

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN Droit du marché de l'énergie et du transport par conduites

Rapport du 19 décembre 2023

Transport de l'hydrogène par conduite

Analyse de la problématique des risques



Date: 19.12.2023

Lieu: Berne

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN CH-3003 Berne www.ofen.admin.ch

Mandataires:

CSD INGÉNIEURS Chemin de Montelly 78, 1000 Lausanne lausanne@csd.ch

Auteurs:

Matilde Ribolzi, CSD Ingénieurs Aline Guillaume-Gentil, CSD Ingénieurs

Chef de programme de l'OFEN:Patrick Cudré-Mauroux, patrick.cudre-mauroux@bfe.ad-
min.chNuméro du contrat de l'OFEN:SI/200429-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Adresse postale: Office fédéral de l'énergie OFEN, CH-3003 Berne Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch

CSD INGÉNIEURS SA Chemin de Montelly 78 Case postale 302 CH-1000 Lausanne 16 +41 21 620 70 00 lausanne@csd.ch www.csd.ch





Office Fédéral de l'Energie OFEN

Transport de l'hydrogène par conduite Analyse de la problématique des risques V1.0

Schweizerische Eidgenossensc Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra

> Bundesamt für Energie BFE Office fédéral de l'énergie OFEN

Lausanne, le 19.12.2023 / FCH12007



Table des matières

1	Ir	ntro	oduction	.1
	1.1	Сс	ontexte	. 1
	1.2	Oł	pjectifs de l'étude	. 1
2	Е	tap	e 1 : Recherche bibliographique	.2
	2.1	Le	transport d'hydrogène en Europe	. 2
	2.1.	.1	Réseau principal de transport d'hydrogène en Europe	. 2
	2.1.	.2	Conversion du réseau actuel de gaz naturel et injection d'hydrogène	. 4
	2.2	Сс	ontraintes techniques du réseau	. 5
	2.3	Ev hy	rolution du risque à la suite de l'introduction dans le réseau existant d'un mélange gaz nature drogène	— . 6
3	Ε	tap	e 2 : Analyses des risques sur les mélanges CH ₄ -H ₂ dans la littérature	.7
	3.1	Ca	aractéristiques physiques de l'hydrogène et du gaz naturel (CH ₄)	. 7
	3.2	Et	ude K. Stoleka	. 8
	3.3	Et	ude Froeling, Dröge, Nane, Van Wijk	10
	3.4	Pr (IN	opriétés dangereuses des mélanges hydrogène / gaz naturel et impact potentiels sur les risqu IERIS)	es 13
	3.4.	.1	Explosion du nuage de gaz	13
	3.4.	.2	Feu de torche	14
	3.5	Me	éthode de calcul du risque : exemples de la France, de la Belgique et des Pays Bas	14
	3.5.	.1	France	14
	3.5.	.2	Belgique	15
	3.5.	.3	Pays Bas	16
4	Ε	tap	e 3 : Modélisations des dommages	17
	4.1	Сс	onduites de transport	17
	4.1.	.1	Modélisation de la libération de CH ₄ et de H ₂	18
	4.1.	.2	Modélisation des effets	19
	4.1.	.3	Inflammation immédiate : feu de torche	20
	4.1.	.4	Inflammation retardée : boule de feu, flash fire ou VCE	24
	4.1.	.5	Considérations sur les effets de l'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel existant	27
	4.2	Сс	onduites de distribution / micro-projets	27
	4.2.	.1	Conduites d'un diamètre maximal de 10 cm et produit de la pression fois le diamètre de 2 bar*cm	00 29
	4.2.	.2	Conduites d'un diamètre maximal de 12 cm et produit de la pression fois le diamètre de 3 bar*cm	00 31
5	С	on	clusions : réflexions sur la LITC, l'OITC et l'OSITC	34
6	В	Bibli	iographie	36
7	In	npr	essum	38



Liste des figures

8

Figure 2.1	European Hydrogen Backbone, projection du réseau à 2040 [5]	3
Figure 2.2	Synoptique des coûts d'adaptation à différents taux d'hydrogène [6]	5
Figure 2.3	Champ d'application de la recommandation SSIGE H1000 [20]	6
Figure 3.1	Scénarios étudiés par K. Stoleka	8
Figure 3.2	Scénario 1 100% CH4 (D=10cm, p=16bar, L=10 km)	8
Figure 3.3	Scénario 2 80% CH ₄ et 20% H ₂ (D=10cm, p=16bar, L=10 km)	9
Figure 3.4	Taux de fuite et flux thermiques pour différents scénarios 1	0
Figure 3.5	Caractéristique de la flamme modélisée pour une conduite de 16" et 36" à 66 bar et transportant de l'H ₂ ou du CH ₄	11
Figure 3.6	Représentation des flammes pour le gaz naturel et l'hydrogène en considérant un vent à 1.5 m/s et un vent à 9 m/s	11
Figure 3.7	Flux de chaleur pour un feu de torche de méthane et d'hydrogène pour une conduite de 36", 66 bar et distance	12
Figure 3.8	Létalités pour une conduite de 36" et 66 bar 1	12
Figure 3.9	Risque individuel calculé pour tous les scénarios1	2
Figure 3.10	Méthodologie française : arbres des conséquences pour les gaz inflammables (GESIP [27]) 1	4
Figure 3.11	Méthodologie belge : arbre des conséquences pour les gaz inflammables [28] 1	15
Figure 3.12	Evènements normés pour la rupture totale ou une fuite d'une conduite à haute pression (RIVM) [24]1	16
Figure 3.13	Probabilité d'ignition pour une rupture totale ou une fuite (RIVM) [24] 1	6
Figure 4.1	Paramètres pour la modélisation « Gas release from long pipeline » et comparaison avec le Rapport-Cadre	8
Figure 4.2	Comparaison des résultats obtenus avec EEFFECTS et le Rapport-Cadre 1	8
Figure 4.3	Taux de fuite et quantité relâchée pour une rupture totale d'une conduite transportant du CH ₄ ou de l'H ₂ 1	8
Figure 4.4	Arbre des conséquences pour une fuite de gaz [31]	20
Figure 4.5	Arbre des conséquences pour une rupture totale d'une conduite à haute pression de gaz naturel [25]	20
Figure 4.6	Modèle en forme de cylindre pour le calcul des effets d'un feu de torche dans le Rapport- Cadre et modèle en forme de cône pris en compte par le logiciel EFFECTS 2	21
Figure 4.7	Forme de la flamme pour le méthane et les différents mélanges hydrogène-méthane (EFFECTS)	22
Figure 4.8	Relations entre dose de rayonnement thermique et distance à la source pour les différents mélanges H ₂ -CH ₄ analysés et pour le scénario feu de torche (EFFECTS)	23
Figure 4.9	Forme de la boule de feu pour le méthane et les différents mélanges hydrogène-méthane (EFFECTS)	25
Figure 4.10	Relations entre dose de rayonnement thermique et distance à la source pour les différents mélanges H ₂ -CH ₄ analysés et pour le scénario boule de feu (EFFECTS)	26
Figure 4.11	Résultats de la modélisation d'une fuite de CH ₄ (5 bar/6 cm) et d'une fuite de H ₂ (500 bar/6 cm)	28
Figure 4.12	Forme de la flamme pour un feu de torche de CH ₄ (5 bar / 6 cm) et de H ₂ (500 bar/6 cm) et dose de rayonnement	29
Figure 4.13	Forme de flammes pour différentes conduites avec un produit de la pression par diamètre de 200 bar*cm	30
Figure 4.14	Dose de rayonnement thermique pour les différentes conduites modélisées (200 bar*cm) 3	30



Figure 4.15	Forme de flammes pour différentes conduites avec un produit de la pression par diamètre de 300 bar*cm	31
Figure 4.16	Dose de rayonnement thermique pour les différentes conduites modélisées (300 bar*cm) 3	32
Figure 4.17	Comparaison entre hauteur de flamme pour les seuils à 200 bar*cm et à 300 bar*cm	33

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Propriétés physiques de l'hydrogène et du méthane	. 7
Tableau 3.2	Limites d'explosivité et concentration limite en oxygène issus des essais à conditions atmosphérique de l'INERIS et du BAM	13
Tableau 3.3	Méthode belge : Probabilité d'ignition pour les gaz inflammables [28]	15
Tableau 4.1	Comparaison des résultats de la modélisation rupture totale de la conduite à haute pression	19
Tableau 4.2	Paramètres de base pour la modélisation d'un feu de torche avec EFFECTS	21
Tableau 4.3	Echelle des dommages pour la dose de rayonnement thermique (Rapport-Cadre [25])	23
Tableau 4.4	Résultats de la modélisation du feu de torche et comparaison avec les données du Rapport- Cadre	24
Tableau 4.5	Paramètres de base pour la modélisation d'une boule de feu avec EFFECTS	25
Tableau 4.6	Résultats de la modélisation de la boule de feu et comparaison avec les données du Rapport- Cadre	26
Tableau 4.7	Paramètres de base pour la modélisation EFFECTS des micro-réseaux	28
Tableau 4.8	Pression et diamètre des conduites modélisées pour 200 bar* cm	29
Tableau 4.9	Pression et diamètre des conduites modélisées pour 300 bar* cm	31

Liste des annexes

Annexe A Résultats des modélisations EFFECTS pour les mélanges CH₄-H₂

Annexe B Résultats des modélisations EFFECTS pour les micro-réseaux d'hydrogène pur



1 Introduction

1.1 Contexte

L'hydrogène est un vecteur énergétique en plein essor et la problématique de son transport se pose de plus en plus en Suisse et en Europe. Il fait partie de la stratégie suisse pour la décarbonation de la société en vue de l'objectif zéro émission nette de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. L'hydrogène est actuellement produit en très faibles quantités par certaines industries directement in situ et transporté sur de très courtes distances ; toutefois, dans le futur, un réseau de transport national pourrait voir le jour pour l'hydrogène produit à plus grande échelle, mais surtout, pour l'importation d'hydrogène en provenance de l'étranger.

À court terme, l'hydrogène devrait alimenter l'industrie et substituer petit à petit les hydrocarbures tels que le mazout et le gaz naturel. À plus long terme, il pourrait devenir l'option principale en matière de carburant pour les poids lourds avant d'occuper le marché des véhicules légers. La logistique de l'hydrogène est ainsi un point crucial car ce vecteur énergétique devra être acheminé du producteur vers les consommateurs : les industries et les stations-services devront être approvisionnées par conduite ou par camion.

Selon les perspectives énergétiques 2050+, l'hydrogène ne devrait représenter que le 3% environ de la consommation totale d'énergie en Suisse¹. Néanmoins, pour ne pas risquer d'être exclue du réseau qui se développe actuellement en Europe, la Suisse doit être prête du point de vue législatif pour que le transport d'hydrogène par conduite puisse se faire dans un cadre légal approprié.

Dans ce cadre, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), et plus précisément la section « Droit du marché de l'énergie et du transport par conduites » a constitué un groupe de travail composé de plusieurs acteurs de la branche qui se sont rencontrés régulièrement courant 2023 et auquel CSD Ingénieurs SA a pris part dès le mois d'avril 2023.

1.2 Objectifs de l'étude

Les objectifs de l'étude sont définis dans le cahier des charges (Projektauftrag) élaboré par l'OFEN et daté du 28.02.2023. En ce qui concerne les prestations de CSD Ingénieurs, les points à traiter étaient les suivants :

- 1. L'élaboration d'un rapport comprenant :
 - a) une analyse de la situation sur les contraintes techniques et les risques liés au transport d'hydrogène dans les installations de transport par conduites et les solutions mises en place dans les pays de l'UE ;
 - b) une analyse de la conformité (comprenant les éventuels modifications/ajouts à apporter) des lois et ordonnances actuellement en vigueur en Suisse au regard du transport d'hydrogène dans les installations de transport par conduites, en particulier concernant :
 - la loi fédérale sur les installations de transport par conduites de combustibles ou carburants liquides ou gazeux (LITC : RS 746.1);
 - l'ordonnance sur les installations de transport par conduites de combustibles ou de carburants liquides ou gazeux (OITC : RS 746.11) ;
 - l'ordonnance concernant les prescriptions de sécurité pour les installations de transport par conduites (OSITC : RS 746.12).
 - c) une analyse des spécificités de l'hydrogène vis-à-vis des risques d'accidents majeurs selon l'Ordonnance dur la protection contre les accidents majeurs (OPAM : RS 814.012).
 - 2. La participation aux réunions organisées par le mandant.

¹ Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 20.4709 Candinas, 18 décembre 2020, Hydrogène. Etat des lieux et option pour la Suisse, Berne, 15.11.2023



Au fil du mandat, la vérification des risques d'accident majeur liés au transport d'hydrogène par rapport au transport de gaz naturel a demandé une plus grande attention afin d'accompagner les décisions sur la limite d'assujettissement des conduites à la LITC e aux ordonnances annexes.

Le présent rapport est une synthèse des résultats présentés au groupe de travail sous forme de Power Point durant les séances de travail.

2 Etape 1 : Recherche bibliographique

Le thème de l'hydrogène occupe une part importante dans la recherche de solutions pour la décarbonation de l'énergie et la lutte contre le réchauffement climatique. Les publications scientifiques sur le sujet sont ainsi très nombreuses et le savoir évolue très vite. Il a fallu ainsi effectuer une sélection importante d'articles rendue possible, entre autres, par les échanges avec le groupe de travail.

La recherche bibliographique a été axée essentiellement sur trois thèmes majeurs :

- 1. Le transport de l'hydrogène en Europe : état actuel, perspectives, état de l'infrastructure, planification du réseau, etc. ;
- 2. Contraintes techniques du réseau existant en vue de l'injection d'hydrogène dans le réseau de transport haute pression de gaz naturel : problématiques liées aux matériaux des conduites, perte de charge, pression de transport, etc. ;
- 3. Evolution du risque à la suite de l'introduction dans le réseau existant d'un mélange gaz naturel hydrogène ;

Une synthèse des bases bibliographiques pour chaque thème traité est présentée dans les chapitres suivants.

2.1 Le transport d'hydrogène en Europe

2.1.1 Réseau principal de transport d'hydrogène en Europe

La stratégie de développement du réseau de transport d'hydrogène en Europe est décrite dans le document « European Hydrogen Backbone, A european hydrogen infrastructure vision covering 28 countries, avril 2022 » [5]. L'initiative European Hydrogen Backbone (EHB) regroupe 31 entreprises gestionnaires d'infrastructures liées à l'énergie établies dans 28 pays dont l'objectif est de créer un réseau de transport d'hydrogène d'environ 50'000 km avant 2040, en réutilisant en partie le réseau actuel utilisé pour le gaz naturel.

L'entreprise FluxSwiss, actionnaire minoritaire de l'entreprise Transitgas AG (46%)², qui est propriétaire de la conduite de gaz à haute pression qui traverse la Suisse pour connecter l'Italie à l'Allemagne et à la France, fait partie de l'initiative EHB et est active dans le développement de ce réseau.

Le réseau serait composé par 5 corridors majeurs (Mer du nord, Pays du nord et pays baltiques, Europe de l'est, Afrique du nord et Italie et Europe du sud-ouest) et à l'horizon 2040 se présenterait comme illustré dans la figure ci-après. La Suisse serait alors traversée par le réseau hydrogène qui utiliserait la conduite de transport de gaz naturel Transitgas reconvertie.

² Transitgas AG, Annual Report 2022





Figure 2.1 European Hydrogen Backbone, projection du réseau à 2040 [5]



De très nombreuses initiatives, publiques et privées, se développent autour de l'hydrogène et portent sur de multiples thématiques, telles que la durabilité de la filière (environnementale et économique), l'acceptation publique de l'hydrogène en substitution des carburants fossiles classiques, les possibilités d'utilisation finale, les types de production, la sécurité, etc.

Un thème important pour la présente étude, est l'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel en vue de la conversion du réseau, du point de vue de la sécurité.

2.1.2 Conversion du réseau actuel de gaz naturel et injection d'hydrogène

De nombreuses études traitent du mélange H₂-CH₄ dans le réseau existant de transport de gaz naturel, sous différents aspects.

À l'heure actuelle, l'injection de petits volumes d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel est déjà autorisée jusqu'à une limite qui ne comporte aucun impact sur la qualité du produit livré aux clients finaux ni sur l'infrastructure de transport et de distribution. L'Allemagne autorise jusqu'à 10% d'H₂ (DVGW), tandis que la France arrive jusqu'à 6% (GRT Gaz). En Suisse, la limite actuelle est fixée à 2% (Gazenergie).

Le projet HIGGS (Hydrogen in Gas Grids), avec la publication D6.1 Review of the potential of H₂ injection in European grids [10], offre une vision complète et actuelle du potentiel d'injection d'hydrogène dans le réseau de transport européen, du point de vue des besoins pour chaque pays à moyen et long terme mais également du point de vue des contraintes techniques.

Il retrace tout d'abord un état des lieux des caractéristiques techniques et constructives des conduites dans les différents réseaux de transport de gaz naturel afin de vérifier la compatibilité internationale de ceux-ci. L'étude analyse ensuite le potentiel d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel et définit, d'après politique énergétique, quel pays sera exportateur d'H₂ et quel pays, comme la Suisse, sera importateur.

En simulant différents scénarios basés sur une demande d'hydrogène croissante, les connexions entre pays exportateur et pays importateur ont été définies. Selon l'étude, deux points sont intéressants à relever pour la Suisse : notre pays serait un pays importateur dans le scénario à moyen terme 2030 et il serait également le pays par lequel transiterait l'hydrogène pour l'Italie en provenance de l'Allemagne. L'accent est également mis, dans cette étude, sur l'importance d'une harmonisation dans l'injection d'hydrogène dans le réseau afin de garantir l'homogénéité transfrontalière.

Un autre thème important qui fait l'objet de nombreuses études est le pourcentage d'hydrogène qui peut être injecté dans le réseau de transport du gaz naturel existant. A l'heure actuelle, de nombreuses études démontrent que l'ajout de 20% en volume de H₂ dans le réseau du gaz naturel ne demande pas d'adaptations majeures du réseau et des installations annexes [6]. Le rapport de l'IEA Hydrogen in the grid [12] présente une synthèse des limites de volume d'hydrogène qu'il est prévu d'injecter dans les différents réseaux nationaux.

En ce qui concerne les réseaux de distribution, d'autres études montrent également que jusqu'à 20% de H₂, aucune adaptation de l'infrastructure n'est nécessaire [6], [9]. Dans le rapport Hydrogen Research Project de 2022, la DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches) conclut qu'actuellement, d'un point de vue purement technique, le réseau de distribution allemand peut fonctionner avec 10% d'H₂; dans le futur, jusqu'à 20% d'H₂ pourront être transportés dans le réseau actuel afin de répondre à une augmentation projetée de la demande dans le pays [13]. En Suisse, une étude de la SSIGE [14] a testé et démontré que dans un réseau de distribution, il était possible d'injecter jusqu'à 20% en volume d'hydrogène. Pour le réseau à basse pression (P< 5 bar), la limite de 20% est également mentionnée dans la directive G18 Qualité du gaz éditée par la SSIGE.

Dans ce contexte, citons également l'association HIPS-NET qui est composée de 40 partenaires européens qui a pour objectif d'établir une entente paneuropéenne concernant la concentration de H₂ dans le réseau de gaz naturel et la tolérance au mélange de l'infrastructure existante.

La figure ci-après, reprise de [6], montre les coûts d'adaptation du réseau rapportés à différentes proportions d'hydrogène injectées. Jusqu'à 20% d'hydrogène injecté, les investissements pour l'adaptation du réseau sont moindres et concernent surtout les usagers finaux, la distribution et le stockage. Les coûts liés à l'adaptation du réseau de transport deviennent importants à partir d'environ 20% d'hydrogène.





Figure 2.2 Synoptique des coûts d'adaptation à différents taux d'hydrogène [6]

2.2 Contraintes techniques du réseau

De très nombreuses études ont été menées sur les effets de l'introduction d'hydrogène dans le réseau existant de gaz naturel, du point de vue des contraintes techniques de l'infrastructure.

La fragilisation de l'acier par l'hydrogène est un phénomène qui a largement été étudié [15], [16], [17]. L'atome d'hydrogène est petit et est susceptible d'être absorbé par l'acier, facilitant ainsi la fissuration et la fragilisation du matériau, ainsi que la corrosion des tuyaux. Il existe aujourd'hui deux approches pour expliquer la fragilisation de l'acier par l'hydrogène : l'interaction de la surface intérieure de la conduite avec l'humidité condensée et l'hydrogénation par l'hydrogène gazeux transporté dans la conduite.

Une autre contrainte technique est la perte de charge du flux de gaz dans la conduite liée à l'introduction d'hydrogène dont la molécule, H2, est considérablement plus petite et plus légère de celle du gaz naturel (CH4). Cette problématique a un effet sur l'efficacité énergétique du transport car l'hydrogène ralentit de manière importante la vitesse d'écoulement [18], [19], [18].

D'autres sujets ont également été largement étudiés comme la compatibilité des matériaux et des installations annexes (pompes, compresseurs, détendeurs, compteurs, etc.), la possibilité de séparer l'hydrogène du gaz naturel en fin de réseau pour satisfaire les utilisateurs finaux, l'évaluation de la tolérance des équipements avals à un taux d'hydrogène variable, la capacité des fabricants à développer de nouveaux équipements à un coût raisonnable...

En accord avec le groupe de travail, et en particulier suite aux échanges avec les experts techniques de la branche (SSIGE, Association des producteurs de H₂), il est admis que les contraintes techniques sont d'ores et déjà connues et en partie maitrisées par la branche. Ces contraintes ont été en partie intégrées dans les normes et les directives techniques qui régulent les réseaux à bas volume (pour différenciation entre bas et haut volume, cf. chapitre 4.2) actuels et futurs. Lesdites contraintes ont été discutées lors d'une séance téléphonique bilatérale avec la SSIGE (23.06.2023). Ci-dessous, une recommandation suisse importante pour le secteur de l'hydrogène, qui réglemente la technique des installations transportant de l'hydrogène à bas volume :

- SSIGE, Regelwerk H1000, Empfehlung zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff, 2023

La présente recommandation est basée sur la législation nationale, européenne et internationale et servira de base pour la définition des lignes directrices pour la planification, la construction et l'utilisation des installations



de transport par conduite de l'hydrogène à bas volume. Son champ d'application est illustré dans la figure suivante.



Figure 2.3 Champ d'application de la recommandation SSIGE H1000 [20]

Le document offre une vision des directives et des normes existantes aujourd'hui dans d'autres pays et notamment en Europe (normes EN). Il synthétise les connaissances qui sont acquises dans le domaine. La recommandation pourrait être en partie valable pour les nouvelles conduites qui transporteront de l'hydrogène pur à bas volume. D'autres directives sont actuellement en cours d'élaboration parallèlement à ce qui est fait dans l'Union européenne. Les directives et normes qui seront applicables en Suisse pour le transport de l'hydrogène pur à bas volume seront de toute manière déterminées par l'OFEN.

S'agissant des conduites transportant de l'hydrogène à haut volume, l'Inspection Fédérale des Pipelines (IFP) est compétente pour la rédaction d'une directive adaptée.

Pour conclure, hormis la recommandation du SSIGE pour les conduites qui transporteront de l'hydrogène pur à bas volume, il n'existe à l'heure actuelle pas encore de réelles règles techniques traitant spécifiquement du transport de l'hydrogène au niveau Suisse. Des directives de l'IFP et de nouvelles directives du SSIGE sont néanmoins attendues pour 2024. En l'absence de telles directives, une modification des critères d'assujettissement à l'OSITC pour les hydrogénoducs semble risquée, ceci dans la mesure où elle conduirait à une application exclusive des règles de la technique (et non de l'entièreté de l'OSITC), alors même que ces règles ne sont que très partiellement adaptées au transport d'hydrogène pur. Cet avis est partagé tant par la SSIGE que par l'IFP.

Pour le surplus, les contraintes techniques brièvement décrites dans ce chapitre servent de base de réflexion pour la définition des probabilités de rupture d'une conduite transportant de l'H₂ dans les différentes méthodologies d'analyse des risques qui existent déjà ou qui doivent encore être définies.

2.3 Evolution du risque à la suite de l'introduction dans le réseau existant d'un mélange gaz naturel – hydrogène

Comme on le constate, de très nombreux articles traitent des possibilités techniques, des coûts de l'adaptation du réseau actuel, de la compatibilité pour les utilisateurs finaux, etc. Cependant, l'introduction d'hydrogène dans le réseau du gaz naturel présente également des enjeux importants du point de vue des risques d'accident.

Ce sujet est traité dans de nombreux articles de la littérature. Il s'agit cependant d'une problématique qui évolue dans la mesure où certains aspects sont, encore aujourd'hui, en cours d'étude.

Dans le cadre de la présente analyse, les effets liés à l'introduction d'hydrogène à différents pourcentages dans le réseau de gaz naturel, ont été répertoriés sur la base des diverses méthodologies développées dans les pays européens. Au vu de l'importance de ce sujet, le chapitre 3 de la présente étude y est dédié.



3 Etape 2 : Analyses des risques sur les mélanges CH₄-H₂ dans la littérature

Plusieurs analyses des dommages et des risques liés à l'introduction d'un mélange hydrogène-gaz naturel dans les conduites de transport existantes ont été effectuées et sont ainsi présentées dans ce chapitre. L'objectif est de comparer les diverses méthodologies utilisées actuellement vis-à-vis de l'ampleur des impacts d'un accident impliquant un mélange $CH_4 - H_2$ à différents pourcentages d'hydrogène.

3.1 Caractéristiques physiques de l'hydrogène et du gaz naturel (CH₄)

Dans un premier temps, il est nécessaire de comprendre les différentes caractéristiques, notamment physiques, des deux gaz. Celle-ci sont présentées dans le tableau ci-après qui est repris de la norme H1000.

Kenngrösse	Einheit	Wasserstoff	Methan		
Chemische Summenformel		H ₂	CH₄		
Molare Masse	kg/kmol	2.0159	16.043		
Dichte ¹	kg/m³	0.08989	0.7175		
Relative Dichte ¹	-	0.0695	0.555		
Siedepunkt	°C	-252	-161		
Schmelzpunkt	°C	-259	-183		
Brennwert ² , H _{s,n}	MJ/m ³	12.745	39.831		
	kWh/m³	3.540	11.064		
	kWh/kg	39.41	15.42		
Heizwert ² , H _{l,n}	MJ/m³	10.782	35.894		
	kWh/m³	2.995	9.971		
	kWh/kg	33.33	13.90		
Oberer Wobbe-Index ² , W _{S,n}	MJ/m³	48.336	53.369		
	kWh/m³	13.427	14.853		
Unterer Wobbe-Index ² , W _{I,n}	MJ/m ³	40.892	48.184		
	kWh/m³	11.359	13.384		
Dynamische Viskosität (20°C)	kg/ms	8.8*10 ⁻⁶	11.0*10 ⁻⁶		
Kinematische Viskosität ²	m²/s	106*10 ⁻⁶	16.7*10 ⁻⁶		
Zündtemperatur in Luft	°C	530	645		
Mindestzündenergie (MZE)	mJ	0.02	0.29		
Untere Explosionsgrenze (UEG) in Luft ³	vol-%	4.0	4.4		
Obere Explosionsgrenze (OEG) in Luft ³	vol-%	77.0	16.5		
Max. Flammgeschwindigkeit (laminar, Luft)	cm/s	346	43		
Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)	vol-%	4.3	9.9		
Maximaler Explosionsdruck	bar	8.3	8.1		
Normierter zeitlicher Druckanstieg, K _G -Wert	bar/ms	800	52		
Gerätegruppe	IIA				
 ¹: im Normzustand (bei 0°C, p=1.01325 bar) ²: Referenzbedingungen im Normzustand 25°C / 0°C bei p=1.01325 bar ³: bei 20°C, p=1.01325 bar 					
Daten aus [1, 2], ISO/TR 15910:2015-12, HYPOS-Leittaden Wasserston-Sicherheit					

Tableau 3.1Propriétés physiques de l'hydrogène et du méthane

Le dihydrogène (H₂) est la forme moléculaire de l'élément hydrogène. Aux conditions normales de température et de pression, il existe à l'état gazeux en tant que gaz inodore et incolore.

Le dihydrogène a une masse molaire et une densité qui sont environ 8 fois plus petites que celles du méthane. C'est un gaz inflammable qui a une réactivité élevée du fait que sa plage d'explosivité est particulièrement étendue. La limite inférieure d'explosivité (UEG dans le Tableau 3.1) est fixée à 4% de volume d'H₂ dans l'air et la limite supérieure d'explosivité (OEG) est fixée à 77%. À titre de comparaison, le méthane présente une plage d'explosivité comprise entre 4.4% et 16.5% de volume de CH₄ dans l'air.



3.2 Etude K. Stoleka

Dans son étude Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network [21], K. Stoleka se penche sur les effets d'un feu de torche pour trois différents scénarios : 100% CH₄, 80% CH₄ - 20% H₂ et 50%CH₄ - 50%H₂.

Le feu de torche est considéré ici comme le scénario le plus probable en raison notamment de la haute probabilité d'ignition de l'hydrogène. L'énergie d'inflammation de H₂ est environ 14 fois plus faible que celle du CH₄ (respectivement 0.02 mJ et 0.29 mJ). Une fuite d'hydrogène peut ainsi s'enflammer facilement à cause de la friction du gaz avec le métal de la conduite ou par électricité statique.

Les scénarios étudiés sont synthétisés dans le tableau ci-après.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Gas composition:			
methane, %	100	80	50
hydrogen, %	-	20	50
Initial parameters:			
pressure, bar	16/70	16/70	16/70
temperature, ℃	15	15	15
Atmospheric conditions:			
wind speed, m/s	1.5	1.5	1.5
air temperature, ℃	20	20	20
humidity, %	88	88	88

Figure 3.1 Scénarios étudiés par K. Stoleka

Les modélisations du feu de torche sont faites avec le programme PHAST v6.7 et sont basées sur le modèle de Chamberlain.

Les rayons d'impact pour les scénarios 1 et 2 sont présentés dans les figures ci-après. En vert la limite de 4 kW/m² (flux thermique) qui génère les premières blessures chez les personnes exposées, en bleu la limite de 12.5 kW/m² qui correspond à 1% de létalité après 1 minute d'exposition et en rouge la limite de 37.5 kW/m² qui provoque 1% de létalité après 10 secondes d'exposition.

Scénario 1 (100% CH4) : rayons d'impact pour une rupture totale d'une conduite de 10km, d'un diamètre de 10 cm et d'une pression de 16 bar.



Figure 3.2 Scénario 1 100% CH4 (D=10cm, p=16bar, L=10 km)



Scénario 2 (80% CH₄ et 20% H₂) : rayons d'impact pour une rupture totale d'une conduite de 10km, d'un diamètre de 10 cm et d'une pression de 16 bar.



Figure 3.3 Scénario 2 80% CH₄ et 20% H₂ (D=10cm, p=16bar, L=10 km)

Les résultats pour les scénarios 1 et 2 montrent qu'en ajoutant 20% d'hydrogène dans le gaz naturel, l'ampleur des rayons d'impact diminue.

Les dommages sur les personnes dépendent du type de rupture (petite fuite ou rupture totale) et par conséquent, du volume relâché, comme présenté dans les figures suivantes.









(d=15 cm, P=70 bar, L=20km)

(d=15 cm, P=70 bar, L=20km)

Figure 3.4 Taux de fuite et flux thermiques pour différents scénarios

L'ampleur des dommages (flux thermiques) est directement proportionnelle au taux de fuite. L'ajout d'hydrogène dans le mélange comporte une réduction du taux de fuite et par conséquent, une réduction du périmètre où des effets sont ressentis.

Les conclusions de l'étude montrent que l'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel contribue à réduire l'ampleur des dommages liés à une fuite de gaz induisant un feu de torche à partir d'une conduite de transport à haute pression. Les effets diminuent avec l'augmentation de la part d'hydrogène dans le mélange, ceci pour une proportion de 80%CH₄ - 20%H₂ et de 50%CH₄ - 50%H₂.

3.3 Etude Froeling, Dröge, Nane, Van Wijk

L'étude « Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipeline » [22] évalue les effets d'une rupture totale d'une conduite à haute pression en admettant qu'il s'agit du seul scénario pertinent du point de vue des risques majeurs. L'étude présente les résultats pour un transport 100% gaz naturel et un transport 100% hydrogène.

À la suite de la rupture spontanée d'une conduite à haute pression enterrée, en cas d'ignition retardée, un nuage de gaz se forme et produit une boule de feu. Celle-ci est suivie d'un feu de torche qui se réduit au fur et à mesure que le taux de fuite diminue en raison de la décompression de la conduite.

En accord avec le Dutch Decree on the External Safety of Pipeline (Bevb), seules les conséquences du feu de torche ont été étudiées par les auteurs. De plus, les effets de surpression ne sont pas analysés car seuls les impacts liés à la radiation thermique sont considérés comme pertinents dans ce cas de figure.

Les causes d'une rupture de la conduite sont reprises des données fournies par l'EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group)³. En effet, les auteurs considèrent que la plupart des causes de rupture sont indépendantes de la substance transportée à l'intérieur de la conduite.

La problématique de la fragilisation de l'acier causée par l'H₂ a été largement étudiée dans le cadre du projet NaturalHy (www.gerg.eu). La seule forme de fragilisation observée est l'augmentation des fissures dans l'acier qui peut toutefois être contrôlée en réglant les variations de pression à l'intérieur de la conduite. Etant donné

³ Les mêmes valeurs sont reprises dans le Rapport-Cadre de l'Industrie gazière suisse pour le calcul du taux de rupture des conduites de gaz naturel [25].



245.5/363.0

228.0 / 342.1

5 m/s

9 m/s

que la problématique de l'augmentation des fissures est bien connue et que les variations de pression à l'intérieur des conduites sont généralement peu nombreuses et de faible ampleur, l'étude assume que l'injection d'H₂ dans les conduites existantes n'est pas considérée comme une cause supplémentaire de rupture. L'arbre des causes pour les gazoducs et les probabilités d'occurrence associées sont valables pour le transport d'H₂.

La probabilité d'ignition de 100% est prise en compte vu la très faible énergie d'inflammation de l'hydrogène et en accord avec le RIVM [24].

Les modélisations sont effectuées à l'aide du programme SAFETI-NL v8.21 et le modèle de Chamberlain est utilisé pour le calcul du flux thermique. Les résultats des modélisations sont présentés dans le tableau ci-après.

Table 2 — The flame characteristics calculated with SAFETI-NL v8.21, specified for hydrogen and natural gas (H ₂ /NG), released from a 16" and 36" pipeline with an initial pressure of 66 bar. Also, the flame characteristics are influenced by the wind forces and, therefore, specified for four additional scenarios where the wind velocity is defined in m/s. Based on the flame characteristics, the flame surface area (using the flame length and the two widths of the truncated cone) and the surface emissive power of the flame (using Eq. (6)) are calculated.								
Scenar	io	1	\overline{w}	h	heta	S	Qs	
16"	1.5 m/s	163.2 / 238.6	37.5 / 70.5	34.2 / 40.7	4.0 / 8.0	22.3 / 61.8	272 / 235	
	3 m/s	140.3 / 208.8	34.9 / 66.4	24.9 / 25.2	8.1 / 15.9	18.1 / 51.6	336 / 281	
	5 m/s	125.7 / 188.7	33.3 / 60.3	18.1 / 15.2	13.5 / 25.3	15.6 / 42.8	388 / 339	
	9 m/s	118.5 / 176.6	32.2 / 50.7	11.6 / 7.3	24.5 / 35.2	14.5 / 34.2	419 / 424	
36"	1.5 m/s	327.9 / 472.2	69.7 / 126.5	76.0 / 99.8	2.1 / 4.1	82.9 / 216.5	351 / 363	
	3 m/s	277.9 / 405.5	63.0 / 118.3	59.8 / 73.1	4.0 / 8.3	63.8 / 175.7	456 / 447	

where: l—flame length in m, \overline{w} —average width of the flame in m, *h*—flame lift-off in m, θ — flame angle (with respect to the vertical) in degrees, S—flame surface area in 10³ m², Q_s—surface emissive power of the flame in kW/m.²

48.0/53.5

37.1/35.1

7.0/13.8

12.6 / 24.8

53.1 / 151.3

49.2 / 139.8

547 / 520

590 / 562

Figure 3.5 Caractéristique de la flamme modélisée pour une conduite de 16" et 36" à 66 bar et transportant de l'H2 ou du CH4

59.1/112.7

58.3 / 109.3

La flamme d'un feu de torche de méthane est toujours plus longue que la flamme de l'hydrogène et ceci en tenant compte de différentes vitesses de vent. De même, la surface de la flamme est considérablement plus étendue pour le méthane que pour l'hydrogène. Ces données sont présentées graphiquement dans la figure suivante.



Figure 3.6 Représentation des flammes pour le gaz naturel et l'hydrogène en considérant un vent à 1.5 m/s et un vent à 9 m/s



D'après ces modélisations, le feu de torche lié à une fuite d'hydrogène est moins étendu et moins incliné que pour le gaz naturel, cela en cas de situation de calme relatif ou avec un vent de 9 m/s.

L'évolution du flux thermique avec la distance au point de départ de la flamme est illustrée dans le présent schéma.



Figure 3.7 Flux de chaleur pour un feu de torche de méthane et d'hydrogène pour une conduite de 36", 66 bar et distance

Le flux de chaleur des flammes d'hydrogène est inférieur aux flux de chaleur émanant d'une flamme de méthane pour les deux vitesses de vent prises en compte.

Par conséquent, les létalités sont illustrées comme suit.



Figure 3.8 Létalités pour une conduite de 36" et 66 bar

La libération de H₂ est associée à des létalités plus faibles que la libération de CH₄ et diminue plus rapidement lorsqu'on s'éloigne du point de rupture.

En conclusion, le risque individuel est présenté sous forme de schéma.



Figure 3.9 Risque individuel calculé pour tous les scénarios

Le risque individuel (fréquence de rupture*probabilité d'inflammation*létalité pour tous les scénarios) est la probabilité de décès d'un individu qui stationne en continu à proximité de la conduite.



Les conclusions de l'étude montrent que la libération d'H₂ est associée à des létalités plus faibles que la libération de CH₄ dans le cas d'un feu de torche. Le risque individuel à proximité de la conduite est toutefois plus élevé pour une conduite 16" transportant de l'H₂ que pour le CH₄. Ceci est dû à la plus haute probabilité d'inflammation de l'H₂ (100% vs. 20% pour le CH₄ pour une conduite de 16"). La létalité de l'H₂ diminue cependant rapidement avec la distance à la conduite et le risque individuel lié à une fuite de CH₄ (16") devient plus important à partir d'une certaine distance.

3.4 Propriétés dangereuses des mélanges hydrogène / gaz naturel et impact potentiels sur les risques (INERIS)

En 2019, L'institut national (français) de l'environnement industriel et des risques (Ineris) publiait le document « Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel : état des lieux et perspectives » [26].

Le chapitre 6 de l'étude, « Propriétés dangereuses des mélanges hydrogène / gaz naturel et impacts potentiels sur les risques » analyse dans le détail la limite d'hydrogène injecté à partir de laquelle le mélange n'est plus considéré comme du gaz naturel du point de vue des risques.

Selon l'INERIS, deux phénomènes dangereux sont attendus en cas d'inflammation d'une fuite de gaz naturel ou de mélange gaz naturel-hydrogène : l'explosion du nuage de gaz et le feu de torche.

3.4.1 Explosion du nuage de gaz

L'ajout d'hydrogène a une influence sur les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité du gaz naturel. Cette influence est négligeable en ce qui concerne la limite inférieure d'explosivité, la pression maximale d'explosion et la température d'auto-inflammation. Cependant, la limite supérieure d'explosivité et la vitesse maximale de montée en pression augmentent avec la teneur en hydrogène. Le tableau ci-après montre les résultats expérimentaux obtenus par l'INERIS et par le Bundesanstal für Materialforschung und Prüfung (BAM).

Tonour			
d'hydrogàna			
dane lo móthano	LIE	I SE	010
	e e e e e e e e e e e e e e e e e e e	l'und	le l
(%voi)	76V01	76V01	70001
Re	sultats experimer	itaux INERIS [6]	
0	4,8	17,2	10,0
4	4,8	18,0	9,5
8	5,0	19,0	9,4
12	5,0	19,4	9,1
16	4,8	20,2	9,0
20	4,6	21,0	8,8
Ré	ésultats expérime	ntaux BAM [12]	
0	4,2	16,6	10,1
5	4,2	17,4	9,8
10	4,2	18,2	9,6
25	4,2	21,2	9,1
50	4,0	29,0	7,9
100	4,1	75,6	4,3

Tableau 3.2Limites d'explosivité et concentration limite en oxygène issus des essais à conditions atmosphérique de l'INERIS et du BAM

D'une manière générale, la surpression due à une explosion est liée à la vitesse à laquelle la flamme se propage dans le mélange inflammable. L'ajout d'hydrogène a un effet sur la vitesse de propagation de la flamme qui augmente avec les concentrations en H₂.

Les évaluations effectuées par l'INERIS montrent néanmoins que dans le contexte des conduites de transport, l'injection jusqu'à 20% d'hydrogène produirait une augmentation limitée des effets.

À noter que dans le cadre de la directive ATEX, le classement selon la norme ISO/IEC 80079-20-1 :2017 pour un mélange contenant jusqu'à 25% de volume d'hydrogène, est identique à celui du gaz naturel pur.



3.4.2 Feu de torche

Le feu de torche dépend essentiellement de la pression et de la température du produit à l'intérieur de la conduite, de sa nature et de la taille de la brèche.

Au vu de la faible densité de l'hydrogène, sa présence dans le mélange aura comme conséquence de limiter le débit massique de rejet et d'accélérer la décompression de la conduite. La flamme sera alors moins étendue et le rayonnement thermique reçu par une cible diminuera.

Selon les modélisations effectuées par l'INERIS, les effets associés à un feu de torche diminuent lorsque le mélange CH₄-H₂ présente un taux d'hydrogène allant jusqu'à 80%.

3.5 Méthode de calcul du risque : exemples de la France, de la Belgique et des Pays Bas

Plusieurs pays européens ont établi une méthode de calcul des risques qui intègre la problématique du transport par conduite de l'hydrogène.

3.5.1 France

En France, le « Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport » [27] définit un arbre des conséquences communs pour tous les gaz inflammables :



Figure 3.10 Méthodologie française : arbres des conséquences pour les gaz inflammables (GESIP [27])

Malgré les spécificités des produits transportés, les conduites présentent de nombreuses similitudes quant aux règles de conception, aux méthodes de construction et aux modes d'exploitation. Cette constatation justifie, selon le guide, l'application d'une même méthode d'appréciation des dangers afin de s'assurer que les ouvrages présentent un niveau de risque maîtrisé.

Le scénario d'accident retenu pour une conduite transportant de l'hydrogène est un rejet vertical suite à la perte de confinement au milieu d'une canalisation de 30 km (rupture totale).

Le guide précise que la possibilité d'un UVCE (unconfined vapor cloud explosion) est à définir au cas par cas selon les caractéristiques du gaz.

Selon l'échelle des dommages présentée dans le document, les effets les plus graves concernant l'H₂ sont à imputer à une surpression tandis que pour le CH₄ c'est le rayonnement thermique qui provoque les impacts plus importants. Notons néanmoins que les valeurs limites pour les effets de la surpression considérés dans le guide français sont plus contraignantes que celles du rapport cadre (50 mbar vs 400 mbar).

En ce qui concerne la probabilité d'ignition, le guide considère 59% pour une brèche inférieure à 12 mm et 100% pour une brèche de taille plus grande.

L'INERIS [26] traite également de la probabilité d'ignition d'un mélange gaz naturel-hydrogène et base ses réflexions sur le retour d'expérience. La probabilité d'ignition pour le gaz naturel est égale à 10% ou 33% selon le diamètre de la conduite. Pour l'hydrogène, c'est une probabilité de 100% qui est considérée, valeur prise en compte dans la plupart des études effectuées jusqu'à présent. Pour des mélanges contenant moins de 20% d'hydrogène, les valeurs d'énergie minimale d'inflammation restent proches des valeurs pour le gaz naturel. Ainsi **l'INERIS considère que pour un mélange allant jusqu'à 20% d'hydrogène, la probabilité d'ignition est identique à celle du gaz naturel.**



3.5.2 Belgique

En Belgique, le « Code technique relatif à l'analyse de risque pour les installations de transport de produits inflammables et oxydants » [28] propose également un arbre des conséquences commun à tous les gaz classés comme inflammables.



*: la rupture d'une conduite s'accompagne d'une explosion physique et d'effets de surpression.

Figure 3.11 Méthodologie belge : arbre des conséquences pour les gaz inflammables [28]

À l'instar de la méthodologie française, l'approche belge considère à la fois les effets du rayonnement thermique (feu de torche et flash fire) et les effets de surpression liés à une explosion (Vapour Cloud Explosion).

Les probabilités d'ignition, qui déterminent la fréquence des scénarios d'effets, sont présentées dans le tableau ci-après.

Terme source				Pr	obabilité		
Continu	Instantané		Grou	p <mark>e</mark> O	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
[kg/s]	[kg]		Réactivité moyenne/haute	Réactivité basse			
< 10	< 1.000	PD	0.2	0.02	0.065	0.02	0.006
		Pv	0.06	0.02	0.07	-	-
		PE	0.2	0.2	0.2	-	-
10-100	1.000-10.000	PD	0.5	0.04	0.065	0.02	0.006
		Pv	0.2	0.04	0.07	-	-
		PE	0.3	0.3	0.2	-	-
>100	> 10.000	PD	0.7	0.09	0.065	0.02	0.006
		Pv	0.7	0.1	0.07	-	-
		PE	0.4	0.4	0.2		-

Tableau 3.3Méthode belge : Probabilité d'ignition pour les gaz inflammables [28]

Pour une fuite importante d'hydrogène (troisième cas de figure), la probabilité d'une inflammation directe (feu de torche) vaut 0.7, la probabilité d'une ignition retardée avec explosion (VCE et feu de torche) vaut 0.084, l'inflammation retardée sans explosion (flash fire ou boule de feu et feu de torche) vaut 0.126 et la probabilité que la fuite ne s'enflamme pas vaut 0.09.

La méthode belge considère qu'en cas de rupture d'une conduite à haute pression transportant de l'hydrogène, la conséquence la plus fréquente est le feu de torche tout en tenant compte de la possibilité d'inflammation retardée générant une explosion ou une boule de feu.



3.5.3 Pays Bas

Le Reference Manual for Bevb Risk Assessments (NL) [24], considère une probabilité d'ignition pour l'hydrogène très élevée en raison de la faible énergie d'inflammation. La relation entre la probabilité d'ignition et le moment de l'inflammation (immédiate ou retardée) n'est pas clairement définie dans la littérature. Ainsi le Bevb considère que dans le cas d'une rupture totale ou d'une fuite d'une conduite d'hydrogène, le flux serait suffisamment turbulent pour que l'ignition advienne dans les 20 premières secondes après le début de l'évènement.

L'hydrogène est préalablement inscrit dans la catégorie des gaz inflammables. Les conséquences liées à une fuite d'hydrogène sont illustrées dans les tableaux suivants.

Hazard classi- fication	Immediate ignition	Delayed ignition	No ignition
Flammable			
Gas	Jet fire	N/A	N/A
Liquid	Pool fire	Flash fire + pool fire	N/A
Pressurised liquefied gas	Jet fire	N/A	No effect
Тохіс			
Gas	N/A	N/A	Toxic effects
Liquid	N/A	N/A	Toxic effects

Figure 3.12 Evènements normés pour la rupture totale ou une fuite d'une conduite à haute pression (RIVM) [24]

	Pimmediate	Pdelayed
Gases		
- rupture and leak	1*	0
Pressurised liquefied		
gases	03	0
- rupture	0.14	0
- leak	0.14	0
Liquids (K ₀)		
 rupture and leak 	0.065	0.935

* Only relates to hydrogen; given the low ignition energy a rupture is expected to always lead to ignition.

Figure 3.13 Probabilité d'ignition pour une rupture totale ou une fuite (RIVM) [24]

La méthode de calcul du risque des Pays Bas considère qu'en cas de fuite d'hydrogène à partir d'une conduite à haute pression, la conséquence la plus probable et qui génère de graves dommages est le feu de torche en raison de l'inflammation immédiate du gaz.

Les méthodes d'analyse de risque détaillées dans le présent chapitre montrent des différences, notamment en ce qui concerne l'étude des conséquences liées à la fuite d'hydrogène à partir d'une conduite à haute pression. La méthode des Pays Bas considère exclusivement les effets liés à un feu de torche, tandis que les méthodes française et belge tiennent compte également des effets de surpression liés à une explosion d'un nuage de gaz. Néanmoins, les probabilités qu'une ignition retardée avec explosion se produise restent faibles (0.084 selon la méthode belge et à définir au cas par cas pour la méthode française) en raison des nombreuses conditions qui doivent être remplies pour qu'une explosion survienne (ignition retardée, confinement, etc.).

Notons que la méthode d'analyse de risque présentée dans le rapport-cadre de l'industrie gazière suisse [25] n'a actuellement pas été mise à jour pour le transport de l'hydrogène par conduite.



4 Etape 3 : Modélisations des dommages

Le présent chapitre expose les résultats des modélisations réalisées avec le logiciel EFFECTS, version 12.0.1, élaboré par l'entreprise néerlandaise Gexcon. EFFECTS est le logiciel de référence pour les modélisations du risque d'accident majeur en Suisse⁴.

Dans un premier temps, les modélisations ont été effectuées pour une perte de confinement d'une conduite existante à haute pression transportant différents mélanges de gaz naturel et d'hydrogène. Dans un second temps, les évaluations ont porté sur des conduites de transport d'hydrogène pur.

Le logiciel EFFECTS a été adapté à plusieurs reprises pour rendre les modélisations de l'hydrogène plus pertinentes. Ainsi, Gexcon a fixé la valeur du rayonnement moyen à la surface de la flamme (SEP) à 70 kW/m² après avoir étudié le comportement d'une flamme d'hydrogène et constaté que la zone d'impact autour de la flamme était considérablement moins étendue que dans le cas d'une flamme de méthane. Le modèle de Chamberlain, utilisé jusqu'à présent pour modéliser les effets d'un feu de torche présentait, d'après Gexcon, des résultats trop importants pour l'hydrogène.

Le modèle de dispersion d'un nuage inflammable a également été adapté dans EFFECTS. Le programme prend en compte les hautes pressions auxquelles l'hydrogène peut potentiellement être transporté (200 – 900 bar) et simule les turbulences à l'intérieur du jet ainsi que la rapide dissolution du nuage.

La version 12 du logiciel EFFECTS, utilisée pour les modélisations présentées ici, inclut toutes les mises à jour concernant l'H₂ décrites ci-dessus.

Gexcon travaille actuellement sur de nouvelles adaptations qui concernent explicitement le transport de gaz par conduite, dont l'hydrogène. Courant 2024 un nouveau modèle de fuite sera vraisemblablement disponible pour modéliser les fuites de gaz à partir d'une conduite enterrée. Selon les premières informations à ce sujet⁵, les adaptations portent sur l'approfondissement des conséquences liées à la rupture totale d'une conduite de transport d'hydrogène à haute pression qui, si la conduite est enterrée, ne produirait pas forcément un feu de torche mais plutôt un incendie d'un nuage suite à la formation d'un cratère et aux interactions du gaz avec les parois de celui-ci. Cette réflexion serait pertinente uniquement pour les conduites enterrées. En cas de rupture de la conduite lors de travaux à proximité (intervention de tiers) ou même en cas de rupture à cause d'un mouvement de terrain, la conduite se retrouverait toutefois à l'air libre et le feu de torche surviendrait par conséquent. Cette approche est cependant en cours d'étude chez Gexcon et n'a donc pas été prise en compte dans la présente étude.

4.1 Conduites de transport

Par conduite de transport on entend le réseau à haute pression qui achemine le gaz sur de longues distances.

En accord avec le groupe de travail, le cas de figure d'un gazoduc de diamètre 12" (323.9 mm) et de pression 70 bar a été analysé pour une question de comparabilité avec les exemples du Rapport-Cadre [25], le but étant de calibrer les simulations EFFECTS sur les données du Rapport-Cadre pour le méthane.

⁴ Effects a été utilisé pour éditer le guide « Prévention des accidents majeurs liés aux installations frigorifiques, OFEV, 2015

⁵ Informations transmises par Gexcon lors d'une formation sur le logiciel EFFECTS organisée par l'Office fédéral des transports les 22 et 23 novembre 2023.



4.1.1 Modélisation de la libération de CH₄ et de H₂

La modélisation d'une rupture totale d'une conduite est réalisée en deux temps : la modélisation effectuée repose tout d'abord sur un modèle de fuite à partir d'une conduite (Gas release from long pipeline) qui donne un taux de fuite (kg/s) et une masse de gaz rapportés à une valeur de temps. Les paramètres considérés sont les suivants.

	Rapport Cadre	Modélisation EFFECTS
Longueur de la conduite	10 km (5 km de part et d'autre de la brèche)	10 km (5 km de part et d'autre de la brèche)
Double side flow	Oui	Oui
Rugosité de la conduite	0.045 mm	0.045 mm
Diamètre de la brèche	456 mm	458 mm

Figure 4.1 Paramètres pour la modélisation « Gas release from long pipeline » et comparaison avec le Rapport-Cadre

Les résultats de la modélisation de la fuite de gaz d'une conduite 12" et 70 bar sont présentés ci-après. Les détails sont illustrés à l'Annexe A.

En première étape, les résultats obtenus par EFFECTS version 12.0 pour la modélisation d'une conduite de gaz naturel ont été comparés à ceux présentés dans le rapport-cadre.

Conduite	Volume de gaz libéré en 20 s en additionnant les deux extrémités (selon le Yellow Book 3 ^{eme} éd. révisée 2005, équations 2.35 à 2.41)
8"/25 bar	1'500 kg
)"/70 bar	7'100 ka
2"/70 bar	11'200 kg
0"/70 bar	38'600 kg
1"/70 bar	59'900 kg
8"/70 bar	86'500 kg
5"/60 bar	134'200 kg
8"/70 bar	305'800 kg



Figure 4.2 Comparaison des résultats obtenus avec EEFFECTS et le Rapport-Cadre

La modélisation de la fuite de gaz naturel avec EFFECTS correspond bien aux données prises en compte dans le Rapport-Cadre : après 20 secondes, EFFECTS modélise une perte de 12'725 kg de CH₄ tandis que dans le Rapport-Cadre, 11'200 kg sont retenus.

En seconde étape, les calculs ont été effectués pour une conduite présentant les mêmes caractéristiques que précédemment mais dans laquelle de l'hydrogène pur est transporté.



Figure 4.3 Taux de fuite et quantité relâchée pour une rupture totale d'une conduite transportant du CH₄ ou de l'H₂



Le taux de fuite pour l'hydrogène est bien inférieur à celui du méthane et baisse rapidement après quelques secondes (environ 10 secondes pour le CH₄ et 4 secondes pour le H₂). Après 20 secondes, seuls 2'260 kg d'hydrogène se sont échappés de la conduite contre les 12'725 kg de méthane.

Results	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline H2
Source Definition	·	•
Initial mass in pipeline (kg)	46274	4753.2
Mass flow rate at time t (kg/s)	120.91	5.9743
Model valid until time (s)	11.423	3.9054
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	262.49	37.806
Based upon duration until (s)	120	120
Maximum mass flow rate (kg/s)	2186.2	718.55
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	458.06	458.06
Representative release rate (kg/s)	2186.2	718.55
Representative outflow duration (s)	21	7
Representative pressure (bar)	70	70
Representative temperature (°C)	9	9
Representative density (kg/m3)	1.1626	0.91098
Process Dimensions		
Pipeline volume (m3)	823.97	823.97

 Tableau 4.1
 Comparaison des résultats de la modélisation rupture totale de la conduite à haute pression

La différence entre les taux de fuite illustrée à la Figure 4.3 s'explique essentiellement par la faible densité de l'hydrogène qui induit une décompression rapide de la conduite.

4.1.2 Modélisation des effets

L'objectif de la modélisation des effets est celui de comparer la dangerosité de l'injection d'hydrogène dans le réseau existant de gaz naturel, ceci afin de vérifier la compatibilité des résultats obtenus avec le logiciel EFFECTS vis-à-vis des résultats des études préalablement décrites.

Avant tout, il est nécessaire de définir les conséquences pertinentes dans les deux cas de figure. À ce sujet, les études présentées précédemment sont unanimes autour de la formation d'un feu de torche dû à l'inflammation immédiate du gaz et alimenté par un flux continu qui dure plusieurs secondes, voire minutes.

En ce qui concerne l'inflammation retardée de la fuite de gaz, le scénario de la boule de feu (inflammation retardée de la masse de gaz qui fuit après 20 secondes) est le scénario qui provoque les dommages les plus importants selon la méthode du Rapport-Cadre dans le cas d'une rupture totale d'une conduite à haute pression transportant du gaz naturel. Le gaz s'enflamme et provoque un rayonnement thermique très élevé mais pendant une courte période (quelques secondes).

Jusqu'à présent, la plupart des études qui se sont penchées sur la problématique des risques liés au transport d'hydrogène ont considéré une probabilité d'ignition de 100%. La probabilité que l'ignition soit retardée a été jugée faible ; c'est pour cela que le scénario du feu de torche a été étudié plus en détail. Or, l'entreprise Gexcon est en train d'approfondir ce sujet et, sur la base d'incidents survenus notamment dans le contexte de stations de recharge de véhicules fonctionnant à l'hydrogène, les probabilités d'une inflammation retardée pourraient être revues à la hausse. L'inflammation retardée de l'hydrogène comporterait alors deux scénarios : l'incendie d'un nuage de gaz (flash fire) ou l'explosion d'un nuage de gaz (Vapour Cloud Explosion), selon le niveau de confinement du nuage.

Dans l'article "Why a Hydrogen fireball should not be modelled as a BLEVE event" [31], rédigé par l'entreprise Gexcon, une boule de feu d'hydrogène pur peut survenir uniquement dans le cas d'une fuite instantanée d'hydrogène comprimé. La fuite de gaz depuis une rupture, totale ou partielle, d'une conduite à haute pression est cependant considérée comme une fuite continue. Un arbre des conséquences pour une fuite de gaz est donné dans [31] et présenté ci-après : il distingue une fuite instantanée d'une fuite continue et l'ignition immédiate de l'ignition retardée. Les conséquences liées à la toxicité ne sont pas pertinentes pour l'hydrogène pur.





Arbre des conséquences pour une fuite d'hydrogène d'une conduite à haute pression

Figure 4.4 Arbre des conséquences pour une fuite de gaz [31]

Dans le Rapport-Cadre de l'industrie gazière suisse, l'arbre des conséquences pour une rupture totale d'une conduite de transport de gaz naturel à haute pression est le suivant :



Figure 4.5 Arbre des conséquences pour une rupture totale d'une conduite à haute pression de gaz naturel⁶ [25]

Dans la présente étude, en analogie avec ce qui est préconisé dans la méthode du Rapport-Cadre, nous avons modélisé les effets d'un feu de torche et d'une boule de feu pour les mélanges de H₂-CH₄. Pour le scénario « transport d'hydrogène pur dans les conduites existantes », seul le feu de torche a été modélisé en accord avec [31]. Les résultats sont présentés dans les chapitres qui suivent.

4.1.3 Inflammation immédiate : feu de torche

Le feu de torche est un phénomène qui survient lors d'une fuite continue qui s'enflamme immédiatement ou quelques secondes après le début de la perte de confinement. Il produit une flamme qui peut s'élever à plusieurs dizaines de mètres et qui brûle tant qu'elle est alimentée par le gaz qui sort de la conduite.

⁶ Dans le scénario « Inflammation spontanée », la méthodologie du rapport cadre considère une boule de feu suivie d'un feu de torche. Etant donné que les effets d'une boule de feu sont prépondérants, le feu de torche résultant est implicite dans l'arbre des conséquences.



Le calcul des effets d'un feu de torche de méthane dans le Rapport-Cadre se base sur un modèle simplifié issu du Yellow book [29]. EFFECTS base également ses modélisations sur le Yellow Book mais la version utilisée est plus récente, ainsi, le calcul des effets pour le gaz naturel n'est pas forcément comparable entre le Rapport-Cadre et EFFECTS.

Situation de la surface irradiée par rapport au feu de torche



Figure 4.6 Modèle en forme de cylindre pour le calcul des effets d'un feu de torche dans le Rapport-Cadre et modèle en forme de cône pris en compte par le logiciel EFFECTS

Pour les substances gazeuses, le logiciel EFFECTS utilise le modèle de Chamberlain pour définir la forme de la flamme. Le facteur de vue⁷, paramètre important dans le calcul du flux de chaleur, est calculé en utilisant une méthode de discrétisation de la radiation qui divise la surface de la flamme en petites surfaces, toutes caractérisées par une orientation et une surface spécifique. La flamme de base a une forme de cône.

Pour la modélisation avec EFFECTS les paramètres de base considérés sont les suivants.

Paramètres d'entrée	CH₄	H ₂
Durée max. de l'exposition au feu de torche ⁸	30 s	30 s
Débit de fuite max. (calculé par EFFECTS dans la phase précédente)	2'186 kg/s	718 kg/s
Conditions climatiques ⁹	20°C / 70% humidité / 1.0151 bar	20°C / 70% humidité / 1.0151 bar
Classe de Pasquill	D (neutral) et vent à 5 m/s	D (neutral) et vent à 5 m/s
Hauteur de la fuite	0 m	0 m

Tableau 4.2Paramètres de base pour la modélisation d'un feu de torche avec EFFECTS

En insérant une hauteur de la fuite de 0 m (conduite au sol), le logiciel considère qu'au moment de la rupture, la conduite n'est pas enfouie. Ainsi le jet peut s'élever directement dans l'atmosphère et la flamme monte en hauteur avec un impact moindre à la surface. Ceci est dû au « lift off » du feu de torche, c'est-à-dire à l'espace entre fuite et partie inférieure de la flamme, espace où le mélange gaz-air ne présente pas les conditions pour s'enflammer en raison notamment de la vitesse d'écoulement. Par conséquent, les effets du feu de torche à la surface sont moins intenses que lorsque la cible se situe en hauteur.

La figure ci-après montre la forme de la flamme pour différents mélanges $H_2 - CH_4$: 100% CH_4 , 20% H_2 -80% CH_4 , 50% H_2 -50% CH_4 , 80% H_2 - 20% CH_4 et 100% H_2 .

⁷ Indique la part du rayonnement émanant de la boule de feu ou du feu de torche qui atteint un objet éloigné en cas de transmission sans perte

⁸ La même durée d'exposition est prise dans le Rapport-Cadre de l'industrie gazière suisse. Cette valeur correspond au temps d'exposition de la cible et est déterminante pour le calcul des effets létaux.

⁹ Conditions climatiques reprises du rapport pour les installations frigorifiques [30].





Figure 4.7 Forme de la flamme pour le méthane et les différents mélanges hydrogène-méthane (EFFECTS)

Conformément à ce qui était attendu, la flamme d'un feu de torche de 100% CH₄ est la plus étendue et la flamme de 100% H₂ est la moins étendue. La taille de la flamme pour les mélanges intermédiaires décroit proportionnellement avec l'augmentation du volume en hydrogène. La flamme de l'H₂ est également moins impactée par le vent, ce qui se traduit par un angle entre la rupture et l'axe de la flamme moins prononcé à cause de la très haute vitesse à laquelle l'H₂ sort de la conduite (environ 2.7 fois plus vite que le méthane, voir rapports des modélisations à l'Annexe A).

La dimension de la flamme d'hydrogène dépend également du phénomène de « buoyancy » (poussée) qui détermine la tendance d'un gaz à monter dans l'atmosphère [22] et qui dépend de la densité de ce gaz.

Notons en outre que les feux de torche illustrés à la Figure 4.7 sont modélisés sur la base des débits de fuite maximaux qui ont une durée limitée de quelques secondes puis diminuent (cf. Figure 4.3). Par conséquent, le feu de torche se réduira également après quelques secondes.

La Figure 4.8 ci-après illustre la dose de rayonnement thermique reçue (base pour le calcul des létalités) en fonction de la distance à la source pour chaque mélange de gaz analysé. La dose de rayonnement est calculée en considérant le feu de torche maximal.

La dose de rayonnement thermique est calculée comme suit :

$$V = t Q^{4/3}$$

où V = Dose de rayonnement thermique en TDU (s(W/m²)^{4/3})

t = temps d'exposition

Q = flux de chaleur

Le flux de chaleur ou flux thermique est calculé selon la formule suivante :

 $Q = E^*F^*\tau$

où Q= Flux de chaleur (W/m2)

E= Rayonnement moyen à la surface de l'incendie (W/m²) = Surface Emissive Power (SEP) : dépend des caractéristiques du gaz



F= Facteur de vue : dépend du type de scénario (Boule de feu ou feu de torche), du modèle considéré et de l'éloignement de la cible

τ = Transmission atmosphérique ¹⁰: dépend de la météo et de l'éloignement de la cible

L'échelle des dommages pour les scénarios dont les dommages sont causés par le flux thermique est celle du Rapport-Cadre. Elle propose des seuils de létalité rattachés à une dose de rayonnement thermique.

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

Tableau 4.3Echelle des dommages pour la dose de rayonnement thermique (Rapport-Cadre [25])



Figure 4.8 Relations entre dose de rayonnement thermique et distance à la source pour les différents mélanges H₂-CH₄ analysés et pour le scénario feu de torche (EFFECTS)

Les résultats obtenus montrent que l'intensité du flux thermique diminue avec l'augmentation de la proportion d'hydrogène dans la conduite. Contrairement à la forme de la flamme, cette diminution n'est pas linéaire. La raison principale est que le logiciel considère, pour les mélanges, une valeur de rayonnement moyen à la surface de la flamme qui correspond à celle du méthane. Ainsi, l'intensité du flux thermique pour les mélanges jusqu'à 80% d'hydrogène décroit en raison de la diminution de la taille de la flamme. Pour le scénario 100% H₂, l'intensité du flux thermique est influencée par la valeur de rayonnement moyen à la surface de la flamme de H₂ qui est considérablement plus basse que la valeur associée à celle du méthane.

¹⁰ Permet de prendre en compte la perte de rayonnement résultant de l'absorption atmosphérique.



La valeur de rayonnement moyen à la surface de la flamme vaut 312 kW/m² pour le méthane (en considérant une partie de la flamme recouverte par de la suie) et 70 kW/m² pour l'hydrogène (selon la valeur fixée par Gexcon).

Les résultats ainsi qu'une indication sur les létalités sont présentés dans le tableau ci-après.

Résultats	Rapport-Cadre 100% gaz naturel	EFFECTS
Longueur du feu de torche ¹¹	142 m	100% CH4 : 164 m 20% H2 - 80% CH4 : 155 m 50% H2 - 50%CH4 : 142 m 80% H2 – 20% CH4 : 128 m 100% H2 : 123 m
Rayonnement moyen à la surface de l'incendie (SEP)	210 kW/m ²	CH ₄ et mélanges : 312 kW/m ² H ₂ : 70 kW/m ²
Rayon létalité 0% (735 s(W/m²) ^{4/3})	100 m	100% CH ₄ : 140 m 20% H ₂ - 80% CH ₄ : 130 m 50% H ₂ - 50%CH ₄ : 110 m 80% H ₂ – 20% CH ₄ : 85 m 100% H ₂ : -

Tableau 4.4 Résultats de la modélisation du feu de torche et comparaison avec les données du Rapport-Cadre

Les effets d'un feu de torche modélisés avec EFFECTS se ressentent sur une surface plus étendue par rapport aux effets calculés dans le Rapport-Cadre ; néanmoins, comme illustré à la Figure 4.8, la dose de rayonnement correspondant à 100% de létalité, soit 3'415 s(W/m²)^{4/3}, n'est pas atteint, tandis que dans le Rapport-Cadre, pour une conduite de 12''/70 bar, le rayon 100% de létalité est situé à 35 mètres de la conduite.

Pour un feu de torche 100% H₂, aucun effet grave n'est ressenti sur une cible située au sol.

Ces différences sont dues d'une part au modèle considéré (cylindre ou cône) et d'autre part à la valeur de rayonnement moyen à la surface de la flamme.

4.1.4 Inflammation retardée : boule de feu, flash fire ou VCE

Le scénario de la boule de feu a été modélisé uniquement pour le méthane et pour les mélanges hydrogèneméthane, conformément aux recommandations de [31]. Selon le Rapport-Cadre de l'industrie gazière suisse, seuls les dommages liés à la radiation thermique sont considérés, car il est admis que les dommages causés par la surpression sont moins graves.

¹¹ La longueur de la flamme selon le Rapport-Cadre est mesurée à partir du sol. En revanche, EFFECTS tient compte du lift-off qui dans ce cas précis vaut environ 30 m.



Les paramètres de base sont présentés dans le tableau ci-après.

Paramètres d'entrée	CH4 H2
Diamètre et pression	12" (323.9 mm) / 70 bar
Gaz libéré durant les 20 premières secondes ¹²	100% CH4 : 12'750 kg 20% H2 - 80% CH4 : 10'460 kg 50% H2 - 50%CH4 : 7'213 kg 80% H2 – 20% CH4 : 4'275 kg
Exposition maximale	20 secondes
Conditions climatiques	20°C / 70% humidité / 1.0151 bar
Hauteur de la fuite	0 m

Tableau 4.5Paramètres de base pour la modélisation d'une boule de feu avec EFFECTS

Les résultats de la modélisation d'une boule de feu pour le méthane et pour différents mélanges de méthane et d'hydrogène sont présentés dans la figure suivante.



Figure 4.9 Forme de la boule de feu pour le méthane et les différents mélanges hydrogène-méthane (EFFECTS)

L'étendue de la boule de feu diminue avec l'augmentation de l'hydrogène dans le mélange car la quantité totale de gaz qui fuit dans les 20 premières secondes et qui s'enflamme par la suite diminue en raison de la plus faible densité de l'hydrogène (dispersion de H₂ avant l'inflammation retardée provoquant la boule de feu).

¹² D'après le Rapport-Cadre, la boule de feu est formée par la quantité de gaz qui s'échappe durant les 20 premières seconde.



La figure suivante présente la dose de rayonnement thermique en relation avec la distance à la fuite.



Figure 4.10 Relations entre dose de rayonnement thermique et distance à la source pour les différents mélanges H₂-CH₄ analysés et pour le scénario boule de feu (EFFECTS)

Les effets d'une boule de feu diminuent avec l'augmentation de la part d'hydrogène dans le mélange. Ceci est directement dépendant de la taille et de la durée de la boule de feu. Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant.

Résultats	Rapport-Cadre 100% gaz naturel	EFFECTS
Durée de la BDF	9 s	100% CH4 : 10.5 s 20% H2 - 80% CH4 : 9.8 s 50% H2 - 50%CH4 : 8.7 s 80% H2 - 20% CH4 : 7.3 s
Rayon de la BDF	61 m	100% CH ₄ : 67 m 20% H ₂ - 80% CH ₄ : 63 m 50% H ₂ - 50%CH ₄ : 56 m 80% H ₂ – 20% CH ₄ : 47 m
Rayonnement moyen à la surface de l'incendie	210 kW/m ²	265 kW/m ²
Rayon létalité 0% (735 s(W/m ²) ^{4/3})	130 m	100% CH ₄ : 115 m 20% H ₂ - 80% CH ₄ : 105 m 50% H ₂ - 50%CH ₄ : 95 m 80% H ₂ – 20% CH ₄ : 80 m

Tableau 4.6 Résultats de la modélisation de la boule de feu et comparaison avec les données du Rapport-Cadre

Les effets d'une boule de feu calculés selon la méthode du Rapport-Cadre ou modélisés avec EFFECTS sont du même ordre de grandeur.

Dans le cas d'une fuite d'hydrogène pur et d'une ignition retardée, deux phénomènes sont possibles : le flash fire si le nuage évolue en milieu non confiné et le VCE si en revanche le nuage rencontre un milieu confiné.



Le flash fire est l'incendie d'un nuage de gaz qui produit des effets liés au rayonnement thermique. Le VCE est l'explosion d'un nuage de gaz qui survient lors de son ignition provoquée par la très haute vitesse de propagation de la flamme et qui produit une importante surpression. Le confinement et l'encombrement du périmètre jouent également un rôle important pour la caractérisation du phénomène.

Ces phénomènes sont néanmoins encore peu étudiés car jusqu'à présent l'ignition immédiate de l'hydrogène a essentiellement été considérée. L'article "The critical mass for the unconfined vapour cloud explosion of compressed and liquid hydrogen" de E. Salzano [32], se penche sur les conséquences possibles d'un VCE selon différentes conditions de confinement. L'article conclu que la probabilité qu'un VCE d'hydrogène survienne est fortement réduite par le phénomène de « buoyancy » propre à la fuite d'H₂ et à la haute probabilité d'ignition immédiate. Néanmoins, en raison de la haute réactivité de l'hydrogène, même des nuages de petite taille pourraient générer de hautes pressions.

Gexcon est également en train d'étudier le phénomène de flash fire et de VCE liés à l'hydrogène mais les études ne sont à ce jour pas encore abouties.

4.1.5 Considérations sur les effets de l'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel existant

Les résultats issus de la recherche bibliographique ainsi que ceux obtenus par la modélisation des effets de l'ajout d'hydrogène dans les gazoducs ont permis de montrer que, dans le cas des scénarios du feu de torche et de la boule de feu, les effets diminuent avec l'introduction d'hydrogène dans les conduites.

Sur la base des résultats obtenus, la Loi sur les installations de transport par conduite (LITC), l'Ordonnance sur les installations de transport par conduites (OITC) et l'Ordonnance sur la sécurité des installations de transport par conduites (OSITC) semblent rester valables pour le transport d'hydrogène par conduite.

Les conduites de transport de gaz à haute pression, quel que soit le type de gaz transporté, sont soumises à la LITC selon l'art. 3 al. 1 OITC. Les effets d'un feu de torche et d'une boule de feu diminuent avec l'introduction de l'hydrogène dans la conduite, ainsi les prescriptions de sécurité de l'OSITC peuvent être considérées comme valables pour les mélanges $H_2 - CH_4$ dans les conduites existantes.

Les effets et la probabilité d'occurrence d'une explosion en cas de fuite d'hydrogène pur restent aujourd'hui encore méconnus, néanmoins plusieurs études sont en cours pour mieux connaitre le phénomène.

4.2 Conduites de distribution / micro-projets

Le présent chapitre s'intéresse au réseau de distribution ou de transport sur de courtes distances d'hydrogène pur. A l'heure actuelle, il s'agit essentiellement de conduites qui transportent de l'hydrogène pur d'un hydrolyseur vers l'utilisateur final. De nombreuses modélisations ont été effectuées. Cependant seuls les résultats les plus significatifs ont été repris dans le présent document technique.

Dans le rapport sont présentés les résultats les plus significatifs qui découlent d'une part des conduites déjà existantes ou en construction, et d'autre part de l'avancée du groupe de travail dans la recherche de la limite d'assujettissement des micro-réseaux à la LITC et aux ordonnances.

Selon l'état actuel, la Confédération est compétente s'agissant des installations de transport par conduites dans lesquelles la pression de service maximale admissible est supérieure à 5 bar et dont le diamètre extérieur dépasse 6 cm (art. 3, al. 1 OITC). L'OSITC est, elle, applicable tant aux conduites tombant sous la compétence de la Confédération qu'à celles tombant sous la compétence des cantons. Les conduites de plus de 5 bar se voient appliquer l'entièreté de l'OSITC (dont les règles techniques), alors que seules certaines règles techniques sont applicables aux conduites ne dépassant pas 5 bar.

Pour l'hydrogène, ces limites semblent peu pertinentes car, au vu de sa faible densité, des pressions plus élevées sont nécessaires pour transporter efficacement l'H₂.

Les modélisations suivantes ont permis de comparer les effets en cas de perte de confinement d'une conduite de gaz naturel à 5 bar et 6 cm aux impacts évalués pour plusieurs typologies de conduites transportant de l'hydrogène pur dans un réseau industriel (micro-projet).

Une première modélisation a été réalisée pour une conduite de diamètre 6 cm et 500 bar, afin de montrer les effets de la très haute pression.

Remarque : le scénario boule de feu n'est pas présenté pour une conduite de distribution d'hydrogène pur dans la mesure où cet impact n'est pas considéré comme pertinent dans l'arbre des conséquences de [31].



Les paramètres de base pour les modélisations sont illustrés dans le tableau ci-après.

Paramètres d'entrée	CH4	H2
Diamètre ¹³ et pression	60 mm / 5 bar	60 mm / 500 bar
Débit de fuite max. (calculé par EFFECTS)	4.9 kg/s	283 kg/s
Exposition maximale	30 secondes	30 secondes
Conditions climatiques	20°C / 70% humidité / 1.0151 bar	20°C / 70% humidité / 1.0151 bar
Pasquill	Neutre D / 5 m/s	Neutre D / 5 m/s
Hauteur de la fuite	0 m	0 m
Longueur de la conduite	5 km	5 km

Tableau 4.7Paramètres de base pour la modélisation EFFECTS des micro-réseaux

Les résultats de la modélisation sont présentés dans les figures suivantes et les détails à l'Annexe B.



Release rate vs Time

Figure 4.11 Résultats de la modélisation d'une fuite de CH_4 (5 bar/6 cm) et d'une fuite de H_2 (500 bar/6 cm)

Le taux de fuite maximal est beaucoup plus élevé pour l'hydrogène que pour le méthane en raison de la grande différence de pression.

La forme de la flamme est également très différente entre les deux scénarios considérés. Toutefois, les effets proches de la surface du sol d'un feu de torche d'hydrogène sont moins graves que les effets d'un feu de torche de méthane.

¹³ EFFECTS considère le diamètre interne de la conduite tandis que dans la LITC et les ordonnances, c'est le diamètre extérieur qui fait fois.





Figure 4.12 Forme de la flamme pour un feu de torche de CH₄ (5 bar / 6 cm) et de H₂ (500 bar/6 cm) et dose de rayonnement

D'après la modélisation EFFECTS, la flamme d'hydrogène s'enflamme à environ 15 mètres au-dessus du point de fuite qui est situé à la surface. La cible considérée est quant à elle située à 1.5 m du sol (hauteur d'homme).

La valeur de l'émissivité de la flamme d'hydrogène de 70 kW/m2 et la hauteur de la flamme d'hydrogène permettent d'expliquer que même pour une pression 100 fois moindre, les effets d'un feu de torche pour le méthane restent plus graves au sol. La limite 0% létalité pour le méthane se situe à environ 11 mètres de la brèche.

La limite d'assujettissement des conduites d'hydrogène pur à la LITC et à l'OSITC ne peut cependant pas se baser uniquement sur ces résultats. De plus, la problématique de l'explosion est encore en cours d'étude et pourrait s'avérer plus pertinente que les radiations thermiques, notamment en raison de la présence d'espaces confinés et d'encombrement dans les zones industrielles, principales aires de desserte du réseau de distribution.

L'OFEN a ainsi posé l'hypothèse de maintenir la notion de basse pression / haute pression pour définir le champ d'application de la loi et des ordonnances.

4.2.1 Conduites d'un diamètre maximal de 10 cm et produit de la pression fois le diamètre de 200 bar*cm

La limite de 200'000 Pa*m (200 bar*cm), pour une conduite d'un diamètre extérieur de 10 cm, a été proposée par l'OFEN. Les modélisations suivantes ont pour but de vérifier les effets de plusieurs combinaisons de pression et de diamètre permettant d'obtenir 200 bar*cm.

Caractéristique de la conduite (P et d)	Produit
10 cm / 20 bar	
6 cm / 33 bar	200 bartem
4 cm / 50 bar	200 bar cin
2 cm / 100 bar	

Tableau 4.8 Pression et diamètre des conduites modélisées pour 200 bar* cm

La figure suivante montre la forme de la flamme pour différentes conduites dont le produit de la pression par le diamètre donne 200 bar*cm. En rose, la flamme d'un feu de torche pour une conduite de gaz naturel de 5 bar et 6 cm. Le détail des résultats des modélisations est présenté à l'Annexe B.





Figure 4.13 Forme de flammes pour différentes conduites avec un produit de la pression par diamètre de 200 bar*cm

La longueur de la flamme est directement proportionnelle à la masse d'hydrogène présente initialement dans la conduite et par conséquent au taux de fuite maximal. Ainsi la flamme la plus longue correspond à la conduite 10 cm / 20 bar et la flamme la plus petite à la conduite 2 cm /100 bar. La différence entre la flamme la plus haute et la flamme la plus basse est d'environ 13 m. La flamme la plus haute monte jusqu'à 32 m environ.

La figure ci-dessous montre la relation entre dose de rayonnement et distance à la brèche pour les feux de torche préalablement présentés.



Figure 4.14 Dose de rayonnement thermique pour les différentes conduites modélisées (200 bar*cm)



Tout en étant plus proches du sol, les flammes liées à une fuite d'hydrogène pur, pour des conduites ne dépassant pas le rapport 200 bar* cm, ne produisent pas d'effets létaux (valeurs inférieures à 735 s(Wm⁻²)^{4/3}, dose en-dessous de laquelle aucun effet létal n'est attendu).

4.2.2 Conduites d'un diamètre maximal de 12 cm et produit de la pression fois le diamètre de 300 bar*cm

Une seconde limite a été analysée du point de vue des risques : 300'000 Pa*cm (300 bar*cm) pour un diamètre maximal de 12 cm. Les combinaisons de pression et de diamètre modélisées sont présentées dans le tableau ci-après.

Caractéristique de la conduite (P et d)	Produit
12 cm / 25 bar	
6 cm / 50 bar	300 bar*cm
4 cm / 75 bar	
2 cm / 150 bar	

Tableau 4.9 Pression et diamètre des conduites modélisées pour 300 bar* cm

Les flammes modélisées pour les différentes combinaisons de pression et de diamètre sont illustrées dans la figure suivante.



Figure 4.15 Forme de flammes pour différentes conduites avec un produit de la pression par diamètre de 300 bar*cm

De même que pour le cas de figure précédent (200 bar*cm), la flamme la plus haute est provoquée par la conduite avec le diamètre plus grand, soit 12 cm pour 25 bar, et monte jusqu'à environ 42 m. La différence de hauteur entre la flamme la plus petite (2 cm et 150 bar) et la flamme la plus haute est d'environ 19 m.



La figure suivante montre la relation entre dose de rayonnement et distance à la brèche pour les différentes conduites modélisées.



Figure 4.16 Dose de rayonnement thermique pour les différentes conduites modélisées (300 bar*cm)

De même que pour la limite à 200 bar*cm, les flammes liées à une fuite d'hydrogène pur, pour des conduites ne dépassant pas le rapport 300 bar* cm, ne produisent pas d'effets létaux (valeurs inférieures à 735 s(Wm⁻)^{4/3}, dose en-dessous de laquelle aucun effet létal n'est attendu).

La figure ci-après permet de comparer les hauteurs des flammes modélisées pour les différentes combinaisons de pression et de diamètre. De même que pour les conduites de transport à haute pression (cf. Figure 4.7), le feu de torche modélisé découle du débit de fuite maximal qui dure seulement quelques secondes (moins de 3 secondes pour les conduites composant les micro-réseaux). Le débit de fuite se stabilise ensuite et le feu de torche se réduit.





Figure 4.17 Comparaison entre hauteur de flamme pour les seuils à 200 bar*cm et à 300 bar*cm

La Figure 4.17 montre qu'avec un seuil à 300 bar*cm et un diamètre maximal de 12 cm, la flamme est environ 10 mètres plus haute que pour une conduite de maximum 10 cm de diamètre et un produit entre pression et diamètre de 200 bar*cm. Ceci s'explique par le plus grand volume d'hydrogène présent à l'intérieur de la conduite de 12 cm. Néanmoins, toutes les flammes modélisées restent dans le même ordre de grandeur.

Notons enfin que le feu de torche modélisé pour différentes combinaisons de pression et de diamètre, jusqu'au seuil de 300 bar*cm, ne produit pas d'effets létaux sur une cible située près du sol (1.5 m).



5 Conclusions : réflexions sur la LITC, l'OITC et l'OSITC

Selon l'état actuel, la Confédération est l'autorité compétente pour les installations de transport par conduites dans lesquelles la pression de service maximale admissible est supérieure à 5 bar et dont le diamètre extérieur dépasse 6 cm (art. 3, al. 1 OITC). L'OSITC est, elle, applicable tant aux conduites tombant sous la compétence de la Confédération qu'à celles tombant sous la compétence des cantons. Les conduites de plus de 5 bar se voient appliquer l'entièreté de l'OSITC (dont les règles techniques), alors que seules certaines règles techniques sont applicables aux conduites ne dépassant pas 5 bar.

La première partie de l'étude a ainsi été axée sur l'évolution du risque lié à l'ajout d'hydrogène dans les conduites de transport de gaz naturel.

Les informations issues de la littérature d'une part et les modélisations effectuées par nos soins au moyen du logiciel EFFECTS d'autre part, ont permis de constater que l'ajout d'hydrogène dans un mélange hydrogène-gaz naturel induit une diminution des effets pour les scénarios de feu de torche et de boule de feu.

Plusieurs études sont néanmoins en cours pour évaluer les effets liés à l'explosion d'un nuage d'hydrogène qui surviendrait lorsque le gaz s'enflamme de manière retardée. Ce cas de figure a jusqu'à présent peu été étudié car l'ignition immédiate de l'hydrogène a été privilégiée dans la plupart des études. L'entreprise Gexcon, éditrice du logiciel EFFECTS, est actuellement en train d'évaluer un modèle de dispersion d'un nuage d'hydrogène qui pourrait exploser ou prendre feu (VCE ou flash fire). Des études sont également en cours pour définir la probabilité d'occurrence d'une explosion en cas de fuite d'hydrogène pur en rapport aux autres scénarios d'accident. Les études citées ne sont à ce jour pas encore abouties, dès lors, il est important de suivre les travaux de recherche en cours et de prendre en compte les résultats futurs pour les évaluations à venir.

A l'état actuel des connaissances, les considérations suivantes peuvent être faites.

La section 3 de l'OSITC définit les distances de sécurité.

Selon l'art. 9 OSITC, « *Les distances nécessaires pour garantir la sécurité de la construction et de l'exploitation de l'installation de transport par conduites ainsi que la protection d'autres ouvrages doivent être respectées entre l'installation de transport par conduites et ces ouvrages »*. Cet article comporte deux parties. La première notion porte sur la sécurité de la construction et de l'exploitation des conduites. Une distance de sécurité est ainsi définie pour garantir un accès à l'installation libre d'obstacles ce qui permet de contrôler le risque de rupture causé par des tiers (p.ex. travaux à proximité de la conduite). La fréquence de rupture due à une intervention de tiers sur la conduite ne dépend pas de la substance transportée ; ainsi les distances de sécurité indiquées aux articles 10, 11, 15, 17 restent valables pour une conduite transportant de l'hydrogène.

La deuxième partie de l'art. 9 OSITC introduit la notion de « protection d'autres ouvrages » où des personnes sont potentiellement présentes (bâtiments, routes, voies de chemin de fer). Les distances de sécurité servent alors à protéger les ouvrages et les personnes à l'intérieur, des dommages qu'un accident impliquant l'installation de gaz pourraient causer.

L'art. 12 « Distances de sécurité par rapport aux bâtiments ou aux lieux très fréquentés » fixe une limite de 25 bar, à partir de laquelle les distances de sécurité à respecter sont plus contraignantes (par exemple distance de 10 m par rapport aux bâtiments occupés par des personnes et par rapport aux lieux très fréquentés). La rupture d'un gazoduc 12"/70 bar transportant du gaz naturel présente un rayon d'impact pour une létalité de 100% de l'ordre de 55 mètres pour une boule de feu et de 35 mètres en cas de feu de torche [25]. Sur la base de ces résultats, les distances de sécurité définies dans l'article 12 OSITC ne permettent pas de limiter les effets d'un accident sur les personnes et sur les ouvrages. Les articles 12, 13, 14 et 16 permettent uniquement de réduire la fréquence de rupture liée à une intervention de tiers et fixent des distances minimales à respecter pour la construction des conduites.

Les distances de sécurité présentées dans la section 3 de l'OSITC peuvent ainsi être considérées comme pertinentes pour les conduites qui transporteront un mélange hydrogène-gaz naturel, d'autant plus que d'après les connaissances actuelles, la gravité des dommages diminue avec l'introduction d'hydrogène dans les conduites. En ce qui concerne l'hydrogène pur, les modélisations effectuées montrent que le feu de torche produit des effets moins graves par rapport à une fuite de méthane, néanmoins, les effets et la probabilité d'une explosion sont actuellement méconnus. Étant donné que les distances de sécurité présentées dans



l'OSITC permettent essentiellement de réduire la fréquence de rupture liée à une intervention de tiers, cellesci sont également pertinentes pour le transport d'hydrogène pur.

Les autres prescriptions de sécurité définies dans l'OSITC concernent les matériaux des installations, le dimensionnement et les mesures de sécurité propres au conduites (protection contre la corrosion, protection contre les influences mécaniques, protection des installations annexes, surveillance, etc.). L'Inspection Fédérale des Pipeline (IFP) joue un rôle fondamental notamment dans le contrôle du respect des prescriptions techniques et des mesures de sécurité, et cela ne changera pas avec l'introduction d'hydrogène dans les conduites à haute pression.

Enfin, l'art. 3 OSITC Règles techniques, dit que « Les installations de transport par conduites doivent être projetées, construites, exploitées et entretenues conformément aux règles de la technique par du personnel qualifié ». L'annexe 1 OSITC présente une liste de directives qui sont considérées comme des règles de la technique. Selon les discussions au sein du groupe de travail, l'annexe 1 sera mise à jour avec l'intégration de règles de la technique concernant le transport de l'hydrogène. En effet, hormis une recommandation du SSIGE datant d'avril 2023, il n'existe à l'heure actuelle pas encore de règles techniques traitant spécifiquement du transport de l'hydrogène au niveau Suisse. Des directives de l'IFP et du SSIGE sont néanmoins attendues pour 2024. En l'absence de telles directives, une modification des critères d'assujettissement à l'OSITC pour les hydrogénoducs est risquée, ceci dans la mesure où elle conduirait à une application exclusive des règles de la technique (et non de l'entièreté de l'OSITC), alors même que ces règles ne sont que partiellement adaptées au transport d'hydrogène pur. Cet avis est partagé tant par la SSIGE que par l'IFP.

Concernant l'application de la LITC et de ses ordonnances aux micro-réseaux, les différentes caractéristiques physiques du gaz naturel et de l'hydrogène rende particulièrement complexe la recherche d'une limite d'assujettissement pour les conduites d'hydrogène, qui soit comparable à la limite qui aujourd'hui définit le champ d'application pour les conduites de gaz naturel.

Les modélisations réalisées avec EFFECTS ont montré que même pour les hautes pressions, le feu de torche ne produit pas d'effets létaux sur une cible située au sol. Néanmoins, en considérant la difficulté technique de gérer des pressions si élevées (P>500 bar par exemple) et en accord avec les experts de la branche (SSIGE, Association des producteurs de H₂), l'OFEN a décidé de maintenir une limite basée sur la notion de hauts et de bas volumes, ceci afin que l'OSITC reste pleinement applicable à ce type de conduites. Ainsi, deux seuils d'assujettissement à l'OSITC pour les conduites d'hydrogène ont été proposés par l'OFEN et ont été évalués du point de vue des risques : un seuil de 200'000 Pa*m (200 bar * cm), avec un diamètre extérieur égal ou inférieur à 10 cm, et un seuil de 300'000 Pa*m (300 bar*cm), avec un diamètre égal ou inférieur à 12 cm. Différentes modélisations ont été réalisées. Les résultats montrent qu'un feu de torche impliquant des conduites respectant les limites de 200 bar*cm et de 300 bar*cm, ne génère pas d'effets létaux. La possibilité d'une explosion d'un nuage d'hydrogène devra être évaluée pour les micro-réseaux également, lorsque les connaissances sur ce scénario seront plus abouties.

La limite d'assujettissement à l'OSITC des conduites transportant de l'hydrogène pur est aujourd'hui en cours de discussion au sein du groupe de travail. La limite définitive devrait également tenir compte des paramètres techniques des conduites qui sont utilisées aujourd'hui pour ce type de micro-réseau, le but étant notamment de proposer une valeur qui soit pertinente du point de vue de l'état de la technique.

Notons néanmoins que toutes les conduites d'hydrogène qui ne tombent pas dans le champ d'application de la LITC ni dans celui de l'OSITC doivent de toute manière respecter les articles 2, 3, al. 1 et 2, 39a et l'annexe 1 de l'OSITC, d'où l'importance de mettre à jour l'annexe 1 avec les normes techniques pour le transport d'hydrogène.

Les installations de transport par conduite au sens de l'OITC, sont également assujetties à l'Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs (OPAM) lorsqu'elles remplissent les critères définis à l'annexe 1.3 de ladite ordonnance. Les hydrogénoducs qui entreront dans le champ d'application de l'OPAM devront faire l'objet d'un rapport succinct et, si nécessaire, d'une étude de risque, selon les art. 5 et 6 OPAM. De même que pour les gazoducs, l'industrie devra développer en temps utile un Rapport-Cadre pour l'analyse standardisée des risques d'accidents majeurs pour les conduites de transport d'hydrogène. La méthodologie permettra d'harmoniser l'évaluation des risques sur l'ensemble du territoire suisse et sera un outil important dans la prévention des accidents majeurs.



6 Bibliographie

- [1] Loi fédérale sur les installations de transport par conduites de combustibles ou carburants liquides ou gazeux (LITC) du 4 octobre 1963, état le 1^{er} septembre 2023, RS 746.1
- [2] Ordonnance sur les installations de transport par conduites de combustibles ou de carburants liquides ou gazeux (OITC) du 26 juin 2019, état le 1^{er} juillet 2023, RS 746.11
- [3] Ordonnance concernant les prescriptions de sécurité pour les installations de transport par conduites (OSITC) du 4 juin 2021, état le 1^{er} juillet 2023, RS 746.12
- [4] Candinas
- [5] European Hydrogen Backbone
- [6] GRT et autres distributeurs de gaz, Conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel, Rapport final, Juin 2019
- [7] P. E. Dodds, S. Demoullin, Conversion of the UK gas system to transport hydrogen, International journal of hydrogen energy 38, 2013
- [8] M. Scheepers, Conversion of natural gas distribution network to hydrogen, HyDelta 2, 2022
- T. Isaac, HyDeploy: The UK's first hydrogen blending deployment project, Clean energy, vol.3, n°2, 2019
- [10] HIGGS, D6.1 Considerations on H2 injection potential to EU decarbonization goals, A systematic validation approach at various admixture levels in to high-pressure grids, 2023 (Pending for approval)
- [11] Suriya Evans-Pritchard Jayanti, Repurposing pipeline for hydrogen: Legal and policy considerations, 7th International Conference on Advanced on Clean Enregy Research, ICACEER, 2022
- [12] U. R Fritche, Renewable Gases Hydrogen in the grid, Activity funded by the European Commission, Germany and Sweden with contribution from the Netherland, Synthesis Report, IEA Bioenergy, 2022
- [13] DVGW, Hydrogen Research Projects, 2020
- [14] B. Bordenet, M. Hafner, Erhölter H2-Gehalt im Verteilnetz, 2021
- [15] Nykyforchyn, Unigovskyi, Zvirko, Tsyrulnyk, Krechovska, Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network, Elsevier, 2021
- [16] Nykyforchyn, Unigovskyi, Zvirko, Hredil, Krechovska, Student, Tsyrulnyk, Susceptibility of carbon pipeline steels operated in natural gas distribution network to hydrogen-induced cracking, Elsevier, 2022
- [17] R.M. Andrews, N. Gallon, O. J. C. Huising, Assessing damaged pipelines transporting hydrogen, Journal of Pipeline Science and Engineering, 2022
- [18] Jibrin Abbas, Hassani, Burby, Job John, An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications, MDPI, 2021
- [19] Klopcic, Stöhr, Grimmer, Sartory, Trattner, Refurbishment of Natural Gas Pipelines towards 100% Hydrogen – A Thermodynamic-Based Analysis, MDPI, 2022
- [20] SSIGE, Regelwerk H1000, Empfelung zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für des Transport von Wasserstoff, 2023



- [21] K. Stolecka, Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network, Journal of Power Technologies 98 (4), 2018
- [22] H. A. J. Froeling, M. T. Dröge, G. F. Nane, A. J. M. Van Wijk, Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipeline, 2021
- [23] INERIS, Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel : état des lieux et perspectives, 2019
- [24] National Institute for Public Health and the Environment, Reference Manual for Bevb Risk Assessments (RIVM), Guideline for calculating external risk for transporting hazardous substances through pipeline, 2022
- [25] Industrie gazière Suisse, 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 standardisée, Révision 2010
- [26] INERIS, Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel : état des lieux et perspectives, 2019
- [27] GESIP, Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz naturel ou assimilés et produits chimiques), Rapport n° 2008/01, Edition de juillet 2019
- [28] Moniteur Belge, Code technique relatif à l'analyse de risque pour les installations de transport de produits inflammables et oxydants, 2020
- [29] VROM, Methods for the calculation of physical effects, due to releases of hazardous material (liquids and gases) "Yellow Book", 1996, Edition revue 2005
- [30] OFEV, Prévention des accidents majeurs liés aux installations frigorifiques, 2015
- [31] H. Boot, S. R. Perez, Why a hydrogen fireball should not be modelled as a BLEVE event, Chemical engineering transactions, 90, 49-54, 2021
- [32] Ernesto Salzano, The critical mass for the unconfined vapour cloud explosion of compressed and liquid hydrogen, The Canadian journal of chemical engineering, 2023



7 Impressum

Lausanne, le 19.12.2023

CSD INGÉNIEURS SA



Matilde RIBOLZI Cheffe de projet

ullaumGent

Aline GUILLAUME-GENTIL Resp. risques industriels

8 Disclaimer

CSD confirme par la présente avoir exécuté son mandat avec la diligence requise. Les résultats et conclusions sont basés sur l'état actuel des connaissances tel qu'exposé dans le rapport et ont été obtenus conformément aux règles reconnues de la branche.

CSD se fonde sur les prémisses que :

- le mandant ou les tiers désignés par lui ont fourni des informations et des documents exacts et complets en vue de l'exécution du mandat,
- les résultats de son travail ne seront pas utilisés de manière partielle,
- sans avoir été réexaminés, les résultats de son travail ne seront pas utilisés pour un but autre que celui convenu ou pour un autre objet ni transposés à des circonstances modifiées.

Dans la mesure où ces conditions ne seraient pas remplies, CSD déclinera toute responsabilité envers le mandant pour les dommages qui pourraient en résulter.

Si un tiers utilise les résultats du travail ou s'il fonde des décisions sur ceux-ci, CSD décline toute responsabilité pour les dommages directs et indirects qui pourraient en résulter.

Annexe A Résultats des modélisations EFFECTS pour les mélanges CH₄-H₂

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (28.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

Inputs	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
Process Conditions						
Chemical name	20% H2 - 80% CH4 (user created)	HYDRO((DIPPR)	3venetha (DIPPR)	20% CH4- NE 80%H2 (user created)	CH4-H2 (user created)	CH4-H2 (user created)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9	9	
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	70	70	70	70	70	
Calculation Method						
Use which representative rate	Maximu	nMaximur	Maximu	Maximu	Maximu	m
	rate	rate	rate	rate	rate	
Maximum release duration (s)	120	120	120	120	120	
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
Source Definition						
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0	0	
Process Dimensions						
Pipeline length (km)	10	10	10	10	10	
Pipeline diameter (mm)	323.9	323.9	323.9	323.9	323.9	
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	
Environment						
Ambient temperature (°C) Ambient pressure (bar)	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151
Results Source Definition	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
Initial mass in pipeline (kg)	36550	4753.2	46274	11799	23428	
Mass flow rate at time t (kg/s)	95.591	5.9743	120.91	25.415	59.404	
Model valid until time (s)	10.315	3.9054	11.423	6.0925	8.4343	
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	216.21	37.806	262.49	84.376	149.99	
Based upon duration until (s)	120	120	120	120	120	
Maximum mass flow rate (kg/s)	1951.1	718.55	2186.2	1125.3	1573	
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	458.06	458.06	458.06	458.06	458.06	
Representative release rate (kg/s)	1951.1	718.55	2186.2	1125.3	1573	
Representative outflow duration (s)	19	7	21	10	15	
Representative pressure (bar)	70	70	70	70	70	
Representative temperature (°C)	9	9	9	9	9	
Representative density (kg/m3)	1.1575	0.91098	1.1626	1.077	1.2072	

Process Dimensions						
Pipeline volume (m3)	823.97	823.97	823.97	823.97	823.97	
Contour maximum distances						
Heat radiation contours distance [m]	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour						123
Lethality contours distance [m]	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4 164
1 % lethality contour						164
Other information						

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 30.11.2023 22:38:15

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:38:15

Comparison set

Model: Gas Fireball

version: v2023.09.79c21b6 (11.09.2023)

Reference: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2002, Page 3-306. CCPS Guidelines for evaluating characteristics of vapor cloud explosions, flash fires and BLEVEs, 1994, p171- 174. Fireball Diameter and duration calculated according to Roberts (1982) "Thermal radiation hazards from releases of LPG fires from pressurised storage", dynamic rising and growing behavior of pure vapour fireballsmodelled with constant velocity according to Lihou and Maund (1982) "Thermal radiation hazards from fireballs" **Parameters**

Inputs	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
Process Conditions				
Chemical name	CH4-H2 (user created)	20% H2 - 80% CH4 (user created)	METHANE (DIPPR)	20%CH4- 80%H2 (user created)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in vessel (bar) Calculation Method	70	70	70	70
Fraction combustion heat radiated (-)	0.25	0.25		0.25
Include vessel rupture overpressure effects Process Dimensions	No	No	No	No
Vessel volume (m3)	255	235	227	298
Height of the vessel (fireball offset Z) (m) Environment	0	0	0	0
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70
Ambient pressure (bar) Vulnerability	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Maximum heat exposure duration (s)	20	20	20	20
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No
Accuracy				
Grid resolution	Low	Low	Low	Low
Reporting				
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	500	500	500	500
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5
Results	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
Total mass released (kg)	7250 5	10424	127/18	4267 1
Fire Results	1250.5	10424	12740	4207.1
Duration of the fireball (s)	8 7097	9 8301	10 512	7 2989
Liftoff time of the fireball (s)	3,9498	4.683	5.1179	2.9854
Max. diameter of the fireball (m)	112.26	126.7	135.49	94.075
Max. height of the fireball (m)	103.73	114.82	121.69	90.173
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)	304	274	265	350
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	2.0886	2.4077	2.6572	1.6909
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.012453	0.015811	0.018041	0.0087772

55.684

9.4654

0

55.817

12.597

0

55.899

15.206

0

Atmospheric transmissivity at Xd (%)

Percentage first degree burns at Xd (%)

Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)

55.515

6.2243

0

Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	67.19	72.511	76.94	59.681
Contour maximum distances				
Heat radiation contours distance [m]	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour	239	255	267	217
Lethality contours distance [m]	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
1 % lethality contour	123	136	146	106
Other information				
Main program	EFFECTS 12.0	.1.22111		

 Last calculation
 29.11.2023 13:06:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 13:06:56

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36 **Parameters**

Inputs	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4	Jet Fire 20% H2 - 80% CH4	Jet Fire CH4	Jet Fire H2	Jet Fire 80% H2 - 20% CH4
Process Conditions					
Chemical name	CH4-H2 (user created)	20% H2 - 80% CH4 (user created)	METHANI (DIPPR)	EHYDROGE (DIPPR)	20%CH4- 190%H2 (user created)
Exit temperature (°C)	9	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	70	70	70	70	70
Calculation Method					
Fraction of the flame covered by soot (-)	0.23	0.23	0.23		0.23
Source Definition					
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	1573	1951.1	2186.2	718.55	1125.3
Process Dimensions					
Hole diameter (mm)	458.06	458.06	458	458	458.06
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
	edges	edges	edges	edges	edges
Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
Meteo Definition					
Pasquill stability class	D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5	5	5	5
Predefined wind direction	W	W	W	W	W
Environment					
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70	70
Roughness length description	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
5 5 1	large	large	large	large	large
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverage	coverage	coverage
	(suburb or	· (suburb or	(suburb or	(suburb or	(suburb or
	forest).	forest).	forest).	forest).	forest).
Vulnerability		,	,	,	
Maximum heat exposure duration (s)	30	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No	No
Accuracy					
Grid resolution	Low	Low	Low	Low	Low
Reporting					
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	1. · · ···	1 F			1 F
Results	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4	Jet Fire 20% H2 - 80% CH4	Jet Fire CH4	Jet Fire H2	Jet Fire 80% H2 - 20% CH4

Source Definition

Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s)	1154.3	965.81	884.32	2382.2	1556.9
Fire Results					
Wind speed at avg. jet height (m/s)	11.413	11.588	11.689	11.144	11.213
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)	13.328	15.093	15.995	7.0217	10.538
Frustum lift off height (b) (m)	28.708	30.027	30.826	27.662	27.38
Width of frustum base (W1) (m)	1.1513	1.1827	1.2058	1.1079	1.123
Width of frustum tip (W2) (m)	52.623	58.681	62.448	42.772	46.084
Length of frustum (flame) (Rl) (m)	142.54	155.79	164.02	122.91	128.44
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW	58;-1;31;5	3 69;-1;38;5	5 97 5;-1;42;6	5 2 6;-6;13;	4 3 46;-1;21;46
Surface area of frustum (m2)	14410	17603	19747	10030	11338
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)	400	400	400	70	400
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)	312.6	312.6	312.6	70	312.6
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	11.833	13.308	14.15	1.9281	10.003
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	67.771	67.773	67.771	67.759	67.769
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.055854	0.062816	0.066793	0.04065	0.047219
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	808.91	946.1	1026.8	71.993	646.6
Percentage first degree burns at Xd (%)	99.927	100	100	0	99.393
Percentage second degree burns at Xd (%)	44.984	63.565	72.37	0	21.125
Percentage lethal burns at Xd (%)	25.445	39.762	48.005	0	10.862
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire
Heat radiation contours distance [m]	50% H2 -	20% H2 -	CH4	H2	80% H2 -
	50% CH4	80% CH4		•	20% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour	123	143	155	0	100
	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire
Lethality contours distance [m]	50% H2 - 50% CH4	20% H2 - 80% CH4	CH4	H2	80% H2 - 20% CH4
1 % lethality contour	164	186	200	0	139
Other information					
Main program		20122111			

Main program Last calculation EFFECTS 12.0.1.22111 29.11.2023 13:07:43

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 13:07:43

Annexe B Résultats des modélisations EFFECTS pour les microréseaux d'hydrogène pur

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (21.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

puts Gas Release from Lo Pipeline CH4		Gas Release from Long Pipeline H2
Process Conditions		
Chemical name	METHANE (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	5	500
Calculation Method		
Use which representative rate	Maximum rate	Maximum rate
Maximum release duration (s)	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes
Source Definition		
Flowrate inlet feed (kg/s)	0 0	
Process Dimensions		
Pipeline length (km)	5	5
Pipeline diameter (mm)	60	60
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045
Environment		
Ambient temperature (°C)	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151

ults Gas Release from Lon Pipeline CH4		Gas Release from Long Pipeline H2
Source Definition	·	•
Initial mass in pipeline (kg)	48.854	465.33
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.29243	5.0489
Model valid until time (s)	5.7115	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.46681	9.8716
Based upon duration until (s)	30	30
Maximum mass flow rate (kg/s)	4.9735	157.41
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	84.853	84.853
Representative release rate (kg/s)	4.9735	157.41
Representative outflow duration (s)	10	3
Representative pressure (bar)	5	500
Representative temperature (°C)	9	9
Representative density (kg/m3)	1.2072	1.027
Process Dimensions		
Pipeline volume (m3)	14.137	14.137

Contour maximum distances

Other information	
Main program	EFFECTS 12.0.1.22111
Last calculation	29.11.2023 22:08:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 22:09:41

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters		
Inputs	Jet Fire H2 500 bar/6 c	m Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
Process Conditions		
Chemical name	HYDROGEN (DIPPR)	METHANE (DIPPR)
Exit temperature (°C)	9	9
Exit pressure (bar)	500	5
Source Definition		
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	157.41	4.9735
Process Dimensions		
Hole diameter (mm)	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded edges	Rounded edges
Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0
Meteo Definition		
Pasquill stability class	D (Neutral)	D (Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5
Predefined wind direction	W	W
Environment		
Ambient temperature (°C)	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1 0151
Ambient relative humidity (%)	70	70
Roughness length description	Regular large obstacle	Regular large obstacle
	coverage (suburb or	coverage (suburb or
	forest).	forest).
Vulnerability	,	
Maximum heat exposure duration (s)	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No
Accuracy		
Grid resolution	Low	Low
Reporting		
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5
Results	Jet Fire H2 500 bar/6 c	m Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
Source Definition		
Type of flow of the jet	Choked flow	Choked flow
Exit velocity of expanding jet (m/s)	2587.7	623.39
Fire Results		
Wind speed at avg. jet height (m/s)	9.6524	5.9852
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)	6.8931	18.353
Frustum lift off height (b) (m)	14.305	2.6557
Width of frustum base (W1) (m)	0.37651	0.095115
Width of frustum tip (W2) (m)	21.375	4.7853
Length of frustum (flame) (RI) (m)	62.219	13.033
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW	18;-3;7;21	6;0;4;5

2514.8

0.88842

0.018675

67.96

70

70

Surface area of frustum (m2)

(Max) Viewfactor at Xd (-)

Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)

(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)

Atmospheric transmissivity at Xd (%)

Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)

119.51

287.41

225.91

68.31

0.16757

0.0010859

Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	25.622	2.7715
Percentage first degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0
Contour maximum distances		
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 500	bar/6 cm Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	13
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 500	bar/6 cm Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm

0

Other information Main program Last calculation

1 % lethality contour

EFFECTS 12.0.1.22111 30.11.2023 22:36:02

16

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:36:03

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (21.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

Inputs	Gas Release from Long Pipeline H2			
Process Conditions				
Chemical name	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	100	20	33	50
Calculation Method				
Use which representative rate	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
	rate	rate	rate	rate
Maximum release duration (s)	30	30	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes
Source Definition				
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0
Process Dimensions				
Pipeline length (km)	5	5	5	5
Pipeline diameter (mm)	20	100	60	40
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045
Environment				
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151

Gas ReleaseGas ReleaseGas ReleaseGas Releasefrom Longfrom Longfrom Longfrom LongPipeline H2Pipeline H2Pipeline H2Pipeline H2

Source Definition	-	-	-	-
Initial mass in pipeline (kg)	12.721	66.676	39.297	26.196
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.10134	0.73762	0.42279	0.26053
Model valid until time (s)	1.9527	1.9527	1.9527	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.18564	1.5777	0.80574	0.47507
Based upon duration until (s)	30	30	30	30
Maximum mass flow rate (kg/s)	3.8798	19.862	11.752	7.8738
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	28.284	141.42	84.853	56.569
Representative release rate (kg/s)	3.8798	19.862	11.752	7.8738
Representative outflow duration (s)	3	3	3	3
Representative pressure (bar)	100	20	33	50
Representative temperature (°C)	9	9	9	9
Representative density (kg/m3)	1.1087	1.03	1.0603	1.0805
Process Dimensions				
Pipeline volume (m3)	1.5708	39.27	14.137	6.2832

Contour maximum distances

Results

Other information	
Main program	EFFECTS 12.0.1.22111
Last calculation	30.11.2023 22:32:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:32:55

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters

Inputs	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
Process Conditions					
Chemical name	HYDROGENHYDROGENHYDROGENMETHANEHYDR				EHYDROGEN
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Exit temperature (°C)	9	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	100	20	50	5	33
	2.0700	10.000	7.0720	4.0725	44 750
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	3.8798	19.862	1.8738	4.9735	11.752
Hole diameter (mm)	28.284	141.42	56.569	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
	edges	edges	edges	edges	edges
Outflow angle in XZ plane (0°=norizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
				_	
Pasquill stability class					D
M' and M' and M' M' M' M' M' M' M' M'	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5	5	5	5
	VV	VV	VV	VV	VV
Environment	20	20	20	20	
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70	70
Roughness length description	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	large	large	large	large	large
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverage	coverage	coverage
	(suburb o	r (suburb o	r (suburb o	r (suburb o	r (suburb or
Mala and State	forest).	forest).	torest).	torest).	torest).
	20	20	20	20	20
Maximum neat exposure duration (s)	30 Nia	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	NO	NO	NO	NO	NO
Grid resolution					
Reporting	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	lot Eiro	Jet Fire	lat Eira	lat Eira	lot Eiro
Posulte		H2 20			
Results	H2 100	bar/10	nz 50	CH4 5 bor/6 cm	HZ 33
	bai/2Cm	cm	Jai/4CIN		
Source Definition					
Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s) Fire Results	2430.2	2155.3	2331.1	623.39	2258.8

Wind speed at avg. jet height (m/s) Angle between hole and flame axis (alpha) (deg) Frustum lift off height (b) (m) Width of frustum base (W1) (m) Width of frustum tip (W2) (m) Length of frustum (flame) (RI) (m) Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW Surface area of frustum (m2)	6.0765 6.8216 3.0171 0.078212 4.3075 12.763 4;-1;1;4 103.7 70	7.7384 7.5499 6.0972 0.23366 9.0602 26.429 8;-1;3;9 455.68	6.7951 7.1346 4.0807 0.12466 5.916 17.423 5;-1;2;6 195.09 70	5.9852 18.353 2.6557 0.095115 4.7853 13.033 6;0;4;5 119.51 297.41	7.2035 7.3148 4.8527 0.1638 7.1062 20.846 6;-1;2;7 281.02
Surface emissive power (clear hame) (kW/m2)	70	70	70	207.41	70
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	0.043153	0.19284	0.082054	0.16757	0.11875
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	68.1	68.136	68.133	68.31	68.143
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.0009052	30.004043	10.001720	50.0010859	90.0024895
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	0.45408	3.3423	1.0697	2.7715	1.7511
Percentage first degree burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	0	0	13	0
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
1 % lethality contour	0	0	0	16	0
Other information					

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 29.11.2023 22:48:48

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 22:48:48

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.12.4ac4940 (11.12.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

	Gas Release	Gas Release	Gas Release	Gas Release	Gas Release
Inputs	from	from	from	from	from
•	Long	Long	Long	Long	Long
	H2	H2	H2	CH4	H2
Process Conditions				••••	
Chemical name	HYDROGE		NHYDROGE	METHAN	
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	150	25	75	5	50
Calculation Method					
Use which representative rate	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
	rate	rate	rate	rate	rate
Maximum release duration (s)	30	30	30	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Source Definition					
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0	0
Process Dimensions					_
Pipeline length (km)	5	5	5	5	5
Pipeline diameter (mm)	20	120	40	60	60
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Environment					
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
	Release	Release	Release	Release	Release
Results	from	from	from	from	from
Nesuris	Long	Long	Long	Long	Long
	Pipeline	Pipeline	Pipeline	Pipeline	Pipeline
	H2	H2	H2	CH4	H2
Source Definition	10 5 10				
Initial mass in pipeline (kg)	18.548	119.66	38.721	48.854	58.942
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.14783	1.3064	0.38524	0.29243	0.63437
Nodel Valid until time (s)	1.9527	1.9527	1.9527	5./115	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.27214	2.96/9	0.70377	0.4008 I	1.2101
Based upon duration until (s)	5U E 7270	30 25 607	3U 11 734	3U 4 0725	30 17 716
Calculated corresponding Hele Diameter (mm)	2.1210	35.097 160 71	56 560	4.9733	0/ 952
	20.204 5 7279	25 607	30.309 11 73 <i>1</i>	04.035	04.033
Representative outflow duration (s)	2	2	2	4.9735	2
Representative procesure (bar)	5 150	5 25	5 75	5	5
Representative temperature ($^{\circ}$ C)	9	9	9	9	9
Representative density (kg/m3)	1 106	1 0144	1 0777	1 2072	1 0571
Process Dimensions					
Pipeline volume (m3)	1 5708	56.549	6,2832	14,137	14,137
		20.275	5.2052		

Contour maximum distances

Other information

Main program

EFFECTS 12.0.1.22111

Last calculation

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 11.12.2023 14:25:37

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.12.79c21b6 (11.12.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters

Inputs	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
Process Conditions					
Chemical name	HYDROGEINHYDROGEINHYDROGEINHETHANEHY				
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Exit temperature (°C)	9 150	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	150	25	15	5	50
Source Definition	F 7270	25 607	11 724	4 0725	17 716
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	5./3/8	35.697	11./24	4.9735	17.716
	20.204	100 71	56 560	04.052	04.052
Hole diameter (mm)	28.284 Decured a d	169./1 Decide d	56.569 Decisional de al	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
Outflow angle in VZ plane (0° having the 00° watting) (dec)	eages	eages	eages	eages	eages
Unight of release (7 coordinate) (m)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
Descuill stability close					
Pasquill stability class	(Noutral)	(Noutral)	D (Noutral)	(Noutral)	D (Noutral)
Wind speed at 10 m height (m/c)	(Neutral)	(Neutral)	(ineutral)	(Neutral)	(Neutral)
Production direction	J \\/	J \\/	5 \\/	5	5 W
	vv	vv	vv	vv	vv
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient temperature (C)	20	20	20	20	20
Ambient plessure (bai)	70	70	70	70	70
Poughness length description	Poqular	Poqular	Poqular	Poqular	Pogular
Roughness length description	largo	largo	largo	largo	largo
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverade	coverade	coverage
	(suburb o	burb or (suburb or (suburb or (suburb			
	forest)	forest)	forest)	forest)	forest)
Vulnerability					
Maximum heat exposure duration (s)	30	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No	No
Accuracy	-	-	-	-	-
Grid resolution	Low	Low	Low	Low	Low
Reporting					
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	lat Eiro	Jet Fire	lot Eiro	lot Fire	lot Eiro
Posulte		H2 25			
Results	H2 150	bar/12	nz / j	CH4 5 bar/6 cm	har/6 cm
	uai/2Cin	cm	Jai/4 CM		
Source Definition					
Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s) Fire Results	2478.1	2203.9	2392	623.39	2331.1

Wind speed at avg. jet height (m/s) Angle between hole and flame axis (alpha) (deg) Frustum lift off height (b) (m) Width of frustum base (W1) (m) Width of frustum tip (W2) (m) Length of frustum (flame) (RI) (m) Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW Surface area of frustum (m2) Surface emissive power (clear flame) (kW/m2) Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2) (Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2) Atmospheric transmissivity at Xd (%) (Max) Viewfactor at Xd (-) Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3) Percentage first degree burns at Xd (%) Percentage lethal burns at Xd (%)	6.4507 6.8569 3.535 0.088624 5.0663 14.988 4;-1;2;5 143.19 70 70 0.059928 68.116 0.0012569 0.70355 0 0 0	8.2959 7.503 7.783 0.2996 11.639 33.869 10;-1;4;12 750.48 70 70 0.31389 68.103 0.0065843 6.3995 0 0 0	7.1709 7.1104 4.7992 0.14149 6.9792 20.529 26;-1;2;7 271.06 70 0.11447 68.137 30.0024 1.6674 0 0	5.9852 18.353 2.6557 0.095115 4.7853 13.033 6;0;4;5 119.51 287.41 225.91 0.16757 68.31 0.0010855 2.7715 0 0 0	7.5873 7.2513 5.7365 0.18633 8.4213 24.68 7;-1;3;8 394.04 70 70 0.16668 68.132 90.0034949 2.752 0 0 0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	0	0	13	0
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
1 % lethality contour	0	0	0	16	0
Other information					

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 11.12.2023 12:15:35

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 11.12.2023 12:16:27