

ANNEXE 8 : Modélisation des scénarios gaz du stockage de H2 (24 pages)

SAFRAN Châtelleraut

Projet d'extension d'un bâtiment de traitement des métaux

Analyse des risques relative à la nouvelle localisation des centrales de détente d'hydrogène

VERSION	DATE D'EMISSION	AUTEUR
0	09/07/2018	M. DESMERCIERES

SOMMAIRE

1. Introduction	4
1.1. Installations concernées	4
1.2. Scénario majorant retenu	4
1.3. Identification des phénomènes dangereux à étudier	4
2. Description de la méthodologie d'analyse de risque	4
2.1. Modélisation des scénarios accidentels	5
2.1.1 Seuils d'effets retenus pour la quantification des conséquences	5
2.1.1.1 Seuils des effets thermiques	5
2.1.1.2 Seuils des effets de surpression	6
2.1.2 Méthodes d'évaluation des conséquences	6
2.1.2.1 Modélisations des effets thermiques d'un jet enflammé	6
2.1.2.2 Modélisation des effets thermiques d'un flash fire	7
2.1.2.3 Modélisation des effets de surpression d'un UVCE	7
2.1.3 Conditions naturelles	10
2.1.3.1 Conditions météorologiques	10
2.1.3.2 Conditions orographiques	10
2.2. Analyse détaillée des risques	11
2.2.1 Objectifs de l'analyse détaillée des risques	11
2.2.2 Quantification de la probabilité d'occurrence des accidents	11
2.2.2.1 Echelle de fréquence	11
2.2.2.2 Perte de confinement sur une canalisation aérienne	11
2.2.3 Quantification de la gravité des accidents	13
2.2.3.1 Echelle de gravité	13
2.2.3.2 Règles de comptage des personnes exposées	13
2.2.4 Qualification de l'aléa technologique	15
2.2.4.1 Positionnement des accidents majeurs dans la matrice de risque réglementaire	15
2.2.4.2 Réduction des risques	15
2.2.5 Analyse des effets domino	16
3. Modélisations des phénomènes dangereux	16
3.1. Distances d'effets évaluées	16
3.2. Cartographies	18
4. Analyse détaillée des risques	22
4.1. Rupture franche d'une canalisation 200 barg (centrales de détente d'hydrogène)	22
4.1.1 Détermination du niveau de probabilité	22
4.1.2 Détermination du niveau de gravité	22
4.1.3 Placement dans la matrice de risque réglementaire	22
4.1.4 Analyse des effets domino générés par les installations étudiées	22
4.1.4.1 Effets domino INTERNES	22
4.1.4.2 Effets domino EXTERNES	23
4.1.5 Analyse des effets domino générés sur les installations étudiées	23
4.1.5.1 Effets domino INTERNES	23
4.1.5.2 Effets domino EXTERNES	23
5. Conclusions	24

Liste des tableaux

Tableau 1 : Seuils des effets thermiques (feu de durée > 2 minutes)	5
Tableau 2 : Seuils des effets thermiques (feu de durée < 2 minutes, boule de feu)	5
Tableau 3 : Seuils des effets de surpression	6
Tableau 4 : Sélection du degré de violence d'une explosion.....	7
Tableau 5 : Indice de sévérité et surpression maximale - Méthode « Multi-Energie »	8
Tableau 6 : Conditions météorologiques retenues	10
Tableau 7 : Echelle de fréquence retenue (échelle réglementaire)	11
Tableau 8 : Fréquence de perte de confinement – Canalisation (source : Purple Book)	12
Tableau 9 : Probabilités totales d'inflammation (source : Loss Prevention in the Process Industries)	12
Tableau 10 : Echelle de gravité retenue (échelle réglementaire)	13
Tableau 11 : Nombre de personnes exposées – Type de terrains non bâtis	14
Tableau 12 : Matrice de risque réglementaire	15

Liste des figures

Figure 1 : Abaque de la méthode « Multi-Energie »	9
Figure 2 : Cartographie « Flash fire » centrée sur le cadre H2 le plus proche de l'unité de compression gaz	19
Figure 3 : Cartographie « Flash fire » centrée sur le cadre H2 le plus proche du local Chaufferie	19
Figure 4 : Cartographie « Jet enflammé » centrée sur le cadre H2 le plus proche de l'unité de compression gaz	20
Figure 5 : Cartographie « Jet enflammé » centrée sur le cadre H2 le plus proche du local Chaufferie	20
Figure 6 : Cartographie « UVCE » centrée sur le cadre H2 le plus proche de l'unité de compression gaz	21
Figure 7 : Cartographie « UVCE » centrée sur le cadre H2 le plus proche du local Chaufferie.....	21

Acronymes

- DDAE : Dossier de Demande d'Autorisation d'Exploiter
- DN : Diamètre Nominal
- ERC : Evénement Redouté Central
- LII : Limite Inférieure d'Inflammabilité
- MMR : Mesure de Maîtrise du Risque
- PHAST : Process Hazard Analysis Software Tool
- PhD : Phénomène Dangereux
- SEI : Seuil des Effets Irréversibles
- SEL : Seuil des premiers Effets Létaux
- SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs
- UVCE : Unconfined Vapor Cloud Explosion

1. INTRODUCTION

1.1. Installations concernées

La présente étude porte sur les installations suivantes :

- Centrale de détente d'hydrogène 2x3 cadres vers fours FIC ;
- Centrale de détente d'hydrogène 2x1 cadre vers réseau plasma.

Il est à noter que chaque cadre d'hydrogène est constitué de 16 bouteilles d'une capacité unitaire de 9,875 m³.

1.2. Scénario majorant retenu

Le scénario majorant retenu dans le cadre de la présente étude est la rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène.

1.3. Identification des phénomènes dangereux à étudier

Les phénomènes dangereux à prendre en compte en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées sont les suivants :

- **Jet enflammé** (effets thermiques) : Un jet enflammé résulte de la combustion d'un gaz combustible rejeté de manière continue avec une certaine vitesse. Les jets enflammés ont lieu lorsqu'un gaz inflammable est dégagé par une brèche survenant sur une canalisation/un équipement sous pression et qu'il s'enflamme au contact d'une source d'inflammation (inflammation immédiate) ;
- **Flash fire** (effets thermiques) / **Explosion** (effets de surpression) : Les phénomènes de flash fire et d'explosion surviennent lorsque des nuages de gaz générés par une brèche survenant sur une canalisation/un équipement s'enflamme au contact d'une source d'inflammation (inflammation retardée).

2. DESCRIPTION DE LA METHODOLOGIE D'ANALYSE DE RISQUE

L'objet de ce chapitre est de présenter la méthodologie d'analyse de risques appliquée dans le cadre de la présente étude.

La démarche d'analyse de risques se décompose en 2 étapes :

- Modélisation des phénomènes dangereux ;
- Analyse détaillée des risques.

Ces points sont détaillés dans les paragraphes ci-dessous.

2.1. Modélisation des scénarios accidentels

Les conséquences des scénarios d'accidents ont été calculées selon une approche déterministe et conservative. Cette approche est fondée sur des hypothèses et des modèles majorants.

2.1.1 Seuils d'effets retenus pour la quantification des conséquences

Les seuils de référence retenus pour les effets thermiques et de surpression sont ceux de l'arrêté ministériel du 29 septembre 2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

2.1.1.1 Seuils des effets thermiques

Les valeurs seuils applicables pour les effets thermiques de jets enflammés d'une durée supérieure à 2 minutes sont présentées dans le tableau suivant :

	Valeurs	Commentaires
Effets sur l'homme	8 kW/m ²	Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine
	5 kW/m ²	Seuil des premiers Effets Létaux (SEL) correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine
	3 kW/m ²	Seuil des Effets Irréversibles (SEI) correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
Effets sur les structures	200 kW/m ²	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes
	20 kW/m ²	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton
	16 kW/m ²	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures (hors structures béton)
	8 kW/m ²	Seuil des effets domino et correspondant au seuil des dégâts graves sur les structures
	5 kW/m ²	Seuil des destructions des vitres significatives

Tableau 1 : Seuils des effets thermiques (feu de durée > 2 minutes)

Les valeurs seuils applicables pour les effets thermiques de jets enflammés d'une durée inférieure à 2 minutes sont présentées dans le tableau suivant :

	Valeurs	Commentaires
Effets sur l'homme	1800 (kW/m ²) ^{4/3} .s	Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine
	1000 (kW/m ²) ^{4/3} .s	Seuil des premiers Effets Létaux (SEL) correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine
	600 (kW/m ²) ^{4/3} .s	Seuil des Effets Irréversibles (SEI) correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine

Tableau 2 : Seuils des effets thermiques (feu de durée < 2 minutes, boule de feu)

Les effets thermiques d'un feu de nuage sont associés à la dispersion du nuage, et en particulier à la distance atteinte à la LII. Ainsi, conformément à la circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux Plans de Prévention des Risques Technologiques dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003, les distances d'effets sont les suivantes :

- Distance au seuil des effets létaux significatifs : Distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII) ;
- Distance au seuil des effets létaux : Distance à la LII ;
- Distance au seuil des effets irréversibles : 1,1 x Distance à la LII.

2.1.1.2 Seuils des effets de surpression

Les valeurs seuils applicables pour les effets de surpression sont présentées dans le tableau suivant :

	Valeurs	Commentaires
Effets sur l'homme	200 mbar	Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) correspondant à la zone des dangers très graves pour la vie humaine
	140 mbar	Seuil des premiers Effets Létaux (SEL) correspondant à la zone des dangers graves pour la vie humaine
	50 mbar	Seuil des Effets Irréversibles (SEI) correspondant à la zone des dangers significatifs pour la vie humaine
	20 mbar	Seuil des effets irréversibles correspondant à la zone des effets indirects par bris de vitres
Effets sur les structures	300 mbar	Seuil des dégâts très graves sur les structures
	200 mbar	Seuil des effets domino
	140 mbar	Seuil des dégâts graves sur les structures
	50 mbar	Seuil des dégâts légers sur les structures
	20 mbar	Seuil de destructions significatives de vitres

Tableau 3 : Seuils des effets de surpression

2.1.2 Méthodes d'évaluation des conséquences

Les modèles théoriques utilisés dans cette étude pour analyser les effets des phénomènes physiques sont présentés ci-dessous. Ils concernent :

- les effets thermiques d'un jet enflammé (§2.1.2.1) ;
- les effets thermiques d'un flash fire (§2.1.2.2) ;
- les effets de surpression d'une explosion en milieu confiné ou encombré (§2.1.2.3).

Note : Les phénomènes dangereux ont été quantifiés par l'intermédiaire du logiciel PHAST version 6.7, développé par DNV TECHNICA.

2.1.2.1 Modélisations des effets thermiques d'un jet enflammé

L'inflammation d'un jet libre turbulent de gaz amène la formation d'un « jet enflammé » qui n'évolue pas dans le temps, tant que le jet lui-même n'évolue pas. Ce type de feu est caractérisé par une flamme fortement rayonnante.

Le modèle utilisé par Bureau Veritas Exploitation pour évaluer les effets thermiques d'un jet enflammé est celui développé par le centre de recherche de Shell. C'est un modèle semi-empirique, validé par des tests en laboratoire ainsi que des tests en grandeur réelle sur des sites industriels.

Le rejet est supposé horizontal, sauf si la conformation des circuits (par exemple une canalisation de transfert verticale) rend physiquement impossible cette possibilité. Les pertes de charge sont négligées. Le périmètre de radiation thermique est ainsi majoré par rapport à toute autre orientation de la fuite.

2.1.2.2 Modélisation des effets thermiques d'un flash fire

Un flash fire se produit lorsqu'un nuage de gaz à la dérive rencontre une source d'inflammation. La réaction de combustion se déroule très rapidement et les effets thermiques du phénomène sont alors principalement causés par le passage du front de flamme, plutôt que par le rayonnement thermique. C'est pourquoi l'effet léthal dû aux effets thermiques du flash fire n'est considéré qu'à l'intérieur du nuage de gaz.

La modélisation de ce phénomène s'appuie sur la modélisation de la dispersion du nuage et sur les distances atteintes à une concentration égale à la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Ces distances indiquent en effet l'extension maximale des effets létaux du phénomène (cf. paragraphe §2.1.1.1).

2.1.2.3 Modélisation des effets de surpression d'un UVCE

La méthode utilisée pour modéliser les effets de surpression en milieu confiné ou encombré créés par l'inflammation de nuage de vapeurs inflammables est la méthode « Multi-Energie », développée par l'organisme hollandais TNO. Son concept repose sur l'idée que les conditions de combustion dans un nuage inflammable peuvent varier en fonction du confinement de l'environnement. Plus le confinement autour d'une explosion est important, plus l'explosion sera violente.

La méthode assimile l'explosion dans un nuage à une explosion à symétrie hémisphérique à vitesse de flamme constante. La méthode présente 10 degrés de violence correspondant à différentes vitesses de flamme. Le degré de violence est fonction de la réactivité du gaz, de la présence d'un confinement partiel éventuel, de la densité de ce confinement et de la forme du nuage :

Energie d'inflammation		Obstruction			Confinement		Degré de violence
Faible	Elevée	Elevée	Faible	Nulle	Oui	Non	
	X	X			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
	X		X		X		5-7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X			4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

Tableau 4 : Sélection du degré de violence d'une explosion

L'énergie d'inflammation est à considérer comme :

- faible lorsque la source d'ignition du nuage de gaz est une flamme, une étincelle ou une surface chaude (sources d'inflammation courantes) ;
- élevée lorsqu'une explosion confinée peut être à l'origine de l'inflammation du nuage.

L'obstruction est :

- élevée lorsque le volume des obstacles correspond à plus de 30% du volume total de la zone encombrée, l'espace entre obstacles étant inférieur ou égal à 3 m ;
- faible lorsque des obstacles existent mais que les conditions précédentes ne sont pas simultanément satisfaites ;
- nulle lorsqu'il n'y a pas d'obstacle dans le nuage inflammable.

Enfin, il y a confinement lorsque le nuage inflammable est confiné par des surfaces solides sur 2 à 3 faces. Si la seule surface solide à considérer est le sol, le confinement est supposé inexistant.

A chaque degré de violence correspond une surpression maximale ΔP_{max} donnée ci-dessous :

Degré de violence	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP_{max} (mbar)	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	16000

Tableau 5 : Indice de sévérité et surpression maximale - Méthode « Multi-Energie »

Une fois le degré de violence estimé, les distances d'effets aux différents seuils de surpression sont données par l'abaque de la méthode « Multi-Energie » (courbes de décroissance de la surpression par indice de sévérité) :

En abscisse, la distance (R) est adimensionnée par l'énergie de l'explosion (E) et la pression atmosphérique (Pat). En ordonnée, la surpression ΔP est adimensionnée par la pression atmosphérique Pat.

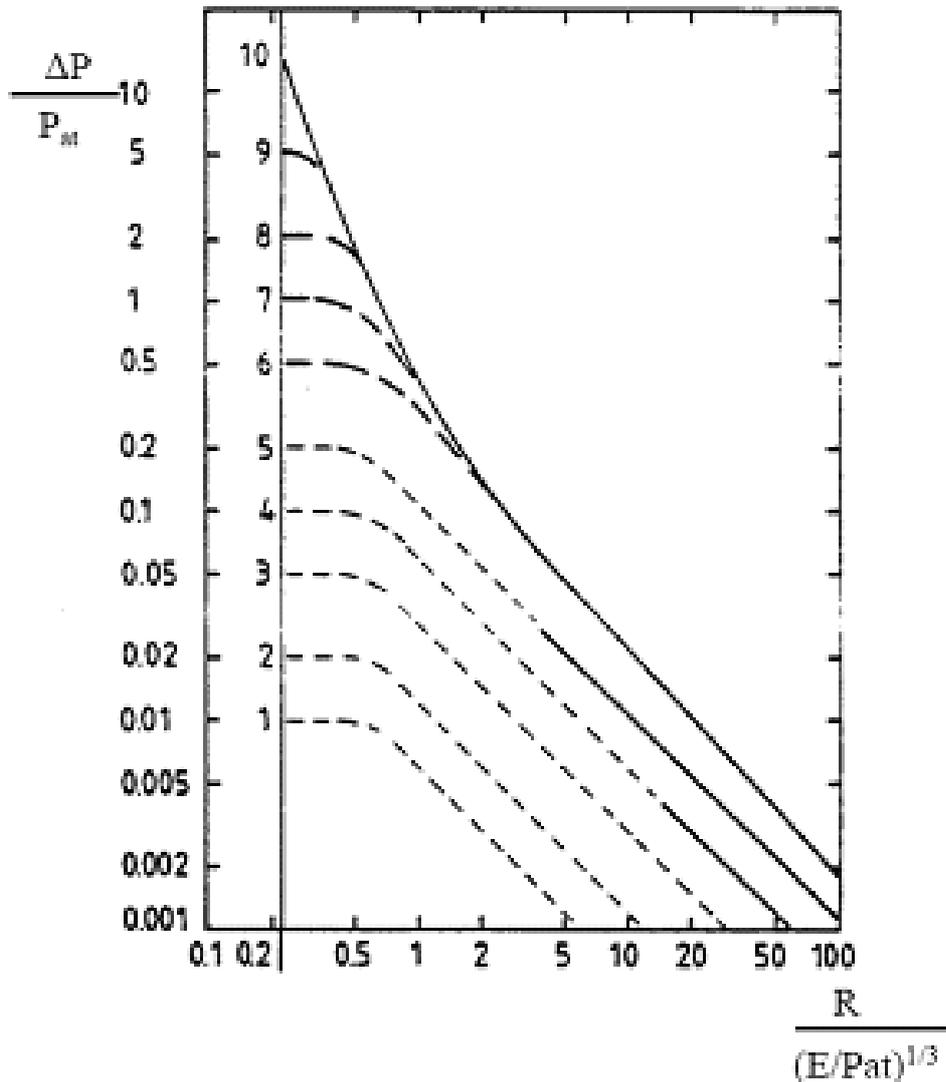


Figure 1 : Abaque de la méthode « Multi-Energie »

Comme le propose l'annexe II de l'arrêté du 29 septembre 2005, la distance au seuil d'effet à 20 mbar sera calculée en prenant le double de la distance au seuil d'effet à 50 mbar lorsque la modélisation est réalisée avec un degré de violence supérieur ou égal à 3 (degré à partir duquel une distance au seuil d'effet à 50 mbar est évaluée).

Dans le cadre de la présente étude, un degré de violence de 5 a été pris en compte suivant une approche conservatrice (énergie d'inflammation faible, obstruction élevée, absence de confinement).

2.1.3 Conditions naturelles

2.1.3.1 Conditions météorologiques

Les conditions atmosphériques (stabilité et vitesse de vent) ont une influence certaine sur la dispersion des polluants gazeux. Ces conditions sont usuellement désignées par une lettre (de A à F), indiquant la stabilité atmosphérique mesurée sur l'échelle de Pasquill-Gifford, et un chiffre correspondant à la vitesse du vent en m/s.

Deux types de conditions ont été retenus au cours de cette étude, conformément à la fiche N°2 « La dispersion atmosphérique » de la circulaire du 10 mai 2010. Il s'agit des conditions suivantes :

- les conditions (D/5) (ou « 5D ») correspondent à une atmosphère neutre (classe D) associée à une vitesse de vent de 5 m/s. Ce sont des conditions moyennement favorables à la dispersion ;
- les conditions (F/3) (ou « 3F ») conjuguent une forte stabilité (classe F) et le vent le plus important que l'on puisse lui associer (3 m/s). Ce sont des conditions défavorables à la dispersion ; dans ces conditions, le nuage dérivant se disperse difficilement dans l'air et reste concentré sur une plus longue distance.

Les conditions météorologiques retenues pour la modélisation des phénomènes dangereux survenant en extérieur sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	5D	3F
Vitesse de vent	5 m/s	3 m/s
Stabilité atmosphérique (échelle de Pasquill-Gifford)	D	F
Atmosphère	Neutre	Stable
Température ambiante	20°C	15°C
Température du sol	20°C	15°C
Humidité relative de l'air	70%	70%
Radiation solaire	0,5 kW/m ²	0 kW/m ²

Tableau 6 : Conditions météorologiques retenues

2.1.3.2 Conditions orographiques

Les conditions orographiques, c'est-à-dire essentiellement l'état de « rugosité » du sol, influent sur la turbulence atmosphérique et donc sur la dispersion : plus le sol est « rugueux », plus la vitesse de vent près du sol est ralentie et donc moins bonne est la dispersion. L'orographie d'un site permet ainsi de tenir compte des obstacles présents dans l'environnement, de la végétation et des bâtiments d'une manière simplifiée, à travers un coefficient de rugosité.

Les calculs de dispersion sont réalisés avec le logiciel PHAST v6.7 avec un paramètre de rugosité du sol de 0,17 représentatif de sites sans obstacle important.

2.2. Analyse détaillée des risques

2.2.1 Objectifs de l'analyse détaillée des risques

Les objectifs de l'Analyse Détaillée des Risques sont les suivants :

- Evaluation quantitative de la probabilité d'occurrence des accidents ;
- Evaluation quantitative du niveau de gravité des scénarios d'accidents ;
- Positionnement des accidents dans la matrice de risque réglementaire ;
- Analyse des effets domino.

2.2.2 Quantification de la probabilité d'occurrence des accidents

2.2.2.1 Echelle de fréquence

La fréquence des accidents associés aux phénomènes dangereux étudiés sera évaluée à l'aide de l'échelle définie par l'arrêté du 29 septembre 2005 ; elle est présentée ci-après :

Niveau de fréquence	E	D	C	B	A
Qualitative	Possible mais extrêmement peu probable : « N'est pas impossible au vu des connaissances actuelles mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installations »	Très improbable : « S'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité »	Improbable : « S'est déjà produit dans ce secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de sa probabilité »	Probable : « S'est déjà produit et/ou peut se reproduire pendant la durée de vie de l'installation »	Courant « S'est produit sur site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctrices »
½ quantitative	Echelle intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative				
Quantitative (par unité et par an)	$F < 10^{-5}$	$10^{-4} > F > 10^{-5}$	$10^{-3} > F > 10^{-4}$	$10^{-2} > F > 10^{-3}$	$F > 10^{-2}$

Tableau 7 : Echelle de fréquence retenue (échelle réglementaire)

2.2.2.2 Perte de confinement sur une canalisation aérienne

La fréquence des différents phénomènes dangereux susceptibles de survenir en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées sera déduite de la fréquence de cet Evénement Redouté Central (ERC), par le biais d'un arbre d'événements qui permettra de prendre en compte la probabilité d'inflammation.

2.2.2.2.1 Evaluation des fréquences des événements redoutés centraux de type perte de confinement

Pour évaluer les fréquences des événements redoutés centraux de type perte de confinement sur une canalisation, la base de données suivante a été retenue : Purple Book - Guidelines for Quantitative Risk Assessment, TNO, CPR 18E, Edition 1999 :

<u>ERC sur canalisation</u>	Rupture franche	Brèche
DN canalisation inférieur à 75 mm	$1. 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$	$5. 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$
DN canalisation compris entre 75 et 150 mm	$3. 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$	$2. 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$
DN canalisation supérieur à 150 mm	$1. 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$	$5. 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ an}^{-1}$

Tableau 8 : Fréquence de perte de confinement – Canalisation (source : Purple Book)

Il est à noter que la définition de la brèche par le Purple Book est la suivante : Perte de confinement associée à un diamètre de fuite égal à 10% du diamètre nominal de la canalisation/du flexible (maximum : 50 mm).

2.2.2.2.2 Estimation des probabilités d'inflammation

Dans une approche conservatrice, la probabilité totale d'ignition sera retenue dans la suite de cette étude.

Les probabilités totales d'inflammation utilisées sont des valeurs génériques statistiques issues de la littérature internationale (cf. "Classification of Hazardous Locations" – A.W. COX, F.P. LEES and M.L. ANG – Institution of Chemical Engineers, 1990).

Dans le cas des scénarios ayant un débit à la brèche, la probabilité d'inflammation est fonction du débit de fuite. Trois plages de débits de fuite ont été retenues dans le « Loss Prevention in the Process Industries » de F. LEES (2001) ; les probabilités totales d'inflammation qui y sont associées sont les suivantes :

Débit de fuite (kg/s)	Probabilité totale d'inflammation	
	Gaz	Liquide
1 - 10	0,034	0,02
10 - 100	0,15	0,05
> 100	0,3	0,08

Tableau 9 : Probabilités totales d'inflammation (source : Loss Prevention in the Process Industries)

2.2.2.2.3 Détermination de la probabilité des phénomènes dangereux associés

A partir des valeurs précédentes, les probabilités d'occurrence des effets des phénomènes dangereux sont calculées en faisant le produit de la fréquence d'occurrence des ERC et de la probabilité d'ignition totale de la fuite en fonction de la phase et du débit.

2.2.3 Quantification de la gravité des accidents

Le nombre de personnes exposées dans les limites d'étendue des seuils d'effets définit le niveau de gravité.

Les personnes exposées sont les personnes exposées à l'extérieur des limites du site, en tenant compte le cas échéant des mesures constructives visant à protéger les personnes contre certains effets et la possibilité de mise à l'abri des personnes en cas d'occurrence d'un phénomène dangereux si la cinétique de ce dernier et de la propagation de ses effets le permettent.

2.2.3.1 Echelle de gravité

La gravité des conséquences des accidents associés aux phénomènes dangereux étudiés sera évaluée à l'aide de l'échelle définie par l'arrêté du 29 septembre 2005 ; elle est présentée ci-après :

Niveau de gravité	Zone délimitée par le Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS)	Zone délimitée par le Seuil des Effets Létaux (SEL)	Zone délimitée par le Seuil des Effets Irréversibles sur la vie humaine (SEI)
5. Désastreux	Plus de 10 personnes exposées	Plus de 100 personnes exposées	Plus de 1000 personnes exposées
4. Catastrophique	Moins de 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées	Entre 100 et 1000 personnes exposées
3. Important	Au plus 1 personne exposée	Entre 1 et 10 personnes exposées	Entre 10 et 100 personnes exposées
2. Sérieux	Aucune personne exposée	Au plus 1 personne exposée	Moins de 10 personnes exposées
1. Modéré	Pas de zone de létalité hors établissement		Présence humaine exposée à des effets irréversibles inférieure à « une personne »

Tableau 10 : Echelle de gravité retenue (échelle réglementaire)

2.2.3.2 Règles de comptage des personnes exposées

L'évaluation du nombre de personnes impactées consiste à déterminer le nombre de personnes susceptibles d'être présentes dans les zones d'effets, selon les principes généraux issus de la fiche N°1 « Eléments pour la détermination de la gravité dans les études de dangers » de la circulaire du 10 mai 2010, dont certains sont rappelés ci-après.

Zones d'activités (industries et autres activités ne recevant pas habituellement de public) : Nombre de salariés ou nombre maximal de personnes présentes simultanément dans le cas de travail en équipes, le cas échéant sans compter leurs routes d'accès.

Logements : Le nombre de personnes pris en compte est la moyenne INSEE par logement (par défaut 2,5 personnes), sauf si les données locales indiquent d'autres chiffres ou, à défaut de données précises, la règle forfaitaire simplifiée suivante (milieu urbain et périurbain, hors centres villes et grandes agglomérations) :

- Habitat individuel dispersé : 40 personnes / hectare ;
- Habitat pavillonnaire dense : 100 personnes / hectare ;
- Habitat collectif type immeuble $\leq R + 2$: 400 à 600 personnes / hectare ;
- Habitat collectif type immeuble $> R + 2$: 600 à 1000 personnes / hectare.

Voies de circulation : « Les voies de circulation ne sont prises en compte que si elles sont empruntées par un nombre significatif de personnes qui ne sont pas déjà comptées parmi les personnes exposées dans d'autres catégories d'installations (habitation, commerce de proximité, école, mairie, église...) situées dans la même zone d'effet :

- Voies automobiles : si l'axe de circulation considéré est susceptible de connaître des embouteillages, compter 300 personnes permanentes par voie de circulation et par kilomètre exposé sinon compter 0,4 personne permanente par kilomètre exposé par tranche de 100 véhicules/jour ;
- Voies ferroviaires : 0,4 personne exposée en permanence par kilomètre et par train (= 1 train équivalent à 100 véhicules), sur la base du nombre réel de trains voyageurs circulant quotidiennement sur la voie ;
- Voies navigables : 0,1 personne permanente par km exposé et par péniche/jour ;
- Chemins et voies piétonnes (hors chemins de promenade et de randonnée) : ils ne sont pas à prendre en compte, car les personnes les fréquentant sont généralement déjà comptées comme habitants ou salariés exposés ;
- Chemins de promenade et de randonnée : 2 personnes par kilomètre exposé par tranche de 100 promeneurs/jour.

Terrains non bâtis

Type de terrains non bâtis	Nombre de personnes exposées
Terrains non aménagés et très peu fréquentés (champs, prairies, forêt, friches, marais...)	1 personne permanente exposée par tranche de 100 hectares,
Terrains aménagés mais peu fréquentés (jardins et zones horticoles, vignes, terrains de promenade, zones de pêche privée, golf peu fréquenté, gares de triage...)	1 personne permanente exposée par tranche de 10 hectares
Terrains aménagés et potentiellement fréquentés ou très fréquentés (parking, parcs et jardins publics, zones de baignades surveillées, terrains de sport (sans gradins...))	Capacité du terrain et à minima 10 personnes à l'hectare

Tableau 11 : Nombre de personnes exposées – Type de terrains non bâtis

2.2.4 Qualification de l'aléa technologique

2.2.4.1 Positionnement des accidents majeurs dans la matrice de risque réglementaire

A l'issue de l'analyse des risques, l'ensemble des accidents majeurs étudiés sont positionnés dans une matrice de risque. La matrice retenue est celle définie dans la circulaire du 10 mai 2010 ; elle est présentée ci-après :

Gravité	Probabilité (sens croissant de E vers A)				
	E	D	C	B	A
5. Désastreuse	MMR rang 2	NON	NON	NON	NON
4. Catastrophique	MMR rang 1	MMR rang 2	NON	NON	NON
3. Importante	MMR rang 1	MMR rang 1	MMR rang 2	NON	NON
2. Sérieuse			MMR rang 1	MMR rang 2	NON
1. Modérée					MMR rang 1

Tableau 12 : Matrice de risque réglementaire

2.2.4.2 Réduction des risques

La matrice de risque retenue définit trois types de zones :

- **Zone en rouge « NON » : zone de risque élevé** ⇔ accidents « inacceptables » susceptibles d'engendrer des dommages sévères à l'intérieur et hors des limites du site ;
- **Zone en orange/jaune « MMR » : zone de Mesures de Maîtrise des Risques.** Les accidents situés dans cette zone doivent faire l'objet d'une démarche d'amélioration continue en vue d'atteindre, dans des conditions économiquement acceptables, un niveau de risque aussi bas que possible, compte tenu de l'état des connaissances et des pratiques et de la vulnérabilité de l'environnement de l'installation ;
- **Zone en vert : zone de risque moindre** ⇔ accidents qui ne nécessitent pas de mesures de réduction du risque supplémentaires.

Le positionnement des phénomènes dangereux identifiés et des accidents correspondants dans cette grille de criticité permet de les hiérarchiser et d'identifier les **accidents majeurs**.

Si des accidents majeurs caractérisés par un risque résiduel « inacceptable » sont identifiés, alors des mesures complémentaires ou des recommandations seront émises afin qu'à l'issue de l'analyse des risques, aucun accident ne se situe dans la zone rouge « NON ».

2.2.5 Analyse des effets domino

L'analyse des effets domino porte sur :

- les interactions entre les installations étudiées et les installations industrielles voisines ;
- les interactions entre les installations étudiées et les autres installations du site.

La circulaire du 10 mai 2010 fournit une définition de la notion d'effets domino : « *Action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène* ».

Les effets susceptibles d'engendrer des effets domino sont de deux types :

- les flux thermiques ;
- les ondes de choc ou surpressions consécutifs à une explosion de nuage (UVCE) ou un éclatement de capacité.

L'analyse des effets domino consiste à inventorier les installations ou équipements touchés par les rayons d'effets domino des phénomènes dangereux des installations étudiées et d'évaluer les nouveaux phénomènes dangereux induits (possibilité de « sur-accidents »).

Un phénomène dangereux domino est à considérer comme un « sur-accident » s'il remplit les 2 conditions suivantes :

- la probabilité du phénomène initiateur contribue fortement à la probabilité du phénomène dangereux domino, soit $P(\text{PhDi}) > P(\text{PhDd})$;
- la gravité du phénomène dangereux domino est supérieure à celle du phénomène dangereux initiateur à la base de l'effet domino, soit : $G(\text{PhDd}) > G(\text{PhDi})$.

Les seuils d'effets domino retenus sont conformes à ceux de l'arrêté du 29 septembre 2005 :

- pour les effets thermiques : 8 kW/m^2 ;
- pour les effets de surpression : 200 mbar.

Remarque : Les effets thermiques issus de l'inflammation d'un nuage (« flash fire ») ne sont pas pris en compte dans l'analyse des effets domino car seuls les équipements présents dans le nuage pourraient subir des effets thermiques en cas d'inflammation du nuage. Ces effets surviennent lorsque les équipements sont traversés par le front de flamme, ce qui correspond à une durée d'exposition très courte. Etant donné que les équipements sont conçus pour ne pas prendre feu (choix des matériaux), les dommages engendrés seront par conséquent limités et ne conduiront pas à des pertes de confinement.

3. MODELISATIONS DES PHENOMENES DANGEREUX

3.1. Distances d'effets évaluées

Les distances d'effets des différents phénomènes dangereux modélisés en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées (flash fire, jet enflammé, UVCE) sont fournies dans la fiche modélisation suivante :

Rupture d'une canalisation 200 barg sur une centrale de détente d'hydrogène

DONNEES D'ENTREE

PARAMETRE	UNITE	VALEUR	COMMENTAIRE
Produit mis en jeu	-	Hydrogène	
Phase du produit rejeté	-	Gaz	
Pression de service	barg	200,0	
Température de service	°C	Ambiante	
Diamètre de fuite considéré	mm	7	Diamètre intérieur : 7 mm
Débit à la brèche calculé par Phast	kg/s	0,4	
Hauteur de rejet	m	1,0	
Orientation du rejet	-	Horizontale	

RESULTATS DES MODELISATIONS

Dispersion du nuage

PARAMETRE	UNITE	VALEUR
Conditions météorologiques	-	5D 3F
Distance à la Limite Inférieure d'Inflammabilité (LII)	m	19 20
Temps de stabilisation du nuage	s	2 3

FLASH FIRE - Effets thermiques

PARAMETRE	UNITE	VALEUR
Conditions météorologiques	-	5D 3F
Distance à la LII (SELS/SEL)	m	19 20
Distance à 110% de la LII (SEI)	m	21 22

Remarques :

- Les distances sont arrondies à l'unité supérieure, elles sont à compter depuis le point de rejet.
- La distance minimale entre les installations étudiées et les limites de propriété du site est d'environ 25 m :
=> Les effets létaux et irréversibles ne sortent pas des limites de propriété du site.

JET ENFLAMME - Effets thermiques

PARAMETRE	UNITE	VALEUR
Conditions météorologiques	-	5D 3F
Longueur de la flamme	m	11 11
Distance à 20 kW/m ²	m	13 13
Distance à 16 kW/m ²	m	13 13
Distance à 8 kW/m ² (SELS)	m	14 14
Distance à 5 kW/m ² (SEL)	m	15 15
Distance à 3 kW/m ² (SEI)	m	16 16

Remarques :

- Les distances sont arrondies à l'unité supérieure, elles sont à compter depuis le point de rejet.
- La distance minimale entre les installations étudiées et les limites de propriété du site est d'environ 25 m :
=> Les effets létaux et irréversibles ne sortent pas des limites de propriété du site.

UVCE - Effets de surpression

PARAMETRE	UNITE	VALEUR	
Degré de violence retenu	-	5	
Conditions météorologiques	-	5D 3F	
Distance à une surpression de 300 mbar	m	-	
Distance à une surpression de 200 mbar (SELS)	m	9 9	
Distance à une surpression de 140 mbar (SEL)	m	11 11	
Distance à une surpression de 50 mbar (SEI)	m	20 21	
Distance à une surpression de 20 mbar	m	40 42	Prise égale à 2 fois la distance au 50 mbar

Remarques :

- Les distances sont arrondies à l'unité supérieure, elles sont à compter depuis le point de rejet.
- La distance minimale entre les installations étudiées et les limites de propriété du site est d'environ 25 m :
=> Les effets létaux et irréversibles ne sortent pas des limites de propriété du site.

3.2. Cartographies

Les cartographies des zones d'effets des phénomènes dangereux sont fournies ci-après.

Elles représentent les zones délimitées par les seuils d'effets sur l'homme déterminés dans l'arrêté du 29 septembre 2005, avec la légende suivante :

- le seuil des effets létaux significatifs (SELS) est tracé en orange;
- le seuil des effets premiers létaux (SEL) est tracé en bleu ;
- le seuil des effets irréversibles (SEI) est tracé en violet.

Remarque : Les zones d'effets du flash fire et du jet enflammé ont été représentées par des cercles sur la cartographie même si ces phénomènes dangereux sont des phénomènes directionnels.

FLASH FIRE

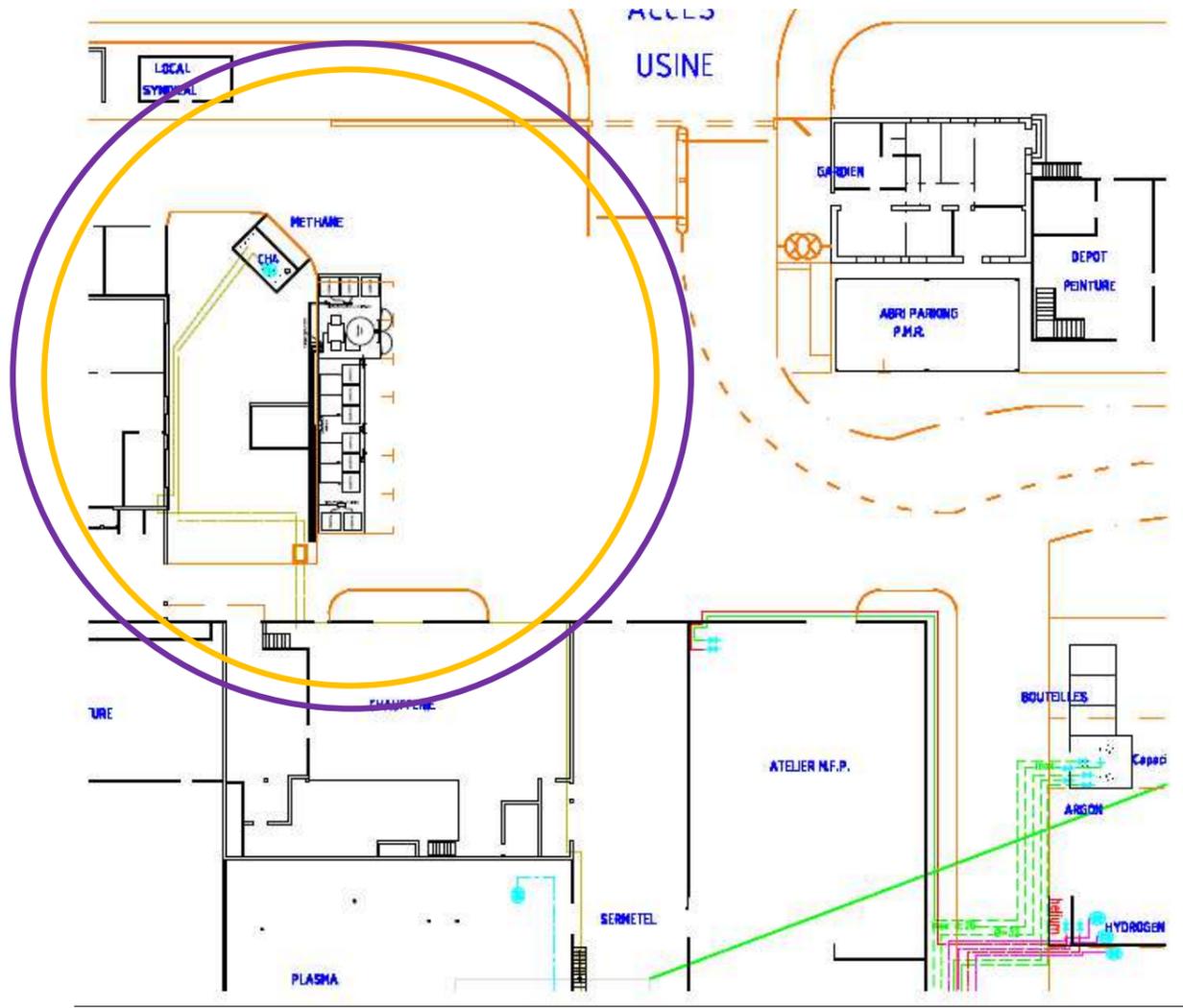


Figure 2 : Cartographie « Flash fire » centrée sur le cadre H₂ le plus proche de l'unité de compression gaz

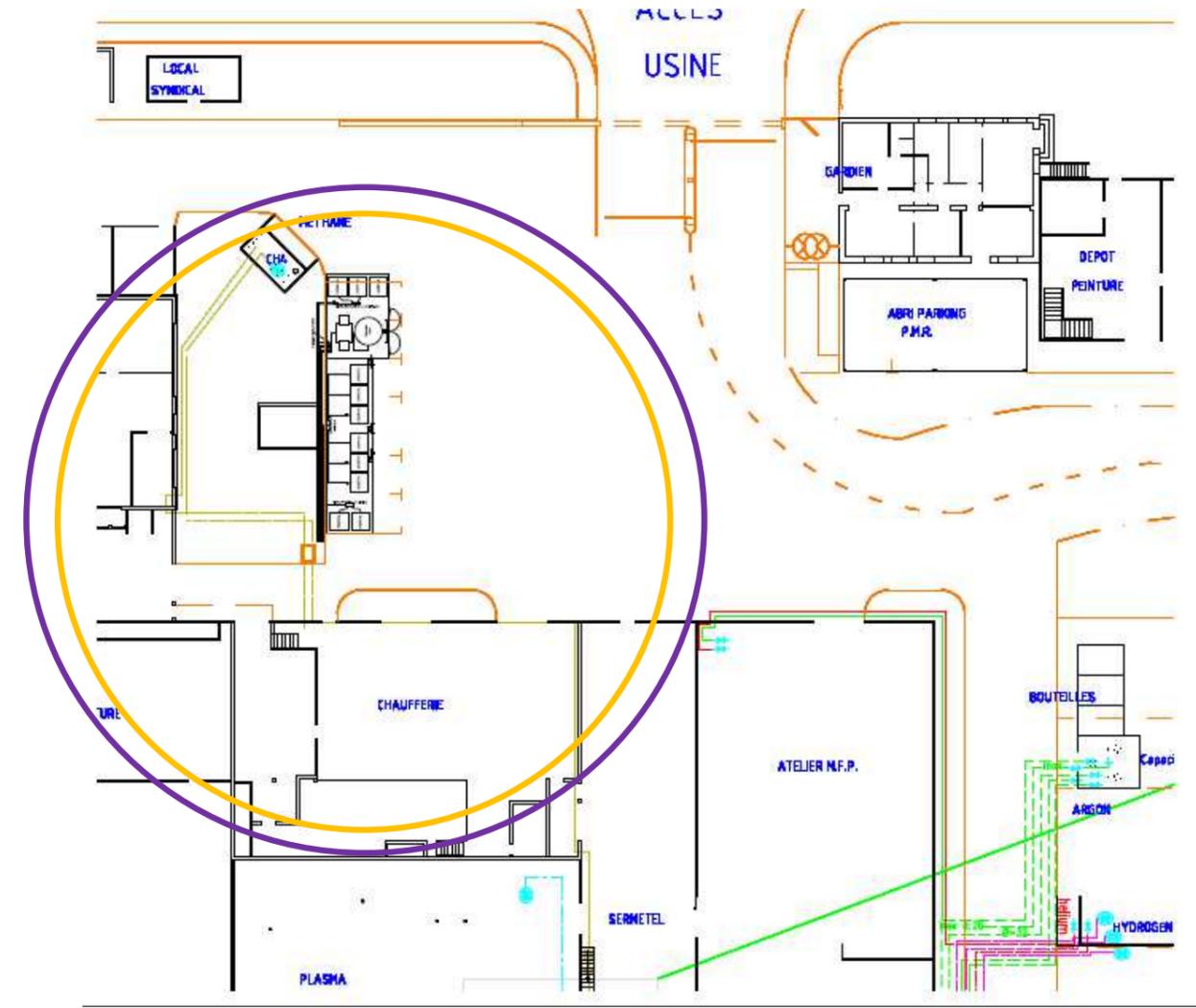


Figure 3 : Cartographie « Flash fire » centrée sur le cadre H₂ le plus proche du local Chauffage

JET ENFLAMME

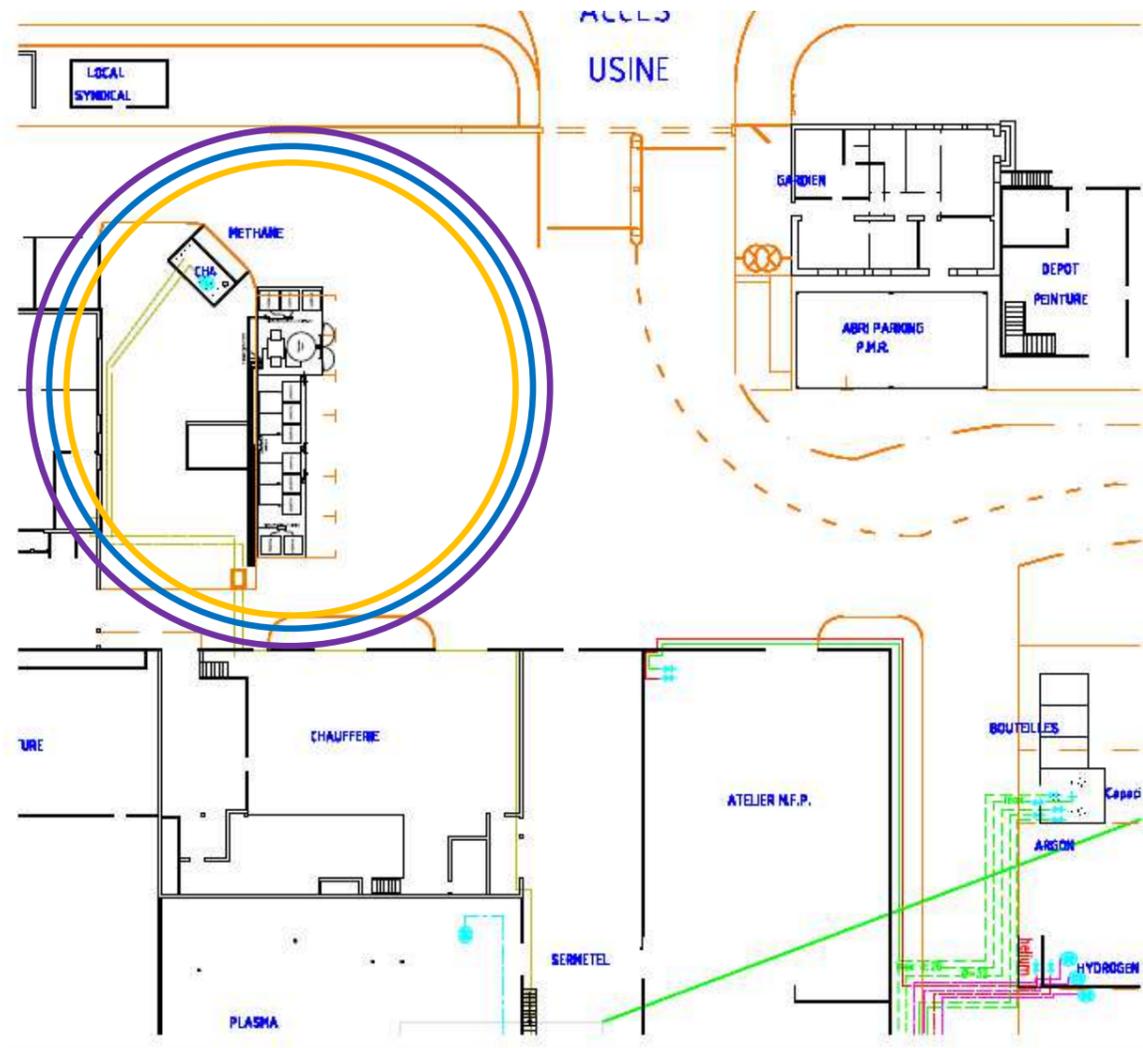


Figure 4 : Cartographie « Jet enflammé » centrée sur le cadre H₂ le plus proche de l'unité de compression gaz

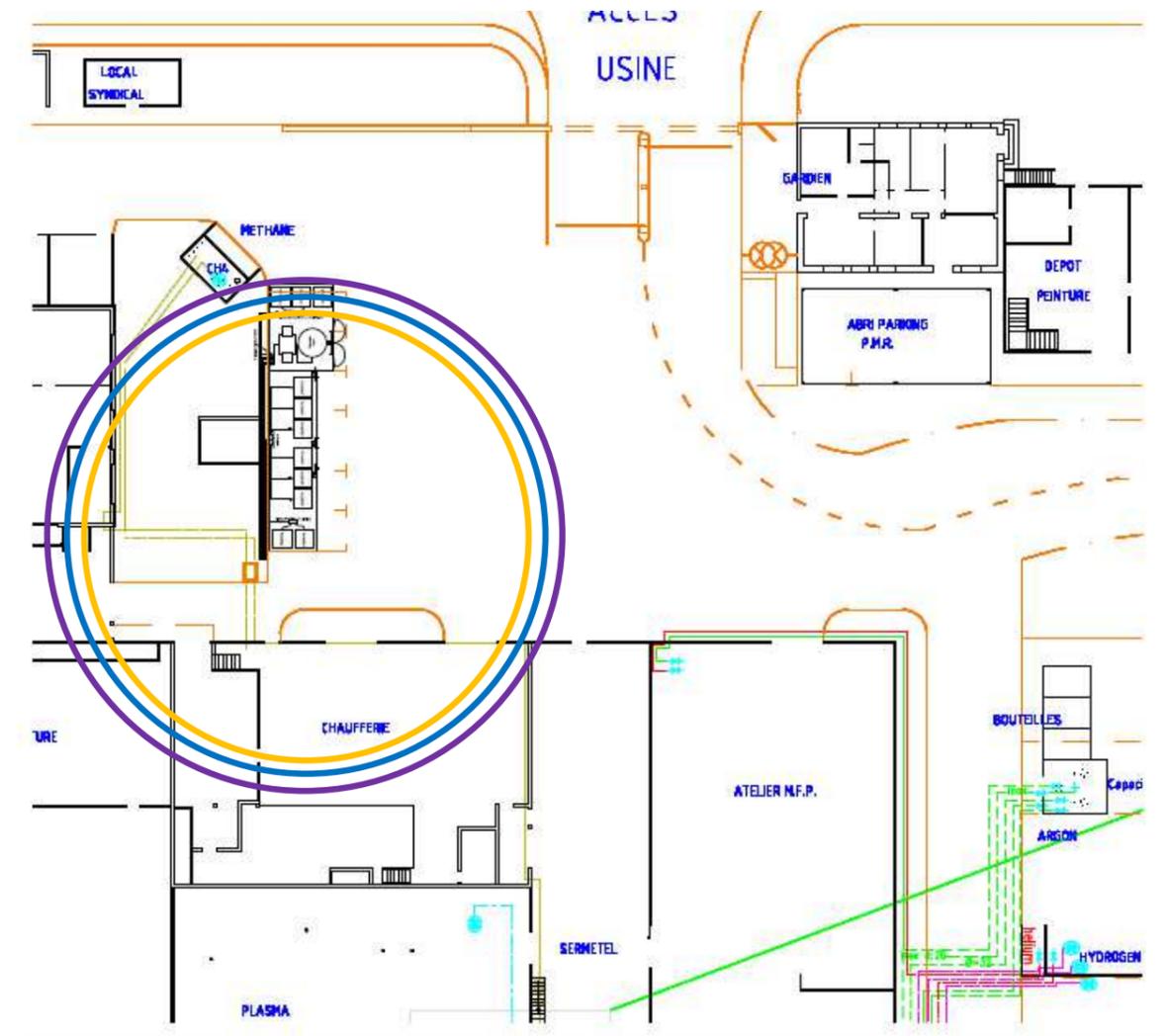


Figure 5 : Cartographie « Jet enflammé » centrée sur le cadre H₂ le plus proche du local Chaufferie

UVCE

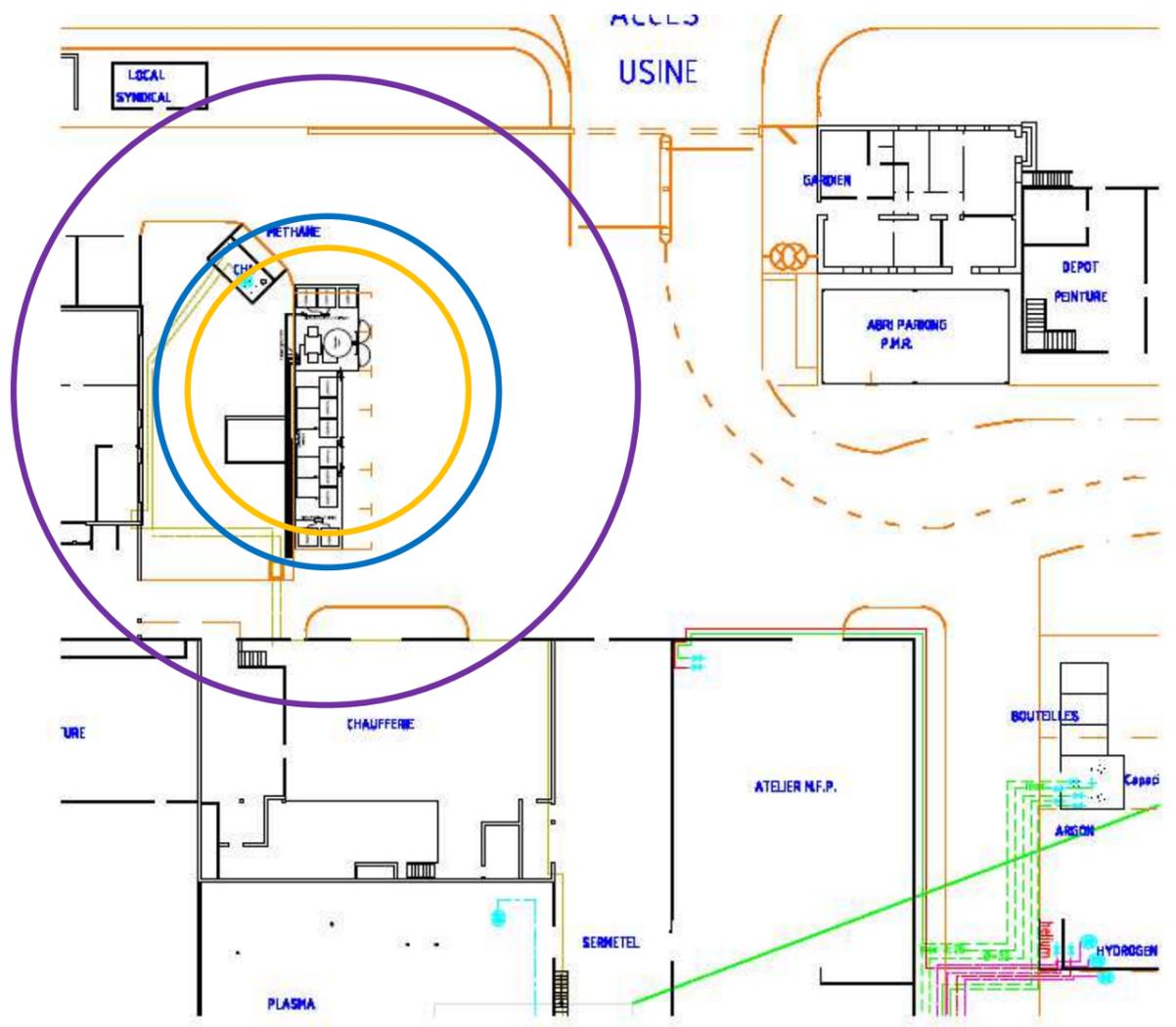


Figure 6 : Cartographie « UVCE » centrée sur le cadre H₂ le plus proche de l'unité de compression gaz

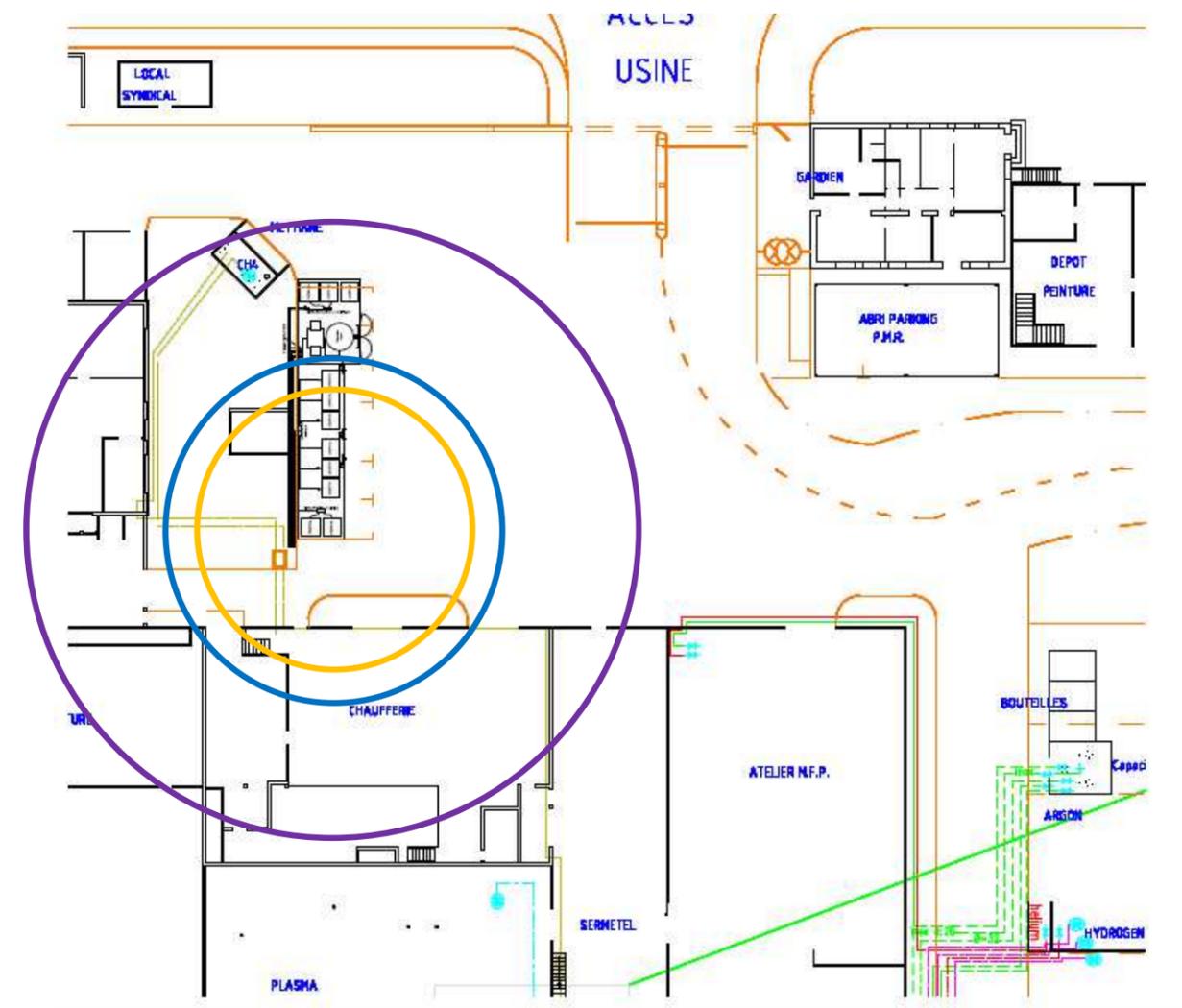


Figure 7 : Cartographie « UVCE » centrée sur le cadre H₂ le plus proche du local Chaufferie

4. ANALYSE DETAILLEE DES RISQUES

4.1. Rupture franche d'une canalisation 200 barg (centrales de détente d'hydrogène)

4.1.1 Détermination du niveau de probabilité

Etant donné qu'aucun phénomène dangereux n'entraîne d'effets à l'extérieur des limites de propriété du site en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées, la cotation en fréquence des accidents associés a été réalisée pour servir de donnée d'entrée dans le cadre de l'analyse des effets domino.

Probabilité d'occurrence de l'ERC

La longueur de canalisation 200 barg au niveau des centrales de détente d'hydrogène a été estimée à 200 m suivant une approche volontairement conservatrice.

Sur la base des données fournies au paragraphe §2.2.2.2, la fréquence de l'ERC « Rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène » a été prise égale à : $200 \text{ m} * (1. 10^{-6} \text{ m}^{-1} + 5. 10^{-6} \text{ m}^{-1}) \text{ an}^{-1} = 1,2. 10^{-3} \text{ an}^{-1}$.

Probabilité totale d'inflammation

Le débit à la brèche calculé étant de 0,4 kg/s, la probabilité totale d'inflammation a été retenue à 0,034 sur la base des données fournies au paragraphe §2.2.2.2.

Probabilité d'occurrence des PhD associés

Les probabilités d'occurrence des phénomènes dangereux (flash fire, jet enflammé, UVCE) ont donc été estimées à $4,1. 10^{-5}$ par an (classe de probabilité D).

4.1.2 Détermination du niveau de gravité

Aucun phénomène dangereux n'entraîne d'effets à l'extérieur des limites de propriété du site en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées. La gravité des accidents associés a donc été considérée comme « nulle ».

4.1.3 Placement dans la matrice de risque réglementaire

Aucun accident n'est à positionner dans la matrice de risque réglementaire étant donné qu'aucun phénomène dangereux n'entraîne d'effets à l'extérieur des limites de propriété du site en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées.

4.1.4 Analyse des effets domino générés par les installations étudiées

4.1.4.1 Effets domino INTERNES

4.1.4.1.1 Cas du jet enflammé

Les installations existantes du site susceptibles d'être potentiellement impactées par les effets domino générés par le jet enflammé consécutif à la rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées sont les suivantes :

- les stockages d'argon et d'hélium situés sur la même zone ;
- la canalisation de gaz naturel en entrée de la chaufferie ;
- le flexible en entrée de l'unité de compression gaz.

Aucun « sur-accident » n'est à redouter en cas d'un tel jet enflammé étant donné que :

- les stockages d'argon et d'hélium ne représentent pas de potentiels de dangers majeurs ;
- les effets thermiques du jet enflammé et du flash fire ainsi que les effets de surpression d'un UVCE consécutif à une rupture franche de la canalisation de gaz naturel en entrée de la chaufferie restent confinés à l'intérieur des limites de propriété du site (source : DDAE, juin 2014) ;
- la classe de probabilité de cet événement initiateur étant la classe D (« très improbable »), elle ne pourrait pas contribuer fortement à la probabilité des phénomènes dangereux - susceptibles de survenir au niveau du flexible en entrée de l'unité de compression gaz - retenue dans le DDAE de juin 2014, à savoir la classe C (« probable »).

4.1.4.1.2 Cas de l'UVCE

Les installations existantes du site susceptibles d'être potentiellement impactées par les effets domino générés par l'UVCE consécutif à la rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées sont les suivantes :

- les stockages d'argon et d'hélium situés sur la même zone de stockage ;
- la canalisation de gaz naturel en entrée de la chaufferie ;
- le flexible en entrée de l'unité de compression gaz.

Aucun « sur-accident » n'est à redouter en cas d'un tel UVCE étant donné que :

- les stockages d'argon et d'hélium ne représentent pas de potentiels de dangers majeurs ;
- les effets thermiques du jet enflammé et du flash fire ainsi que les effets de surpression d'un UVCE consécutif à une rupture franche de la canalisation de gaz naturel en entrée de la chaufferie restent confinés à l'intérieur des limites de propriété du site (source : DDAE, juin 2014) ;
- la classe de probabilité de cet événement initiateur étant la classe D (« très improbable »), elle ne pourrait pas contribuer fortement à la probabilité des phénomènes dangereux - susceptibles de survenir au niveau du flexible en entrée de l'unité de compression gaz - retenue dans le DDAE de juin 2014, à savoir la classe C (« probable »).

4.1.4.2 Effets domino EXTERNES

Aucun effet domino n'est à redouter à l'extérieur des limites de propriété du site. En effet, les zones des effets domino restent internes au site.

4.1.5 Analyse des effets domino générés sur les installations étudiées

4.1.5.1 Effets domino INTERNES

Les centrales de détente d'hydrogène étudiées sont susceptibles d'être potentiellement impactées par les effets domino générés par les accidents suivants (source : DDAE, juin 2014) :

- Jet enflammé consécutif à la rupture franche de la canalisation de gaz naturel en entrée de la chaufferie ;
- Jet enflammé consécutif à la rupture franche du flexible en entrée de l'unité de compression gaz.

Cependant, étant donné qu'aucun phénomène dangereux n'entraîne d'effets à l'extérieur des limites de propriété du site en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées, aucun sur-accident n'est donc à redouter.

4.1.5.2 Effets domino EXTERNES

En raison de l'absence d'activité dangereuse à proximité du site, aucun effet domino EXTERNE n'est à redouter au niveau des centrales de détente d'hydrogène étudiées.

5. CONCLUSIONS

La présente étude s'est intéressée au scénario majorant identifié sur les centrales de détente d'hydrogène : la rupture franche d'une canalisation 200 barg. Les phénomènes dangereux étudiés sont listés ci-après :

- le jet enflammé (effets thermiques) ;
- le flash fire (effets thermiques) ;
- l'UVCE (effets de surpression).

Les modélisations réalisées ont permis de démontrer l'absence d'accidents majeurs au niveau des centrales de détente d'hydrogène étudiées. En effet, aucun accident n'est à positionner dans la matrice de risque réglementaire étant donné qu'aucun phénomène dangereux n'entraîne d'effets à l'extérieur des limites de propriété du site en cas de rupture franche d'une canalisation 200 barg sur les centrales de détente d'hydrogène étudiées.

De plus, l'analyse des effets domino a permis de démontrer les points suivants :

- **aucun sur-accident par effet domino n'est à redouter à l'intérieur des limites de propriété du site ;**
- **aucun effet domino n'est à redouter à l'extérieur des limites de propriété du site.**