ₅₀ FA	0.00	0.45	0.00
entre R ₅₀ FA et R ₂₅ FA	10.89	0.25	2.72
entre R ₂₅ FA et R ₀ FA	65.34	0.10	6.53
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			40.14

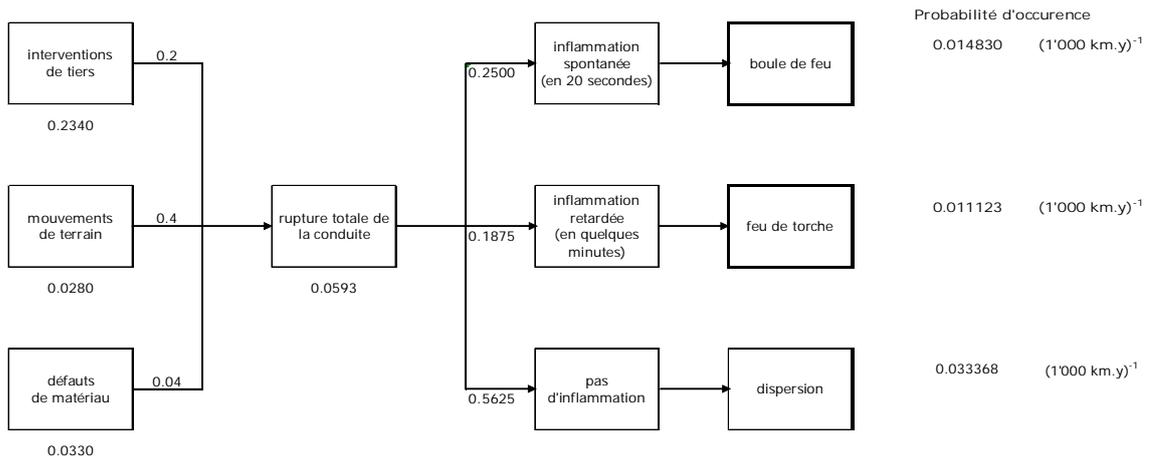
Nombre total de décès pour la boule de feu 40.57
 Indice d'accident majeur pour boule de feu $0.3 \times \log(40.57) = 0.48$

¹⁾ Personnes présentes = 100%; ²⁾ Personnes à l'air libre = 1%; ³⁾ Personnes dans des bâtiments = 99% (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p.32)

A 4.3. Calcul des probabilités d'occurrence

III. A 7 Arbre des causes et des événements selon l'III. 12 (p. 49) de la conduite 12"/70 bar donnée en exemple, épaisseur de la paroi 5.6 mm, année de construction 1980

Rupture totale



La fréquence de rupture totale peut être calculée à partir des caractéristiques indiquées:

	Fréquence de rupture (1'000 km.yr) ⁻¹	Facteur de correction	Proportion de ruptures totales	Ruptures totales (1'000 km.yr) ⁻¹
Interventions de tiers	0.260 ^q	0.9 ^r	0.2	0.0468
Mouvements de terrain	0.028 ^s	--	0.4	0.0112
Défauts de matériau	0.033 ^t	--	0.04	0.0013
Total				0.0593

^q Conformément au Tab. 17 (interventions de tiers), pour une épaisseur de la paroi de 5.6 mm

^r Voir la détermination du facteur de correction (chap. A 4.3)

^s Conformément au Tab. 19 (mouvements de terrain), pour un diamètre de 12"

^t Conformément au Tab. 20 (défauts de matériau), pour une construction en 1980

Détermination du facteur de correction

La fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers doit être corrigée à l'aide des facteurs de correction suivants:

1. Facteur de correction: facteur de design (K_{DF})

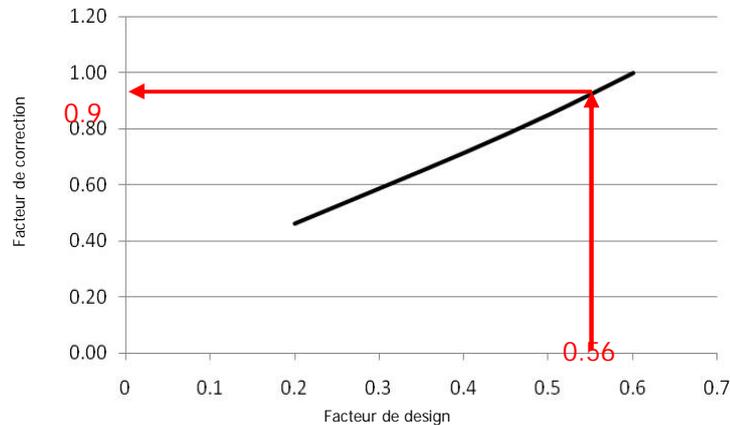
Dans cet exemple de calcul, le coefficient de conception peut être calculé comme suit (équation dans les définitions des notions):

$$f_0 = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 323.9}{20 \times 360 \times 5.6} = 0.56$$

avec

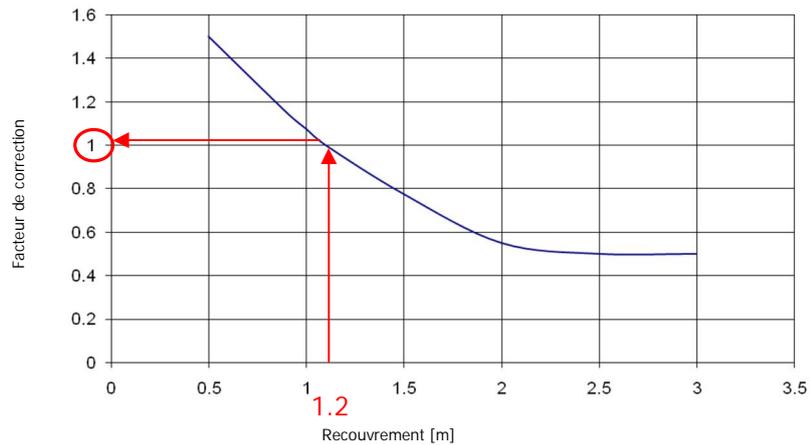
- s = épaisseur de la paroi [mm]
- P_d = pression de calcul [bar]
- D_a = diamètre extérieur de conduite [mm]
- f_0 = coefficient de conception (= facteur de design) ---
- $R_{t0,5}$ = limite élastique (valeur minimale) [N/mm²]

La graphique suivant donne le facteur de réduction du coefficient de conception 0,56 sur la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers: 0.9.



2. Facteur de correction: recouvrement (K_U)

Dans cet exemple, le recouvrement est égal à 1.2 m. Conformément à l'illustration suivante, le facteur de correction est égal à 1 pour un recouvrement de 1.2 m (c.-à-d. aucune correction).



3. Facteur de correction: plaques de protection (K_{S-W}) = 1 (pas de plaque de protection)

4. Facteur de correction: contrôles du tracé (K_T) = 1 (contrôles bimensuels)

Le facteur de correction total est calculé au moyen de l'équation suivante et est égal dans le cas présent à:

$$K_{\text{Total}} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.9 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.9$$

A 4.4. Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque

On présente ci-après le calcul des probabilités pour les différents scénarios de dommages pour le point central du PC (MP):

Période (scénario d'occupation)	Scénario d'incendie	Indice d'accident majeur au point MP	Probabilité d'occurrence [10 m·y] ⁻¹	Probabilité de séjour de personnes ^u	Probabilité par an ^v
Jour ouvrable en journée	Boule de feu	0.33	1.48×10^{-7}	0.36	5.33×10^{-8}
Jour ouvrable la nuit	Boule de feu	0.47	1.48×10^{-7}	0.36	5.33×10^{-8}
Week-end en journée	Boule de feu	0.42	1.48×10^{-7}	0.14	2.07×10^{-8}
Week-end la nuit	Boule de feu	0.48	1.48×10^{-7}	0.14	2.07×10^{-8}
Jour ouvrable en journée	Feu de torche	0.24	1.11×10^{-7}	0.36	4.00×10^{-8}
Jour ouvrable la nuit	Feu de torche	0.37	1.11×10^{-7}	0.36	4.00×10^{-8}
Week-end en journée	Feu de torche	0.33	1.11×10^{-7}	0.14	1.55×10^{-8}
Week-end la nuit	Feu de torche	0.38	1.11×10^{-7}	0.14	1.55×10^{-8}

Pour tous les points (tous les 10 m), on calcule les indices d'accident majeur de la même manière, avec la probabilité d'occurrence correspondante.

Les probabilités sont cumulées en commençant par l'indice d'accident majeur le plus élevé et sont représentées dans le diagramme PC.

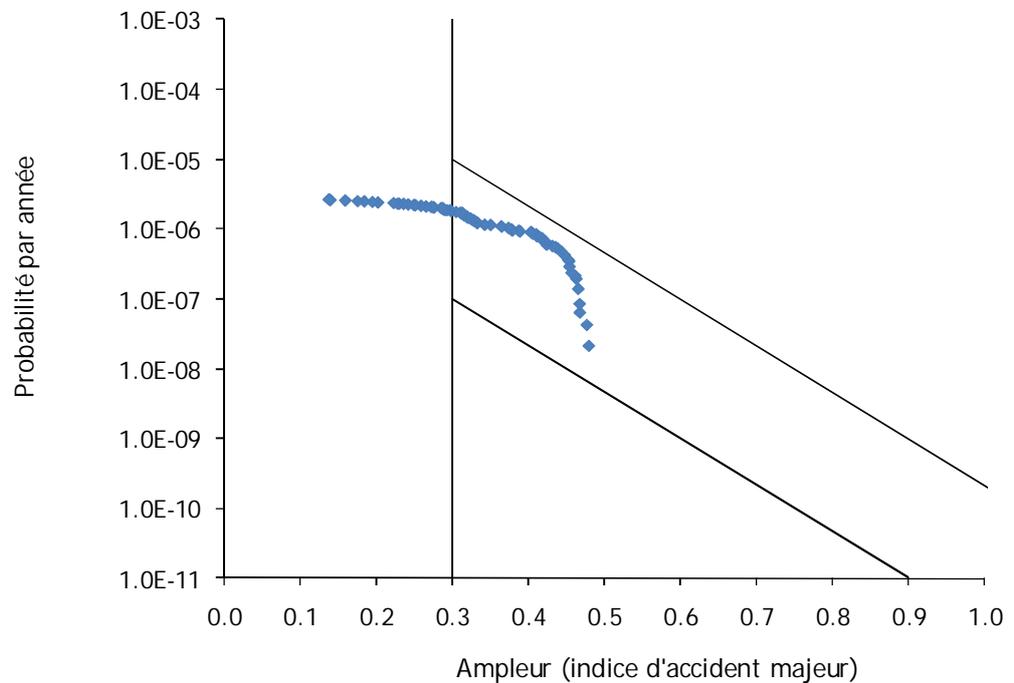
^u Part de la période (scénario d'occupation) sur la période totale

^v La probabilité d'un scénario de dommages se calcule en multipliant la probabilité d'occurrence (cf. paragraphe précédent) par la probabilité du scénario d'occupation (cf. les hypothèse d'occupation).

Tab. A 8 Indices d'accidents majeurs avec probabilité cumulées

Indice d'accident majeur	Probabilité	Probabilité cumulée
0.48	2.1×10^{-8}	2.1×10^{-8}
0.48	2.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}
0.47	2.1×10^{-8}	6.3×10^{-8}
0.47	2.1×10^{-8}	8.4×10^{-8}
0.47	5.3×10^{-8}	1.4×10^{-7}
0.46	5.3×10^{-8}	1.9×10^{-7}
...	...	
...	...	
0.14	4.0×10^{-8}	2.7×10^{-6}
0.14	4.0×10^{-8}	2.7×10^{-6}

III. A 8 Diagramme PC de l'exemple de calcul d'une zone de résidentielle, conduite: 12"/70 bar, épaisseur de la paroi 5.6 mm, recouvrement 1.2 m



B Exemple de calcul pour les entreprises commerciales et artisanales, et les routes

B 1. Situation

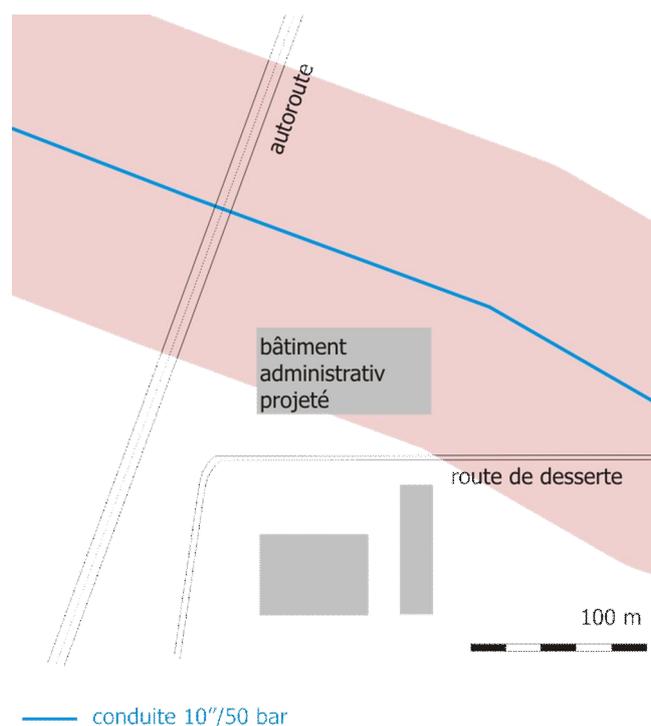
Dans l'exemple de calcul choisi, on considère la situation suivante:

Le tracé d'une conduite borde une zone industrielle, mais ne se trouve pas dans une zone à bâtir. Dans la zone d'influence de la conduite est prévu un nouvel immeuble de bureaux.

Les caractéristiques techniques de la conduite sont les suivantes:

Diamètre	10"
Épaisseur de la paroi de la conduite	5 mm
Diamètre extérieur	273 mm
Matériau de la conduite	StE 360.7
Pression maximale de service (MOP)	50 bar
Recouvrement	2 m
Année de construction	1970

III. B 1 Plan de situation



B 2. Hypothèses d'occupation

B 2.1. Occupation des personnes pour les entreprises commerciales et artisanales

Le chapitre 7.3 décrit la manière dont sont formulées les hypothèse d'occupation pour les entreprises commerciales et artisanales, l'industrie et les services. Dans le présent exemple de calcul, le bâtiment situé dans la zone d'influence de la conduite est une entreprise de services employant un grand nombre de personnes (immeuble de bureaux), avec env. 250 personnes.

Les facteurs de présence pour la population active figurent dans le tableau des facteurs de présence au chapitre 7.4. Les jours ouvrables (lundi au vendredi), 80% de la population active est considérée comme étant présente en journée, dont 10% à l'extérieur.

B 2.2. Occupation des personnes pour le trafic routier basé sur le TJM

Dans la zone d'influence se trouve un tronçon d'autoroute avec comptage automatique de la circulation. Le trafic journalier moyen (TJM) s'élève à 50'239 véhicules.

Les hypothèse d'occupation pour le trafic routier sont formulées conformément au chapitre 8.1 (p. 34 et suivantes). Le trafic de jour normal (trafic horaire entre 6 et 22 h) s'élève à 5.8% du TJM et le trafic de nuit (trafic horaire moyen par tronçon de route) à 0.9% du TJM. Pour considérer les mêmes plages horaires que pour les entreprises commerciales et artisanales, on peut également déterminer le trafic entre 7 et 19 h ou entre 19h et 7 h. Pour cet exemple de calcul, on obtient ainsi l'occupation suivante pour le trafic routier:

Tab. B 1 Hypothèse d'occupation pour le trafic routier

Scénario	Fréquence du trafic	Occupation	Durée	Probabilité
En journée (7 – 19 h)	Trafic de jour = 6.7% TJM = 3'366 véh./h Trafic de jour par sens de circulation = 3'366/2 = 1'683 Fz/h v = 100 km/h Distance moyenne entre 2 véhicules par sens de circulation, D _F : $D_F = \frac{v}{N} = \frac{100}{1'683} = 0.060 \text{ km}$ 1 véhicule. tous les 60 m dans chaque sens ^w	1.5 p./véh.	12h/jour	0.5

^w Distance entre les véhicules = Vitesse / Fréquence du trafic

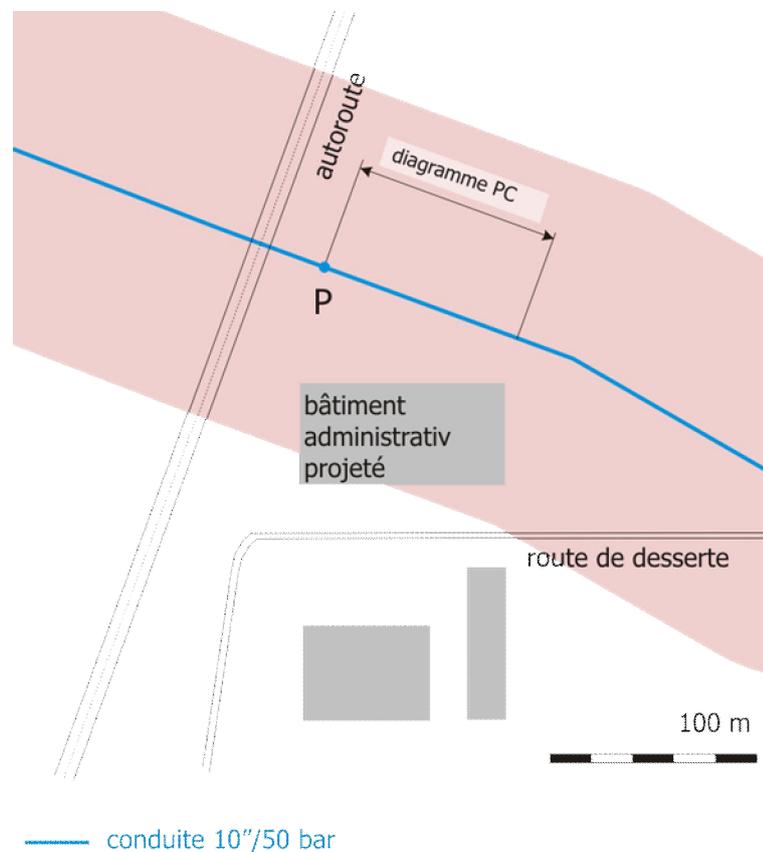
Scénario	Fréquence du trafic	Occupation	Durée	Probabilité
La nuit (19 – 7 h)	Trafic de nuit = 1.6% TJM = 804 véh./h Trafic de nuit par sens de circulation = $804/2 = 402 \text{ Fz/h}$ $v = 100 \text{ km/h}$ Distance moyenne entre 2 véhicules par sens de circulation, D_F : $D_F = \frac{v}{N} = \frac{100}{402} = 0.249 \text{ km}$ 1 véhicule. tous les 249 m dans chaque sens	1.5 p./véh.	12 h/jour	0.5

B 3. Etude de risque (diagramme PC)

B 3.1. Identification des endroits à risque pertinents

Dans l'exemple choisi, la modification de la situation à risque par l'immeuble de bureaux prévu doit être évaluée. Ainsi, le tronçon du diagramme PC doit être choisi de manière à ce que l'influence de l'immeuble de bureaux prévu soit maximale. Le tronçon est légèrement décalé en direction de l'autoroute, car c'est à cet endroit que l'on atteint les indices d'accident majeur les plus élevés en raison de l'influence commune de l'immeuble de bureaux prévu et du trafic sur l'autoroute.

III. B 2 Plan détaillé pour le calcul du diagramme PC



B 3.2. Calcul de l'ampleur des dommages

Pour calculer les indices d'accident majeur, il convient tout d'abord de déterminer les rayons de létalité et les facteurs de létalité. Les rayons de létalité sont indiqués dans le Tab. 7 et le Tab. 8.

Les facteurs de létalité à l'intérieur des rayons de létalité pour des personnes se trouvant à l'air libre sont reportés dans le Tab. 4 et dans le Tab. 5, et dans le Tab. 6 pour des personnes se trouvant dans des bâtiments.

Tab. B 2 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant à l'air libre après la rupture totale de la conduite 10''/50 bar

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀	
Boule de feu	7 s	90 m	65 m	50 m	45 m	35 m	
Feu de torche	30 s	70 m	45 m	35 m	30 m	25 m	
Létalité ^x	env.		10%	35%	60%	85%	100%

^x Les létalités s'appliquent aux deux scénarios d'incendie (boule de feu et feu de torche)

Tab. B 3 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant dans le bâtiment après la rupture totale de la conduite 10"/50 bar (FA = feu de torche, FE = boule de feu)

	$R_{0\text{ FA}}$	$R_{25\text{ FA}}$	$R_{50\text{ FA}}$	$R_{Z1\text{ FE}}^y$	$R_{75\text{ FA}}$	$R_{100\text{ FA}}$	$R_{Z1\text{ FA}}^z$
Rayons de létalité	70 m	45 m	35 m	30 m	30 m	25 m	10 m
Létalité d'une boule de feu suivie d'un feu de torche	env. 10%	25%	45%	----	95%	100%	100%
Létalité d'un feu de torche	env. 0%	5%	10%	----	35%	75%	100%

Dans l'exemple choisi, on a calculé les quatre scénarios "Jour ouvrable en journée", "Jour ouvrable la nuit" (12 heures chacun) ainsi que "Week-end en journée" et "Week-end la nuit". Etant donné que, dans le présent exemple, seuls les entreprises commerciales et artisanales et le trafic se trouvent dans la zone d'influence, seul le scénario "Jour ouvrable en journée" est déterminant. Le tableau suivant illustre les calculs des indices d'accident majeur dans l'exemple du point de départ (P) du tronçon PC d'une longueur de 100 m (cf. III. B 2) pour un jour ouvrable en journée.

L'ampleur des dommages pour les 9 autres points est calculée de la même manière

^y Le rayon R_{Z1} Boule de feu marque la distance maximale, à partir du foyer de l'incendie, au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment s'enflamme pendant la durée de combustion de la boule de feu, les fenêtres étant intactes.

^z Le rayon R_{Z1} Feu de torche marque la distance maximale au sein de laquelle l'intérieur du bâtiment prend feu en maximum 15 s, en présence d'un feu de torche et avec des fenêtres intactes.

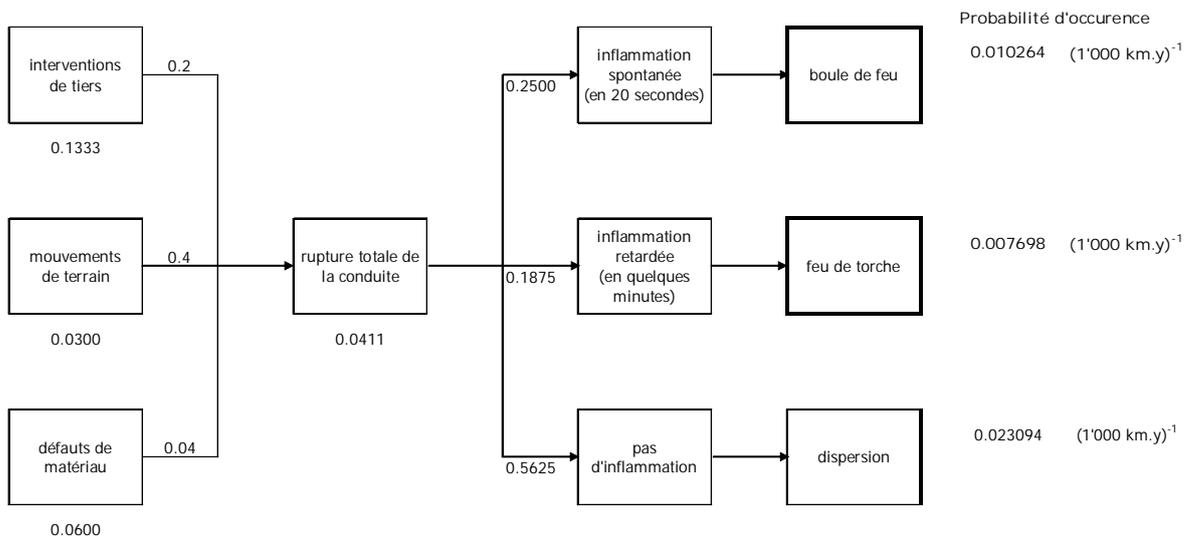
Tab. B 4 Calcul des indices d'accident majeur pour le point P (cf. III. B 2), pour le scénario "Jour ouvrable en journée" (Lu – Ve, 7 – 19 h)

Feu de torche				Boule de feu			
	Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre		Nb de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nb de décès à l'air libre
dans la zone R ₁₀₀ FA	$0.81^1 \times 0.1^{2)} \times 0 P.= 0.0 P.$	1.00	0.00	dans la zone R ₁₀₀ FE	$0.81^1 \times 0.1^{2)} \times 20P.= 1.6P.$	1.00	1.60
entre R ₁₀₀ et R ₇₅ FA	0.00	0.85	0.00	entre R ₁₀₀ FE et R ₇₅ FE	0.00	0.85	0.00
entre R ₇₅ et R ₅₀ FA	1.60	0.60	0.96	entre R ₇₅ FE et R ₅₀ FE	2.40	0.60	1.44
entre R ₅₀ et R ₂₅ FA	1.60	0.35	0.56	entre R ₅₀ FE et R ₂₅ FE	4.80	0.35	1.68
entre R ₂₅ et R ₀ FA	8.00	0.10	0.80	entre R ₂₅ FE et R ₀ FE	8.80	0.10	0.88
<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			2.32	<i>Total pour les personnes à l'air libre</i>			5.60
	Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments		Nb de personnes présentes dans des bâtiments	Létalité dans les bâtiments	Nb de décès dans les bâtiments
dans la zone R _{ZI} FA	$0.81^1 \times 0.9^{3)} \times 0P.= 0.0P$	1.00	0.00	dans la zone R ₁₀₀ FA	$0.81^1 \times 0.9^{3)} \times 20P.= 0.0P.$	1.00	0.00
entre R _{ZI} et R ₁₀₀ FA	0.00	0.75	0.00	entre R ₁₀₀ FA et R ₇₅ FA	0.00	0.95	0.00
entre R ₁₀₀ et R ₇₅ FA	0.00	0.35	0.00	entre R ₇₅ FA et R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
entre R ₇₅ et R ₅₀ FA	14.40	0.10	1.44	entre R _{ZI} FE et R ₅₀ FA	14.40	0.45	6.48
entre R ₅₀ et R ₂₅ FA	14.40	0.05	0.72	entre R ₅₀ FA et R ₂₅ FA	14.40	0.25	3.60
entre R ₂₅ et R ₀ FA	72.00	0.00	0.00	entre R ₂₅ FA et R ₀ FA	72.00	0.10	7.20
<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			2.16	<i>Total pour les personnes dans des bâtiments</i>			17.28
Nombre total de décès pour le feu de torche			4.48	Nombre total de décès pour la boule de feu			22.80
Indice d'accident majeur feu de torche			$0.3 \times \log(4.48) = 0.20$	Indice d'accident majeur boule de feu			$0.3 \times \log(22.8) = 0.41$

¹⁾ Personnes présentes = 80% de la population active totale; ²⁾ Personnes à l'air libre = 10%; ³⁾ Personnes dans des bâtiments = 90% (conformément aux facteurs de présence Tab. 12, p. 32)

B 3.3. Calcul des probabilités d'occurrence

III. B 3 Arbre des causes et des événements selon l'III. 12 (p. 49) pour la conduite 10"/50 bar donnée en exemple, épaisseur de la paroi de 5 mm, année de construction 1970, coefficient de conception 0.38



La fréquence de rupture totale (fréquence de rupture x facteur de correction x proportion de ruptures totales) peut être calculée à partir des caractéristiques indiquées :

	Fréquence de rupture ¹⁾ [1'000 km.yr] ⁻¹	Facteur de correction	Proportion de ruptures totales	Ruptures totales [1'000 km.yr] ⁻¹
Interventions de tiers	0.34 ^{aa}	0.392 ^{bb}	0.2	0.0267
Mouvements de terrain	0.030 ^{cc}	--	0.4	0.0120
Défauts de matériau	0.060 ^{dd}	--	0.04	0.0024
Total				0.0411

^{aa} Conformément au Tab. 17 (interventions de tiers), pour une épaisseur de la paroi de 5 mm

^{bb} Voir la détermination du facteur de correction

^{cc} Conformément au Tab. 19 (mouvements de terrain), pour un diamètre de 10"

^{dd} Conformément au Tab. 20 (défauts de matériau), pour une construction en 1970

Détermination du facteur de correction

La fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers doit être corrigée à l'aide des facteurs de correction suivants:

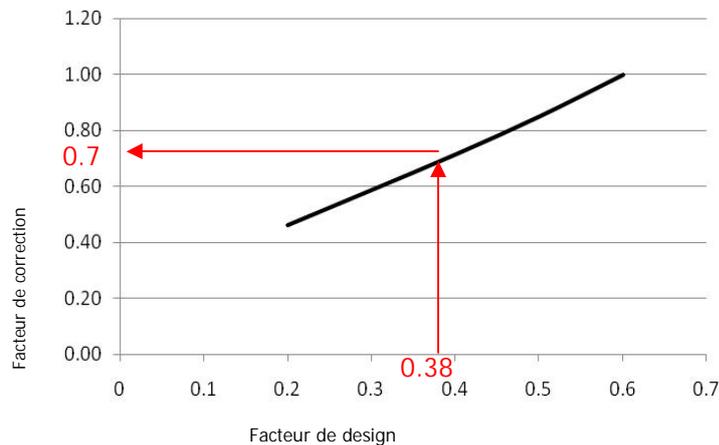
1. Facteur de correction: facteur de design (K_{DF})

Pour cet exemple de calcul, le facteur de design peut être calculé comme suit (équation dans les définitions des notions):

$$f_0 = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{50 \times 273}{20 \times 360 \times 5} = 0.38$$

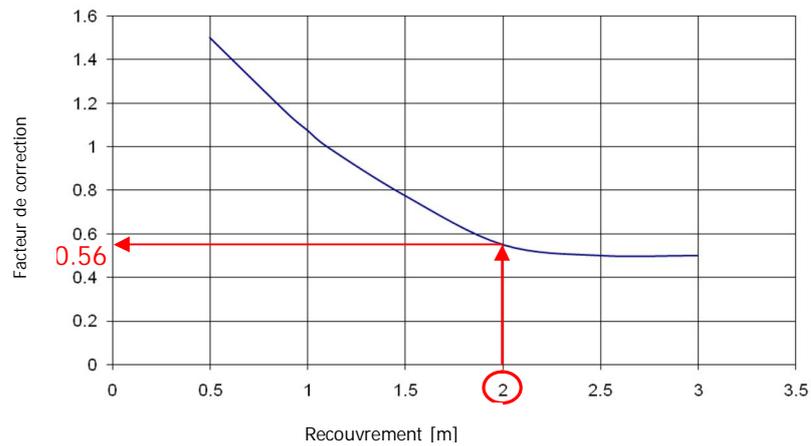
avec	s =	épaisseur de la paroi	[mm]
	P_d =	pression de calcul	[bar]
	D_a =	diamètre extérieur de conduite	[mm]
	f_0 =	coefficient de conception (= facteur de design)	---
	$R_{t0,5}$ =	limite élastique (valeur minimale)	[N/mm ²]

Le graphique suivant donne le facteur de réduction sur la fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers: env. 0.7.



2. Facteur de correction: recouvrement (K_U)

Dans cet exemple, le recouvrement est égal à 2 m. Conformément à l'illustration suivante, le facteur de correction est égal à env. 0.56 pour un recouvrement de 2 m.



3. Facteur de correction: plaques de protection (K_{S-W}) = 1 (pas de plaque de protection)

4. Facteur de correction: contrôles du tracé (K_T) = 1 (contrôles bimensuels)

Le facteur de correction total est calculé au moyen de l'équation suivante et est égal, dans le cas présent, à:

$$K_{\text{Total}} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.7 \times 0.56 \times 1 \times 1 = 0.392$$

B 3.4. Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque

On présentera ci-après le calcul des probabilités pour les différents scénarios de dommages par tronçon de 10 m et par an pour le point MP:

Période (scénario d'occupation)	Scénario d'incendie	Indice d'accident majeur au point P	Probabilité d'occurrence [10 m·y] ⁻¹	Probabilité de séjour Scénario d'occupation ^{ee}	Probabilité par an ^{ff}
Jour ouvrable en journée	Boule de feu	0.41	1.03×10^{-7}	0.36	3.70×10^{-8}
Jour ouvrable la nuit	Boule de feu	0.03	1.03×10^{-7}	0.36	3.70×10^{-8}
Week-end en journée	Boule de feu	0.04	1.03×10^{-7}	0.14	1.44×10^{-8}
Week-end la nuit	Boule de feu	0.00	1.03×10^{-7}	0.14	1.44×10^{-8}
Jour ouvrable en journée	Feu de torche	0.20	7.70×10^{-8}	0.36	2.77×10^{-8}
Jour ouvrable la nuit	Feu de torche	0.00	7.70×10^{-8}	0.36	2.77×10^{-8}
Week-end en journée	Feu de torche	0.00	7.70×10^{-8}	0.14	1.08×10^{-8}
Week-end la nuit	Feu de torche	0.00	7.70×10^{-8}	0.14	1.08×10^{-8}

Les probabilités sont cumulées en commençant par l'indice d'accident majeur le plus élevé et sont représentées dans le diagramme PC.

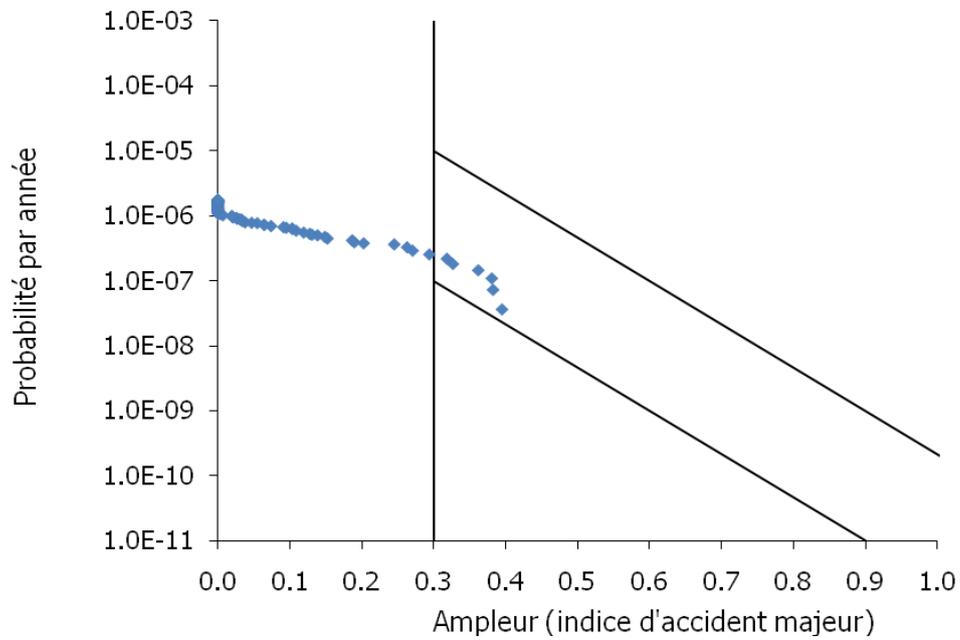
Tab. B 5 Indices d'accident majeur avec probabilité cumulée

Indice d'accident majeur	Probabilité	Probabilité cumulée
0.40	3.7×10^{-8}	3.7×10^{-8}
0.38	3.7×10^{-8}	7.4×10^{-8}
0.38	3.7×10^{-8}	1.1×10^{-7}
0.36	3.7×10^{-8}	1.5×10^{-7}
0.33	3.7×10^{-8}	1.8×10^{-7}
0.32	3.7×10^{-8}	2.2×10^{-7}
...
0	1.1×10^{-8}	1.8×10^{-6}
0	1.1×10^{-8}	1.9×10^{-6}

^{ee} Part de la période (scénario d'occupation) à la durée totale

^{ff} La probabilité d'un scénario de dommages se calcule en multipliant la probabilité d'occurrence (cf. paragraphe précédent) par la probabilité du scénario d'occupation (cf. les hypothèses d'occupation).

- III. B 4 Diagramme PC de l'exemple de calcul pour les entreprises commerciales et artisanales et le trafic, caractéristiques de la conduite: 10"/50 bar, épaisseur de la paroi 5 mm, recouvrement 2 m



C Exemple de calcul pour le train

C 1. Situation

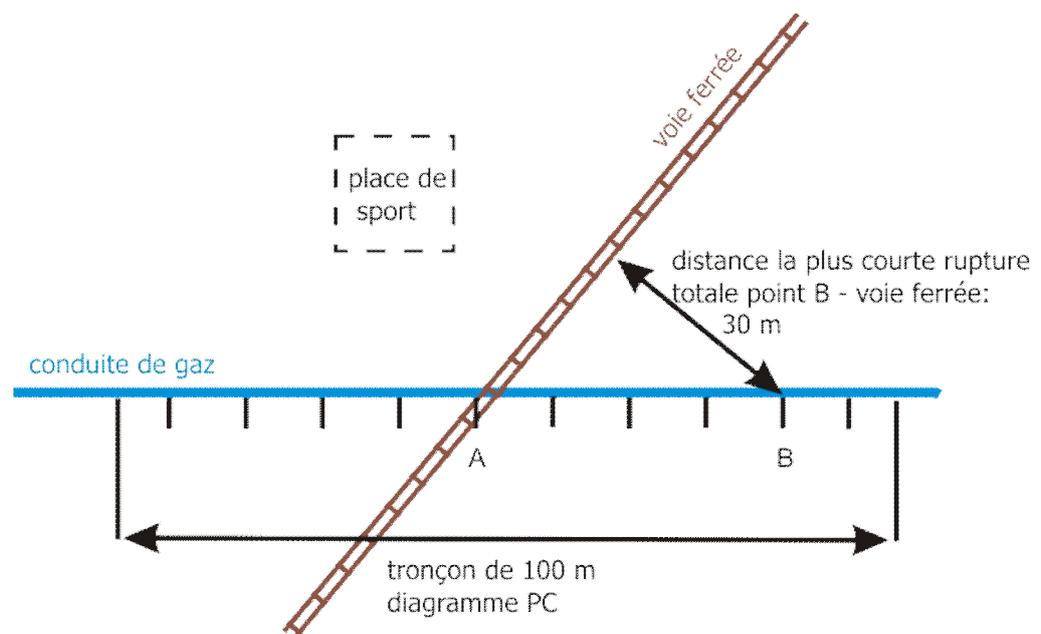
Dans l'exemple de calcul choisi, on considère la situation suivante:

Un gazoduc à haute pression croise une ligne de chemin de fer empruntée par des trains de banlieue. A l'intérieur de la zone d'influence de la conduite, sur le tronçon de conduite à évaluer, se trouvent la ligne de chemin de fer ainsi qu'un terrain de sport.

La conduite prévue présente les caractéristiques techniques suivantes:

Diamètre	48"
Diamètre extérieur	1'219 mm
Epaisseur de la paroi de la conduite	20 mm
Matériau de la conduite	StE 480.7
Pression maximale de service	70 bar
Recouvrement	2.5 m
Année de construction	1990

III. C 1 Plan détaillé de la situation



C 2. Hypothèses d'occupation

Sur la ligne de chemin de fer considérée circulent des trains de banlieue d'une longueur d'env. 100 m.

Le tableau suivant présente les hypothèse d'occupation:

Tab. C 1 Hypothèse d'occupation pour le trafic ferroviaire

Scénario	Fréquence des trains selon l'horaire	Occupation	Durée	Probabilité
En journée (6-20 h)	8 trains par heure	100 personnes/train (nombre moyen de passagers)	14 h/jour	0.583
En soirée (20-24 h)	4 trains par heure	50 personnes/train (faible nombre de passagers)	4 h/jour	0.167
La nuit (24-6 h)	Aucun train de passagers, uniquement des trains de marchandises	1 personne/train	6 h/jour	0.25

Tab. C 2 Hypothèse d'occupation pour le terrain de sport

Objet	Occupation	Durée	Probabilité
Terrain de sport	70 personnes	4 h par jour (13 – 17h)	0.167

C 3. Etude de risque (diagramme PC)

On présentera ci-après, dans l'exemple d'une rupture totale de la conduite, les calculs de l'ampleur des dommages ainsi que des probabilités. On considérera par exemple les points A et B à l'intérieur du tronçon de 100 m (cf. III. C 1). Le point A se trouve directement sur ou sous les voies, le point B présente une distance minimale de 30 m par rapport à la ligne de chemin de fer.

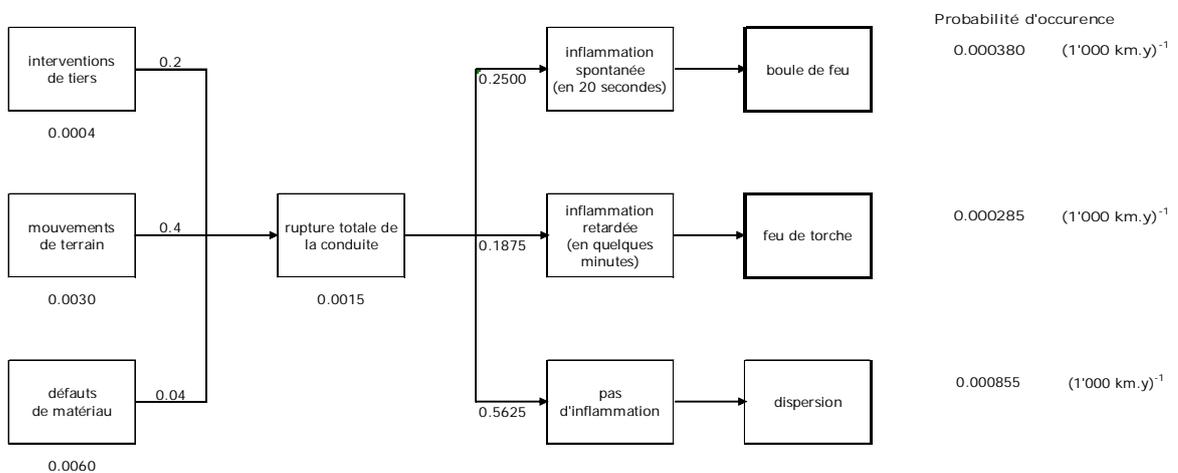
C 3.1. Rayons de létalité

Tab. C 3 Rayons de létalité et létalités pour des personnes se trouvant à l'air libre après la rupture totale de la conduite 48"/70 bar

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀
Boule de feu	25.6 s	585 m	450 m	380 m	335 m	305 m
Feu de torche	30 s	360 m	240 m	185 m	155 m	135 m
Létalité ⁹⁹		env. 10%	35%	60%	85%	100%

C 3.2. Calcul des probabilités d'occurrence

III. C 2 Arbre des causes et des événements selon l'III. 12 (p. 49) pour la conduite 48"/70 bar donnée en exemple, épaisseur de la paroi 20 mm, année de construction 1990



⁹⁹ Les létalités s'appliquent aux deux scénarios d'incendie (boule de feu et feu de torche)

La fréquence de rupture totale peut être calculée à partir des caractéristiques indiquées:

	Fréquence de rupture [1'000 km yr] ⁻¹	Facteur de correction	Proportion de ruptures totales	Ruptures totales [1'000 km yr] ⁻¹
Interventions de tiers	0.001 ^{hh}	0.395 ⁱⁱ	0.2	0.000079
Mouvements de terrain	0.003 ^{jj}	--	0.4	0.0012
Défauts de matériau	0.006 ^{kk}	--	0.04	0.00024
Total				0.001519

Détermination du facteur de correction

La fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers doit être corrigée à l'aide des facteurs de correction suivants:

1. Facteur de correction: facteur de design (K_{DF})

Pour cet exemple de calcul, le facteur de design peut être calculé comme suit (équation dans les définitions des notions):

$$f_0 = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 1219}{20 \times 480 \times 20} = 0.44$$

avec	s =	épaisseur de la paroi	[mm]
	P_d =	pression de calcul	[bar]
	D_a =	diamètre extérieur de conduite	[mm]
	f_0 =	coefficient de conception (=facteur de design)	---
	$R_{t0,5}$ =	limite élastique (valeur minimale)	[N/mm ²]

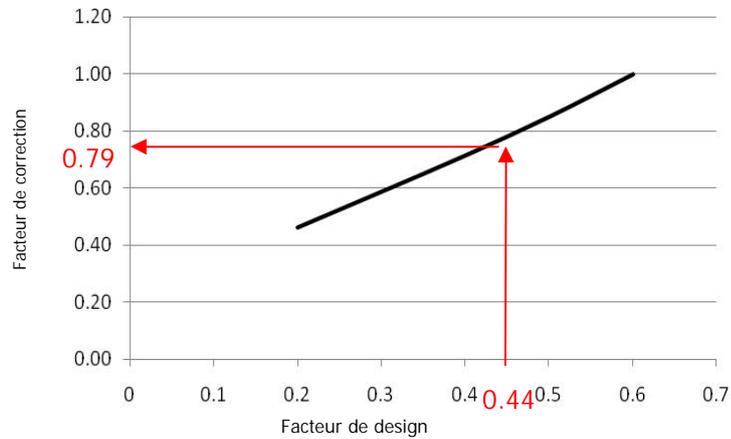
^{hh} Conformément au Tab. 17 (interventions de tiers)

ⁱⁱ Voir la détermination du facteur de correction

^{jj} Conformément au Tab. 19 (mouvements de terrain)

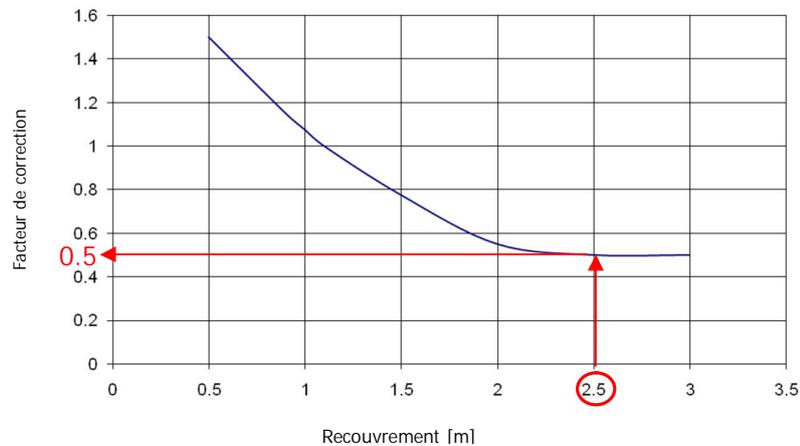
^{kk} Conformément au Tab. 20 (défauts de matériau)

Le graphique suivant donne le facteur de réduction sur la fréquence de rupture en cas d'interventions de tiers: env. 0.79.



2. Facteur de correction: recouvrement (K_U)

Dans cet exemple, le recouvrement est de 2.5 m. Conformément à l'illustration suivante, le facteur de correction est d'env. 0.5 pour un recouvrement de 2.5 m.

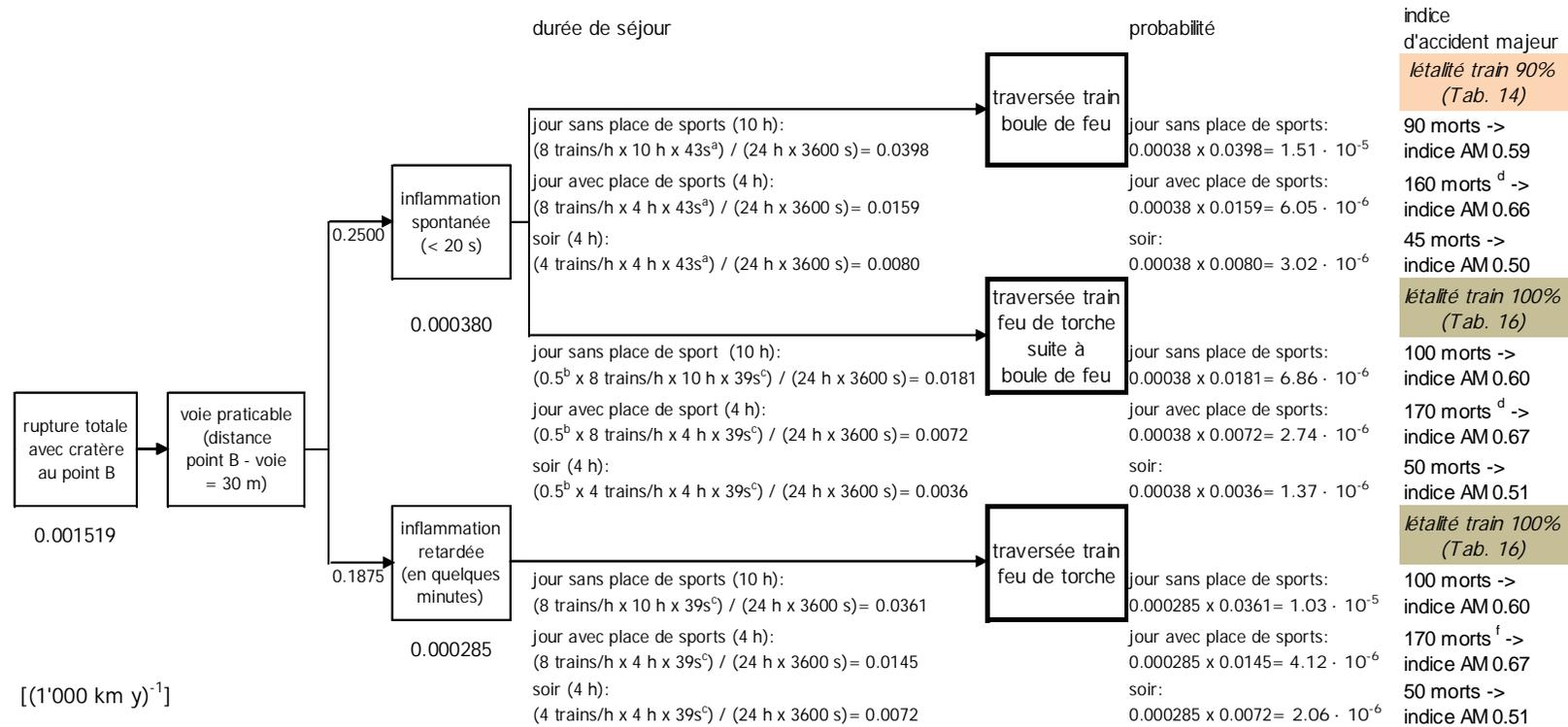


3. Facteur de correction: plaques de protection (K_{S-W}) = 1 (pas de plaque de protection)
4. Facteur de correction: contrôles du tracé (K_T) = 1 (aucun contrôle hebdomadaire)

Le facteur de correction total est calculé au moyen de l'équation suivante et s'élève dans le cas présent à:

$$K_{\text{Total}} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.79 \times 0.5 \times 1 \times 1 = 0.395$$

III. C 3 Scénarios de dommages calculés pour la conduite 48"/70 bar selon l'III. 9, p. 44, fuite au point B à une distance de 30 m de la voie, pour les scénarios d'occupation avec train (longueur du train 100 m, occupation en journée 100 personnes/train, en soirée 50 personnes/train)



^a 43 s (Tab. 14)

^b 50% de la fréquence des trains (Chap. 8.2.4)

^c (trajet de freinage + longueur voie dans R₅₀ feu de torche + longueur du train) / vitesse = (400 m + 367 m + 100 m) / 22 m/s = 39 s

^d place de sports: 70 morts par boule de feu (à l'intérieur de R₁₀₀ boule de feu)

^f place de sports: 70 morts par feu de torche (à l'intérieur de R₁₀₀ feu de torche)

C 3.3. Boule de feu sans suivi d'un feu de torche

La létalité ainsi que le temps de séjour d'un train d'une longueur de 100 m passant près d'une rupture totale du gazoduc à haute pression avec boule de feu, figurent dans le Tab. 14, chap.8.2.4, p. 38.

Tab. C 4 Létalités et temps de séjour pour une conduite 48"/70 bar au passage d'un train, en fonction de la distance entre la ligne de chemin de fer et la boule de feu, extrait du Tab. 14, chap. 8.2.4, p. 37

largeur nominale ou diamètre extérieur de conduite	Pres-sion	Létalité et temps de séjour d'un train pour une distance donnée entre la rupture totale et la ligne de chemin de fer, pour une longueur de train de 100 m				
		< 10 m	10 - < 30 m	30 - < 50 m	50 - < 70 m	70 - < 90 m
48" (1219 mm)	70 bar	90% / 44 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s

Ampleur des dommages pour une rupture totale au point B

Pour le point B choisi en exemple, situé à une distance de 30 m des voies, la létalité des passagers du train dans le cas d'une boule de feu est de 90%. Cela représente par conséquent 90 décès en journée et 45 décès en soirée dans le trafic ferroviaire. Le scénario d'occupation pour la nuit (1 personne par train) donne un indice d'accident majeur de 0 et est ainsi négligeable.

Le reste du temps (en journée sans terrain de sport et sans train ainsi qu'en soirée et la nuit sans train), aucune personne n'est présente, et ces scénarios d'occupation peuvent ainsi être négligés (indices d'accident majeur de 0).

Tab. C 5 Ampleur des dommages au point B causée par le scénario d'incendie de la boule de feu

Scénario d'occupation	Occupation	Létalité	Nombre de décès	Indice d'accident majeur
En journée avec train sans terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	100 p./train	90%	90	0.59
En journée avec train et avec terrain de sport (13-17 h)	100 p./train 70 p./terrain de sport	90% 100% ^{II}	90 70 Total 160	0.66
En journée sans train avec terrain de sport (13-17 h)	70 p./terrain de sport	100% ^{II}	70	0.55
En soirée (20-24 h)	50 p./train	90%	45	0.50
La nuit (24-6 h)	1 p./train	90%	1	0

Probabilité de séjour du train dans la zone à risque d'une rupture totale au point B

La probabilité qu'un train se trouve sur le tronçon à risque pendant une période donnée (scénario d'occupation) se calcule de la manière suivante:

$$W_{Train} = \frac{\text{nb. train par h.} \times \text{durée scénario (h)} \times \text{durée de traversée du train de la zone de danger (s)}}{\text{durée totale scénario (s)}}$$

La période totale est en général égale à un jour (24 h).

Tab. C 6 Probabilités des scénarios d'occupation avec trains pour une rupture totale au point B, scénario d'incendie de la boule de feu sans feu de torche ultérieur

Scénario d'occupation avec train	Fréquence des trains [trains/h]	Période [h/jour]	Durée de séjour d'un train dans la zone à risque [s] (Tab. 14, chap.8.2.4, p. 38)	Probabilité de séjour
En journée sans terrain desport (6-13 et 17-20 h)	8 trains/h	10 h	43 s	$(8 \times 10 \times 43) / (24 \times 3600) = 0.0398$
En journée avec terrain de sport (13-17 h)	8 trains/h	4 h	43 s	0.0159
En soirée (20-24 h)	4 trains/h	4 h	43 s	0.0080

^{II} Le terrain de sport se trouve dans R₁₀₀ boule de feu à l'air libre.

C 3.4. Feu de torche après boule de feu

Ampleur

Le Tab. 16, Chap. 8.2.5, S. 42 indique le R_{FAZ} à l'intérieur duquel la létalité des passagers du train est égale à 100%.

Tab. C 7 Rayon R_{FAZ} pour le calcul de la létalité de personnes se trouvant dans des trains circulant à une vitesse de 80 km/h dans le cas d'un feu de torche, extrait du Tab. 16

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	R_{FAZ} [m]
70 bar / 48" (1219 mm)	132

Pour la rupture totale au point B pris en exemple, situé à une distance de 30 m par rapport à la ligne de chemin de fer, la létalité des passagers du train dans le cas d'un feu de torche est par conséquent de 100%.

Tab. C 8 Ampleur des dommages au point B causée par le scénario du feu de torche après boule de feu

Scénario d'occupation	Occupation	Létalité	Nombre de décès	Indice d'accident majeur
En journée avec train sans terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	100 p./train	100%	100	0.6
En journée avec train et terrain de sport (13-17 h)	100 p./train 70 P. terrain de sport	100% 100% ^{mmm}	100 70 (boule de feu!) ⁿⁿ Total 170	0.67
En journée sans train avec terrain de sport (13-17 h)	70 P. terrain de sport	100% ^{mmm}	70 (boule de feu!) ⁿⁿ	0.55

^{mmm} Létalité scénario d'incendie boule de feu: la place de sport se trouve à l'intérieur du R_{100} boule de feu à l'air libre.

ⁿⁿ Nombre de décès dans le scénario d'incendie boule de feu

Scénario d'occupation	Occupation	Létalité	Nombre de décès	Indice d'accident majeur
En soirée (20-24 h)	50 p./train	100%	50	0.51
La nuit (24-6 h)	1 p./train	100%	1	0

Probabilité

La probabilité qu'un train soit touché résulte du temps de passage d'un train sur le tronçon de voie dans le rayon R₅₀ Feu de torche pour des personnes se trouvant à l'air libre ainsi que de la distance d'arrêt et de la longueur du train (chap. 8.2.5, p. 42):

R₅₀ feu de torche (48"/70 bar) = 186 m

Longueur de la voie ferrée R₅₀ Feu de torche = $2 \times \sqrt{186\text{m}^2 - 30\text{m}^2} = 367\text{m}$

Distance d'arrêt (y c. distance de réaction): 400 m

Longueur du train = 100 m

$$\text{temps de passage train} = \frac{(367 \text{ m} + 400 \text{ m} + 100 \text{ m})}{22 \text{ m/s}} = 39\text{s}$$

Cette temps de passage est multiplié par 50% de la fréquence des trains sur le tronçon concerné, conformément au Chap. 8.2.4.

Tab. C 9 Probabilités des scénarios d'occupation avec trains pour une rupture totale au point B, scénario d'incendie d'un feu de torche suivant une boule de feu

Scénario d'occupation avec train	Fréquence des trains [trains/h] (50% des trains, chap. 8.2.4)	Période [h/jour]	Durée de séjour d'un train dans la zone à risque [s] (chap. 8.2.5)	Probabilité de séjour ^{oo}
En journée sans terrain de sport (6-13 et 17-20 h)	0.5 x 8 trains/h	10h	39 s	$(0.5 \times 8 \times 10 \times 39) / (24 \times 3600) = 0.0181$
En journée avec terrain de sport (13-17 h)	0.5 x 8 trains/h	4 h	39 s	0.0072
En soirée (20-24 h)	0.5 x 4 trains/h	4 h	39 s	0.0036

C 3.5. Feu de torche

Ampleur

Le Tab. 16, chap. 8.2.5, p. 42 indique le R_{FAZ} à l'intérieur duquel la létalité des passagers du train est égale à 100%.

Tab. C 10 Rayon R_{FAZ} pour le calcul de la létalité de personnes se trouvant dans des trains circulant à une vitesse de 80 km/h dans le cas d'un feu de torche, extrait du Tab. 16

Diamètre: largeur nominale ou diamètre extérieur de la conduite	R_{FAZ} [m]
70 bar / 48" (1219 mm)	132

Pour la rupture totale au point B pris en exemple, situé à une distance de 30 m par rapport à la ligne de chemin de fer, la létalité des passagers du train dans le cas d'un feu de torche est par conséquent de 100%.

^{oo} Probabilité qu'un train se trouve sur le tronçon à risque pendant la période donnée.

Tab. C 11 Ampleur des dommages au point B causée par le scénario d'incendie feu de torche

Scénario d'occupation	Occupation	Létalité	Nombre de décès	Indice d'accident majeur
En journée avec train sans terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	100 p./train	100%	100	0.6
En journée avec train et terrain de sport (13-17 h)	100 p./train 70 P. terrain de sport	100% 100% ^{PP}	100 70 Total 170	0.67
En journée sans train avec terrain de sport (13-17 h)	70 P. terrain de sport	100%	70	0.55
En soirée (20-24 h)	50 p./train	100%	50	0.51
La nuit (24-6 h)	1 p./train	100%	1	0

Probabilité

La probabilité qu'un train soit touché résulte du temps de passage d'un train sur le tronçon de voie dans le rayon R_{50} Feu de torche pour des personnes se trouvant à l'air libre ainsi que de la distance d'arrêt et de la longueur du train (chap. 8.2.5, p. 42):

R_{50} feu de torche (48"/70 bar) = 186 m

Longueur de la voie ferrée dans R_{50} Feu de torche = $2 \times \sqrt{186^2 - 30^2} = 367\text{m}$

Distance d'arrêt (y c. distance de réaction): 400 m

Longueur du train = 100 m

durée passage train = $\frac{(367 \text{ m} + 400 \text{ m} + 100 \text{ m})}{22 \text{ m/s}} = 39\text{s}$

^{PP} Le terrain de sport se trouve à l'intérieur de R_{100} feu de torche à l'air libre.

Tab. C 12 Probabilités des scénarios d'occupation avec trains dans le cas d'une rupture totale au point B, scénario du feu de torche

Scénario d'occupation avec train	Fréquence des trains [trains/h]	Période [h/jour]	Durée de séjour d'un train dans la zone à risque du feu de torche [s] (chap. 8.2.5, cf. détermination plus haut)	Probabilité de séjour ⁹⁹
En journée sans terrain de sport (6-13 et 17-20 h)	8 trains/h	10 h	39 s	$(8 \times 10 \times 39) / (24 \times 3600)$ = 0.0361
En journée avec terrain de sport (13-17 h)	8 trains/h	4 h	39 s	0.0145
En soirée (20-24 h)	4 trains/h	4 h	39 s	0.0072

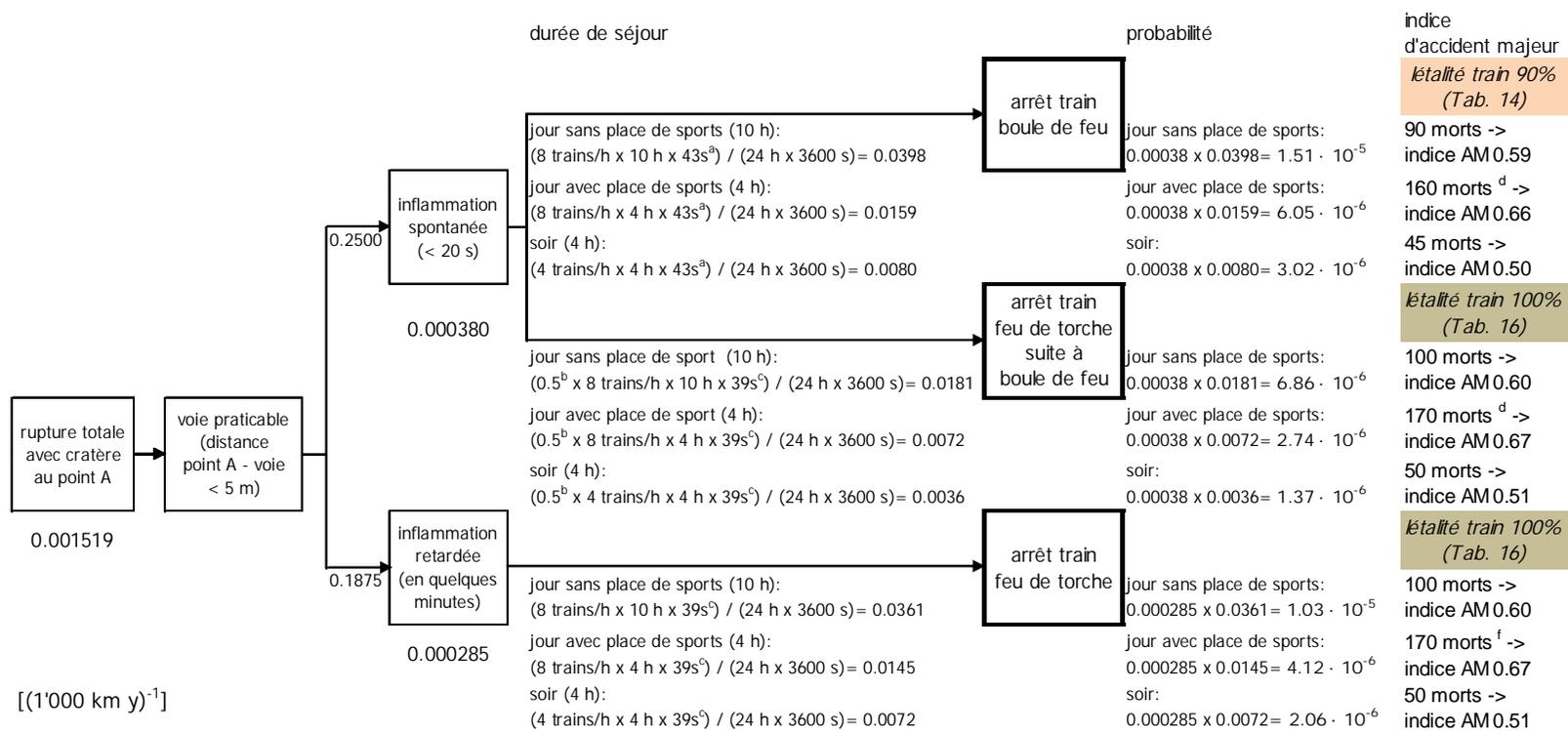
C 3.6. Dommage mécanique aux voies

Le point A pris en exemple se trouve directement en dessous des voies. Il convient donc de prendre en compte, conformément au chap. 8.2.6 (p. 43), un dommage mécanique aux voies.

L'ampleur des dommages et la probabilité sont, conformément au chap. 8.2.6 (p. 43), (cf aussi III. 9), calculées de la même manière que pour le passage du train à travers le champ de rayonnement thermique de la boule de feu ou du feu de torche. L'ampleur des dommages et la probabilité pour le point A peuvent ainsi être déterminées de la même manière que pour le point B (cf. III. C 4).

⁹⁹ Probabilité qu'un train se trouve sur le tronçon à risque pendant la période donnée.

III. C 4 Scénarios de dommages de la conduite 48"/70 bar calculés, selon l'III.9, p. 44, fuite au point A directement sous la voie, pour les scénarios d'occupation avec train (longueur du train 100 m, occupation en journée 100 personnes/train, en soirée 50 personnes/train)



^a 43 s (Tab. 14)

^b 50% de la fréquence des trains (Chap. 8.2.4)

^c (trajet de freinage + longueur voie dans R₅₀ feu de torche + longueur du train) / vitesse = (400 m + 367 m + 100 m) / 22 m/s = 39 s

^d place de sports: 70 morts par boule de feu (à l'intérieur de R₁₀₀ boule de feu)

^f place de sports: 70 morts par feu de torche (à l'intérieur de R₁₀₀ feu de torche)

C 3.7. Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque

Tab. C 13 Calcul de la probabilité par an pour le scénario d'incendie de la boule de feu pour le point B donné en exemple

Période	Scénario d'incendie	Ampleur des dommages au point B	Probabilité d'occurrence du scénario d'incendie [10 m·yr] ⁻¹	Probabilité de séjour	Probabilité de l'indice d'accident majeur par an ^{rr}
Scénarios d'occupation avec train					
En journée avec train sans terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	Boule de feu sans feu de torche	0.59	3.80×10^{-9}	0.0398	1.51×10^{-10}
En journée avec train et terrain de sport (13-17 h)	Boule de feu sans feu de torche	0.66	3.80×10^{-9}	0.0159	6.05×10^{-11}
En soirée (20-24 h)	Boule de feu sans feu de torche	0.50	3.80×10^{-9}	0.0080	3.02×10^{-11}
En journée avec train sans terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	Feu de torche après boule de feu	0.60	3.80×10^{-9}	0.0181	6.86×10^{-11}
En journée avec train et terrain de sport (13-17 h)	Feu de torche après boule de feu	0.67	3.80×10^{-9}	0.0072	2.74×10^{-11}
En soirée (20-24 h)	Feu de torche après boule de feu	0.51	3.80×10^{-9}	0.0036	1.37×10^{-11}

^{rr} La probabilité d'un scénario de dommages se calcule en multipliant la probabilité d'occurrence (cf. le paragraphe C 3.2) par la probabilité de séjour (cf. les paragraphes C 3.3 et C 3.5).

Période	Scénario d'incendie	Ampleur des dommages au point B	Probabilité d'occurrence du scénario d'incendie [10 m·yr] ⁻¹	Probabilité de séjour	Probabilité de l'indice d'accident majeur par an ^{rr}
Scénarios d'occupation sans train					
En journée sans train ni terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	Boule de feu	0	3.80×10^{-9}	0.4167 – 0.0398 – 0.0181 = 0.588 ^{ss}	1.36×10^{-10}
En journée sans train avec terrain de sport (13-17 h)	Boule de feu	0.55	3.80×10^{-9}	0.1667 – 0.0159 – 0.0072 = 0.1435 ^{rr}	5.45×10^{-10}
En soirée sans train (20-24 h)	Boule de feu	0	3.80×10^{-9}	0.1667 – 0.0080 – 0.0036 = 0.1551 ^{rr}	5.89×10^{-10}
La nuit (24-6 h)	Boule de feu	0	3.80×10^{-9}	0.25	9.50×10^{-10}

^{ss} La probabilité (probabilité de séjour) des scénarios d'occupation sans train s'obtient en soustrayant la probabilité des scénarios d'occupation avec train.

Tab. C 14 Calcul de la probabilité par an pour le scénario d'incendie du feu de torche pour le point B pris en exemple

Période	Scénario d'incendie	Ampleur des dommages au point B	Probabilité d'occurrence du scénario d'incendie [10 m·yr] ⁻¹	Probabilité de séjour	Probabilité de l'indice d'accident majeur par an ^{tt}
Scénarios d'occupation avec train					
En journée avec train sans terrain de sport (6-13h et 17-20h)	Feu de torche	0.60	2.85×10^{-9}	0.0361	1.03×10^{-10}
En journée avec train et terrain de sport (13-17h)	Feu de torche	0.67	2.85×10^{-9}	0.0145	$2.85E-09 \times 0.0145 = 4.12 \times 10^{-11}$
En soirée (20-24h)	Feu de torche	0.51	2.85×10^{-9}	0.0072	2.06×10^{-11}
Scénarios d'occupation sans train					
En journée sans train ni terrain de sport (6-13 h et 17-20 h)	Feu de torche	0	2.85×10^{-9}	$0.4167 - 0.0361 = 0.3806$	1.08×10^{-9}
En journée sans train avec terrain de sport (13-17 h)	Feu de torche	0.55	2.85×10^{-9}	$0.1667 - 0.0145 = 0.1522$	4.34×10^{-10}
En soirée sans train (20-24 h)	Feu de torche	0	2.85×10^{-9}	$0.1667 - 0.0072 = 0.1595$	4.54×10^{-10}
La nuit (24-6 h)	Feu de torche	0	2.85×10^{-9}	0.25	7.13×10^{-10}

Les probabilités sont cumulées en commençant par l'indice d'accident majeur le plus élevé et sont représentées dans le diagramme PC.

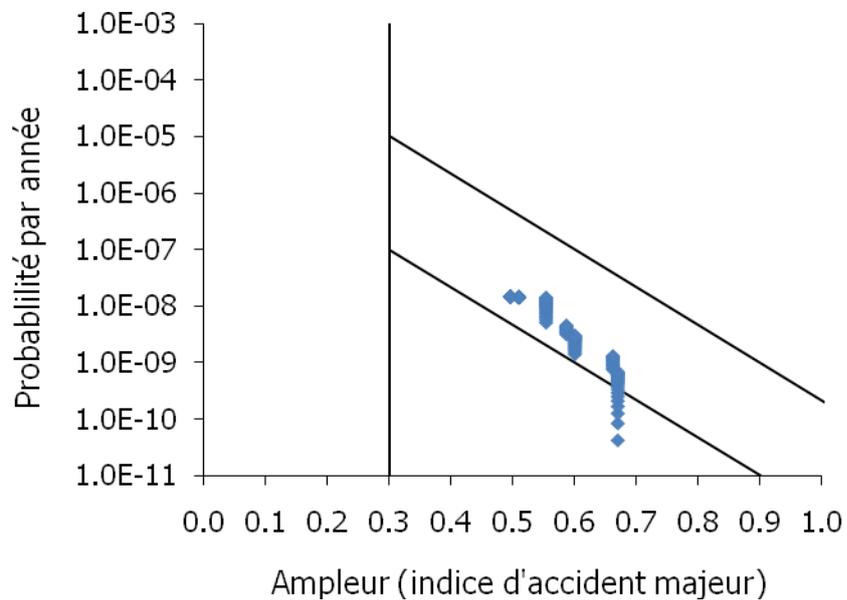
^{tt} La probabilité d'un scénario de dommages se calcule en multipliant la probabilité d'occurrence (cf. le paragraphe C 3.2) par la probabilité de séjour (cf. les paragraphes C 3.3 et C 3.5).

Tab. C 15 Indices d'accident majeur (probabilité cumulée)

Indice d'accident majeur	Probabilité	Probabilité cumulée
0.67	4.12E-11	4.12 x 10 ⁻¹¹
0.67	4.13E-11	8.25 x 10 ⁻¹¹
0.67	4.13E-11	1.24 x 10 ⁻¹⁰
0.67	4.14E-11	1.65 x 10 ⁻¹⁰
...
...
0.50	3.02E-11	1.50 x 10 ⁻⁸
0.50	3.02E-11	1.50 x 10 ⁻⁸

III. C 5 Diagramme PC pour l'exemple de calcul d'un train

Conduite: 48"/70 bar, épaisseur de la paroi 20 mm, recouvrement 2.5 m

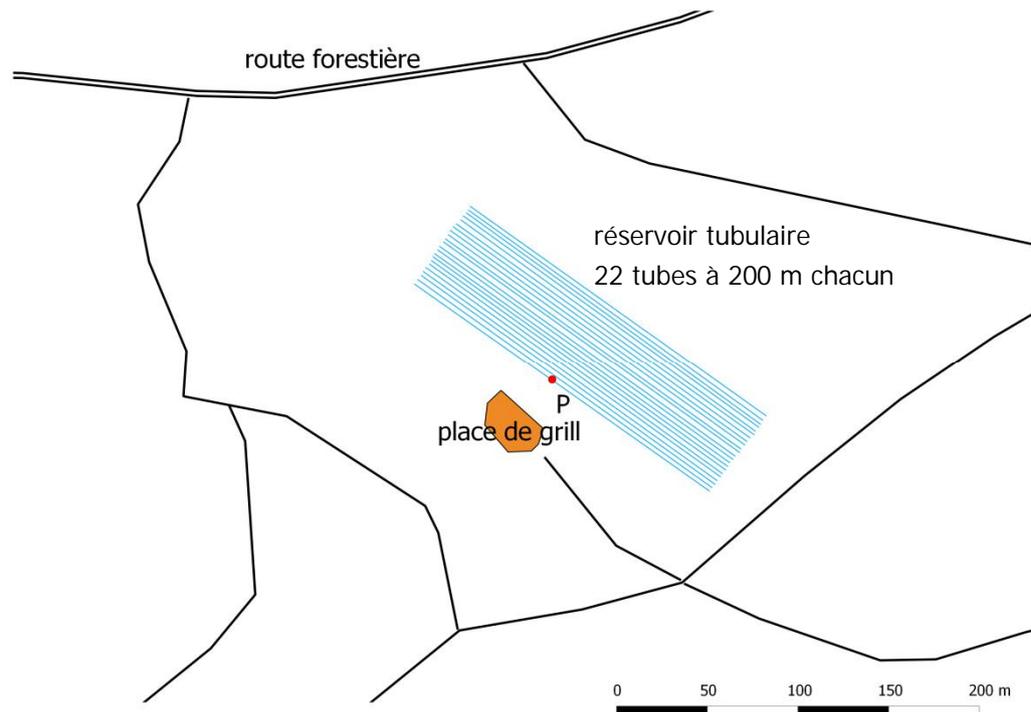


D Exemple de calcul pour les réservoirs tubulaires

D 1. Situation

Dans l'exemple de calcul choisi, on considère la situation suivante:

III. D 1 Plan détaillé de la situation



Les caractéristiques du réservoir tubulaire doté de 22 tubes-réservoirs sont les suivantes:

Diamètre	60"
Diamètre extérieur	1'524 mm
Epaisseur de la paroi des tubes	18.9 mm
Longueur d'un tube-réservoir	200 m
Matériau du tube	StE 480.7
Pression maximale de service (MOP)	70 bar
Recouvrement	1 m
Année de construction	2010

D 2. Hypothèses d'occupation

Dans la zone d'influence du réservoir tubulaire se trouvent des personnes ayant des activités de loisirs (pique-nique, joggeurs, promeneurs, etc.).

Tab. D 1 Hypothèse d'occupation pour des activités de loisirs

Objet	Occupation	Durée	Probabilité
Route forestière	1 personne (en semaine) ou des groupes de 2 personnes (le week-end) tous les 80 m	10 h par jour	0.30 (en semaine) ou 0.12 (le week-end)
Autres chemins forestiers	1 personne tous les 320 m (en sem.) ou tous les 180 m (le week-end)	10 h par jour	0.30 (en semaine) ou 0.12 (le week-end)
Aire de pique-nique	25 personnes le week-end	1 h par jour	0.012 (le week-end)

D 2.1. Calcul de l'ampleur des dommages

La quantité de gaz dans un tube-réservoir 60"/70 bar d'env. 200 m s'élève, conformément au mode de calcul du chapitre 9.3.2 à environ 20 000 kg.

$$M_g = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times 1 / K \times 0.726 = \left(\frac{1.486}{2}\right)^2 \times 3.14 \times 200 \times 70 \times 1 / 0.8478 \times 0.726 = 20'800$$

Avec	M_g	Quantité de gaz libérée [kg]
	P	Pression = 70 bar
	D	Diamètre intérieur = 1.486 m
	L	Longueur du tube-réservoir = 200 m
	K	Facteur de compressibilité = 0.8478

Cette quantité de gaz permet de déterminer les rayons de létalité de la manière suivante:

Tab. D 2 Rayons de létalité (à partir du Tab. 22) et létalités (à partir du Tab. 4) pour des personnes se trouvant à l'air libre après la rupture totale d'un tube-réservoir 60"/70 bar d'env. 200 m (quantité de gaz env. 20'000 kg)

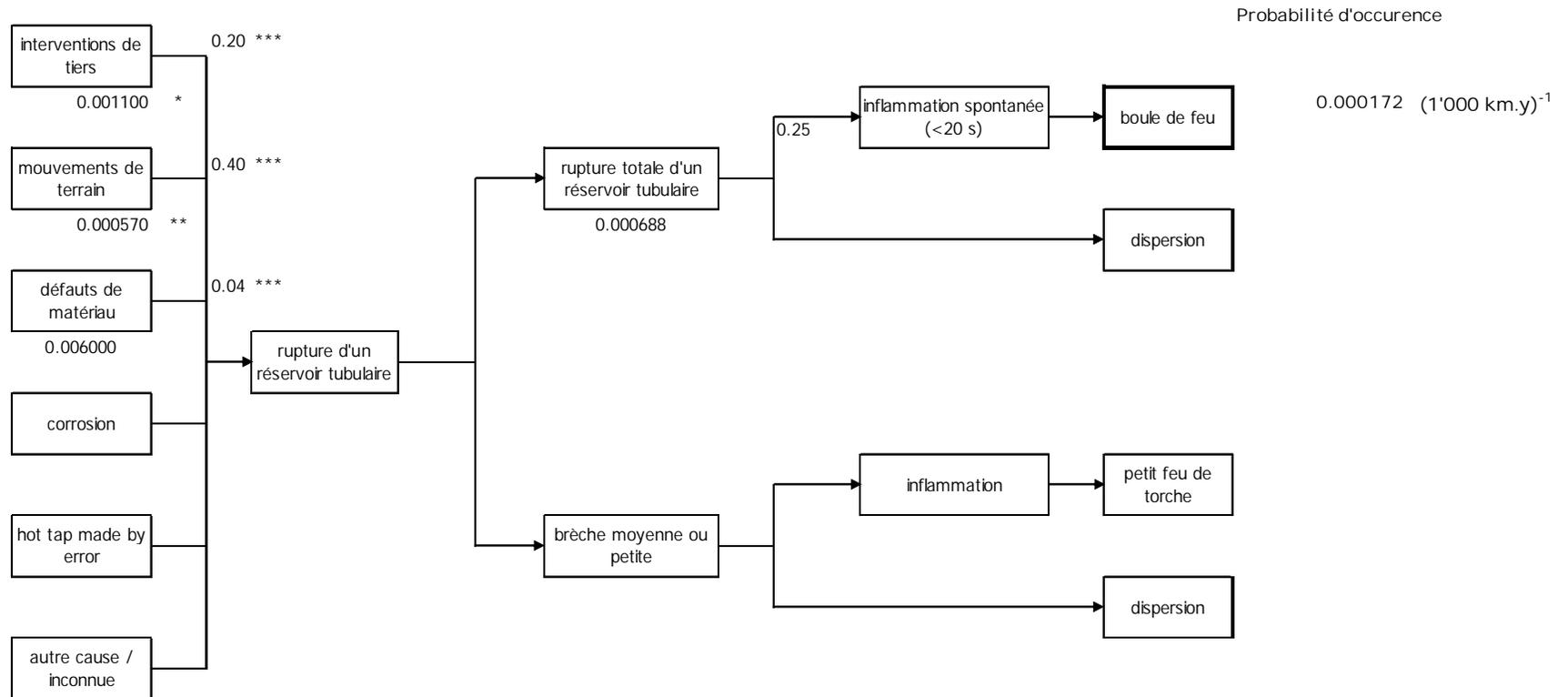
Boule de feu	Exposition	$R_{0\text{ FE}}$	$R_{25\text{ FE}}$	$R_{50\text{ FE}}$	$R_{75\text{ FE}}$	$R_{100\text{ FE}}$
Tube-réservoir	10.3 s	170 m	125 m	105 m	90 m	70 m
Létalité		env. 10%	35%	60%	85%	100%

Tab. D 3 Calcul de l'indice d'accident majeur pour le point P pour le scénario "Jour de week-end avec pique-nique" (scénario d'incendie de la boule de feu). Les rayons de létalité figurent dans le Tab. D 2.

	Nombre de personnes présentes à l'air libre	Létalité à l'air libre	Nombre de décès
dans la zone $R_{100\text{ FE}}$	25 personnes	1.00	25
entre $R_{100\text{ FE}}$ et $R_{75\text{ FE}}$	0	0.85	0
entre $R_{75\text{ FE}}$ et $R_{50\text{ FE}}$	1	0.60	0.6
entre $R_{50\text{ FE}}$ et $R_{25\text{ FE}}$	0	0.35	0
entre $R_{25\text{ FE}}$ et $R_{0\text{ FE}}$	5	0.10	0.5
<i>Nombre total de décès à l'air libre</i>			26.1

D 2.2. Calcul des probabilités d'occurrence

III. D 2 Arbre des causes et des événements selon l'III. 15 pour un tube-réservoir du réservoir tubulaire



* Fréquence de rupture due d'interventions de tiers:

Fréquence de rupture chez 18.9 mm (v) 0.001
 Facteur de correction pour recouvrement (k(U)) 1.1
 Facteur de correction pour coefficient de conception (k(DF)) 1
 total fréquence de rupture interventions des tiers (V): $V=v*k(U)*k(DF)$
 (chap. 9.2.2 et 9.3.3)

*** Part de rupture total
 (chap. 9.3.3)

** Fréquence de rupture due de mouvements de terrain:

Fréquence de rupture chez 60" 0.003
 Réduction pour CH -6 %
 Réduction pour lieu sans pente -50 %
 Réduction pour lieu sans eau -25 %
 total fréquence de rupture mouvements de terrain 19 %
 (chap. 9.3.3)

Détermination du facteur de correction

La fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers doit être corrigée à l'aide des facteurs de correction suivants:

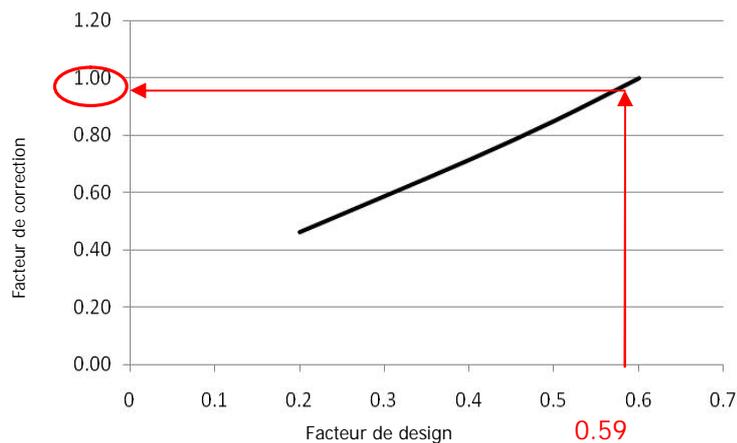
1. Facteur de correction: facteur de design (K_{DF})

Pour cet exemple de calcul, le facteur de design peut être calculé comme suit (équation dans les définitions des notions):

$$f_0 = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 1524}{20 \times 480 \times 18.9} = 0.59$$

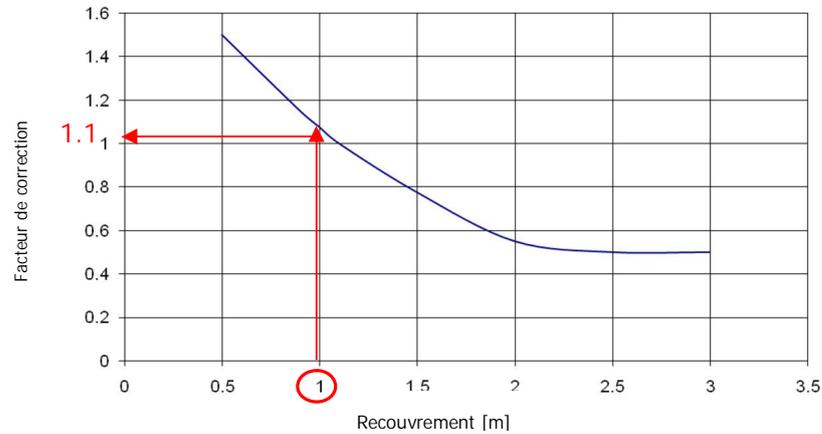
Avec	s =	épaisseur de la paroi	[mm]
	P_d =	pression de calcul	[bar]
	D_a =	diamètre extérieur de tube	[mm]
	F_0 =	coefficient de conception	---
	$R_{t0,5}$ =	limite élastique (valeur minimale)	[N/mm ²]

Le graphique suivant présente le facteur de réduction du coefficient de conception 0.59 sur la fréquence de rupture à la suite d'interventions de tiers: $K_{DF} = 1$.



2. Facteur de correction: recouvrement (K_U)

Dans cet exemple, le recouvrement est égal à 1 m. Conformément à l'illustration suivante, le facteur de correction pour un recouvrement de 1 m est égal à 1.1.



3. Facteur de correction: plaques de protection (K_{S-W}) = 1 (pas de plaque de protection)

4. Facteur de correction: contrôles du tracé (K_T) = 1 (contrôles bimensuels)

Le facteur de correction K_{total} se calcule à l'aide de l'équation suivante et s'élève dans le cas présent à:

$$K_{Total} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 1 \times 1.1 \times 1 \times 1 = 1.1$$

La fréquence de rupture totale (fréquence de rupture x facteur de correction x proportion de ruptures totales) peut être calculée à partir des caractéristiques indiquées:

	Fréquence de rupture ¹⁾ [1000 km·y] ⁻¹	Facteur de correction	Proportion de ruptures totales	Ruptures totales [1000 km·y] ⁻¹
Interventions de tiers	0.001 ^{uu}	1.1 ^{vv}	0.2 ^{xx}	0.0002
Mouvements de terrain	0.003 ^{ww}	0.19 ^{xx}	0.4 ^{xx}	0.0003
Défauts de matériau	0.006 ^{yy}	--	0.04 ^{xx}	0.0002
Total				0.0007

^{uu} Conformément au Tab. 17 (interventions de tiers), épaisseur de la paroi de 18.9 mm

^{vv} Voir la détermination du facteur de correction

^{ww} Conformément au Tab. 1919 (mouvements de terrain), pour un diamètre de 60"

^{xx} Voir le chapitre 9.3.3

^{yy} Conformément au Tab. 20 (défauts de matériau), pour une construction en 2003

D 2.3 Calcul de la courbe cumulative et représentation du risque

On présentera ci-après le calcul des probabilités pour les différents scénarios de dommages par tronçon de 10 m et par an, pour le point P:

Période (scénario d'occupation)	Scénario d'incendie	Indice d'accident majeur au point P	Probabilité d'occurrence $[10 \text{ m} \cdot \text{y}]^{-1}$	Probabilité de séjour scénario d'occupation ^{zz}	Probabilité par an ^{aaa}
Jour ouvrable en journée	Boule de feu	0.02	1.72×10^{-9}	0.30	5.16×10^{-10}
Week-end en journée sans pique-nique	Boule de feu	0.02	1.72×10^{-9}	0.108	1.86×10^{-10}
Week-end en journée avec pique-nique	Boule de feu	0.43	1.72×10^{-9}	0.012	2.06×10^{-11}

Conformément au Chap.9.3.4, la courbe cumulative pour l'ensemble du réservoir tubulaire est calculée comme une unité technique fonctionnelle. C'est-à-dire que pour tous les tubes réservoirs de 200 m chacun, on estime une rupture totale tous les 10 m (440 points). Les probabilités sont cumulées en commençant par l'indice d'accident majeur le plus élevé et sont représentées dans le diagramme PC:

Tab. D 3 Indices d'accident majeur avec probabilité cumulée

Indice d'accident majeur	Probabilité	Probabilité cumulée
0.43	2.06×10^{-11}	2.06×10^{-11}
0.43	2.06×10^{-11}	4.12×10^{-11}
0.43	2.06×10^{-11}	6.18×10^{-11}
...
...

^{zz} Part de la période (scénario d'occupation) à la durée totale

^{aaa} La probabilité d'un scénario de dommages se calcule en multipliant la probabilité d'occurrence (cf. paragraphe précédent) par la probabilité du scénario d'occupation (cf. les hypothèse d'occupation).

- III. D 3 Diagramme PC de l'exemple de calcul du réservoir tubulaire, caractéristiques de la conduite: 60"/70 bar, longueur des tubes-réservoirs 200 m, épaisseur de la paroi 18.9 mm, recouvrement 1 m

