

RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRA-14-141532-12702A

19/12/2016

DRA71 – opération A2

**Guide pour la prise en compte des
chaudières industrielles dans la
rédaction d'une étude de dangers**

Rapport final

Version du 19/12/2016

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

DRA71 – opération A2
**Guide pour la prise en compte des chaudières industrielles dans la
rédaction d'une étude de dangers**

Rapport final

Verneuil-en-Halatte (60)
Direction des Risques Accidentels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Marion DEMEESTERE, Jérôme
HEBRARD, Lauris JOUBERT, Aurore SARRIQUET

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Relecture	Vérification	Approbation
NOM	Marion DEMEESTERE	Souhila KRIBI	Valérie DE DIANOUS Frédéric MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur Unité Quantification des Risques et performance des Barrières (QRIB) Direction des Risques Accidentels	Responsable du Programme d'Appui DRA71 Unité Identification et Analyse des Risques Accidentels (IARA) Direction des Risques Accidentels	Responsable Unité Quantification des Risques et performance des Barrières (QRIB) Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle Analyse et Gestion Intégrée des Risques Direction des Risques Accidentels
Visa				

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	7
1.1 Contexte.....	7
1.2 Champ d'application.....	8
1.3 Utilisation du présent guide.....	11
2. DÉCOUPAGE FONCTIONNEL DES INSTALLATIONS ET IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS	13
2.1 Description des installations et découpage fonctionnel.....	13
2.2 Potentiels de dangers liés aux substances.....	14
2.3 Potentiels de dangers liés aux équipements et au procédé.....	17
2.4 Réduction des potentiels de dangers.....	18
3. ANALYSE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE	19
3.1 Chaudières alimentées au gaz.....	20
3.2 Chaudières alimentées au fioul.....	22
4. ANALYSE DE RISQUES ET SCÉNARIOS D'ACCIDENT	25
4.1 Introduction.....	25
4.2 Evénements redoutés centraux et phénomènes dangereux retenus.....	25
4.3 Barrières de sécurité.....	27
4.4 Synthèse des scénarios d'accidents retenus.....	30
5. CARACTÉRISATION DE L'INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX	51
5.1 Synthèse des phénomènes dangereux modélisés.....	51
5.2 Principales hypothèses de modélisation.....	53
5.3 Données de base générales pour les modélisations.....	57
6. ÉLÉMENTS POUR LA CARACTÉRISATION DES PROBABILITÉS D'OCCURRENCE DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX	59
6.1 Introduction.....	59
6.2 Etape 1 : Choix d'une méthode d'estimation de la probabilité.....	60
6.3 Etape 2 : Collecte des données d'entrées nécessaires à l'estimation.....	61
6.4 Etape 3 : Agrégation des données le long du nœud papillon et affectation d'une classe de probabilité d'occurrence.....	62
6.5 Cas d'étude.....	63
7. CARACTÉRISATION DE LA CINÉTIQUE DES ÉVÈNEMENTS	67

8. EFFETS DOMINOS	69
9. RÉFÉRENCES.....	71
10. LISTE DES ANNEXES	75

GLOSSAIRE

ATEX	ATmosphère EXplosive
bara	Bar absolu
BARPI	Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
BREF	Best available techniques REFerence document
CLP	Classification Labelling Packaging
EDD	Étude De Dangers
EI	Événement Initiateur
ERC	Événement Redouté Central
FOD / FL	Fuel Oil Domestic / Fioul Lourd
ICPE	Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
IED	Directive Relative aux Émissions Industrielles
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
MMR	Mesure de Maîtrise des Risques
MTD	Meilleures Techniques Disponibles
NC	Niveau de Confiance
PhD	Phénomène Dangereux
PPRT	Plan de Prévention des Risques Technologiques
SEI	Seuil des Effets Irréversibles
SEL	Seuil des Effets Létaux
SELS	Seuil des Effets Létaux Significatifs
TE	(Chaudière à) Tubes d'Eau
TF	(Chaudière à) Tubes de Fumées
UVCE	Unconfined Vapor Cloud Explosion

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le présent rapport est développé dans le cadre du programme d'appui technique EAT-DRA71 (« Évaluation des risques des Systèmes industriels ») dont un des objectifs est l'amélioration de la maîtrise des risques et des pollutions liés aux activités industrielles. Les réflexions menées sur la proportionnalité dans les Études de Dangers (EDD) ont conduit à la volonté de rédiger des guides visant à faciliter la rédaction ou l'instruction des EDD pour des sites sur lesquels se trouvent des installations jugées suffisamment génériques.

Ce rapport s'inscrit dans ce cadre. Les installations concernées sont des chaudières à vapeur, à tubes d'eau ou tubes de fumées utilisant du combustible gazeux (gaz naturel) ou liquide (fioul domestique, fioul lourd ou biodiesel).

Ces installations sont visées par la rubrique 2910 de la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et peuvent être classées sous le régime de l'autorisation, auquel cas elles font l'objet d'une EDD. Une situation également fréquemment rencontrée consiste en la présence de ces installations sur des établissements industriels soumis à autorisation, afin d'assurer leurs besoins de chaleur (vapeur, eau chaude...). Les risques et effets dominos générés par les chaudières sont donc à étudier.

Un 1^{er} objectif du document est de fournir des éléments pour **faciliter la réalisation des EDD des chaufferies ou des sites comportant ces installations, ainsi que leur instruction**. Notamment, des informations sur l'état de l'art, les scénarios d'accidents pouvant être générés par une chaudière et les barrières de sécurité associées, les distances d'effets types des phénomènes dangereux, les probabilités types des événements, etc. sont présentés. Différents volets de l'EDD pourront ainsi s'appuyer sur des éléments développés dans le guide.

Un 2^{ème} objectif est d'améliorer la maîtrise du risque à la source. Aussi, le guide comporte des informations sur les bonnes pratiques de conception et de maîtrise de risque en intégrant les volets organisationnels et techniques. **Ces informations visent à faciliter la mise en œuvre et l'inspection de ces mesures.**

Ce document s'appuie notamment sur :

- des informations sur la conception des chaudières industrielles, communiquées par la société Stein Energy Manufacturing ;
- des informations sur l'accidentologie, communiquées par le BARPI ;
- les connaissances de l'INERIS sur ce type d'installations, issues de la réalisation d'EDD et tierces expertises ;

- une étude bibliographique afin de compléter les sources d'informations précédemment citées.

Note :

- Ce guide vise à présenter des informations aussi complètes et représentatives de la réalité du terrain que possible. Il a vocation à « rester vivant », c'est-à-dire à pouvoir être réactualisé sur la base des retours des différents lecteurs.
- Les textes réglementaires encadrant l'exploitation des installations de combustion ont été revus pour intégrer les Meilleures Techniques Disponibles (MTD) formulées pour les grandes installations de combustion¹. Le recours aux MTD est un des principes directeurs de la directive relative aux émissions industrielles (Directive IED) afin de prévenir les pollutions de toutes natures (aspects chroniques). Une EDD visant à prévenir les risques accidentels générés par une ICPE, les MTD relatives aux installations de combustion ne seront pas étudiées plus en détail dans ce guide.

1.2 CHAMP D'APPLICATION

1.2.1 Catégories de chaudières

Ce guide couvre toute chaudière à vapeur, à tubes d'eau ou tubes de fumées fonctionnant au gaz naturel, au fioul (lourd ou domestique) ou au biodiesel. Sont notamment exclues du champ de l'étude les installations suivantes :

- chaudières individuelles d'appartement ou de pavillon ainsi que les mini-chaufferies, c'est-à-dire celles dont la puissance calorifique totale est inférieure ou égale à 85 kW ;
- utilisations décentralisées hors chaufferie ;
- fours industriels destinés au réchauffage direct de produits ;
- chaudières de récupération utilisées dans les installations de cogénération.

1.2.2 Gamme de puissance

La gamme de puissance thermique nominale² couverte par le guide s'étend de plusieurs centaines de kilowatts à 50 MW_{th}. Il a en effet été choisi pour des raisons pratiques de restreindre la gamme de puissance pour l'estimation des distances

¹ Les grandes installations de combustion, dont la puissance thermique nominale est supérieure ou égale à 50 MW, relèvent de la rubrique 3110 de la nomenclature des ICPE. À ce titre, elles font l'objet d'un BREF (Document de Référence sur les MTD pour les Grandes Installations de Combustion – Juillet 2006) disponible sur le site <http://www.ineris.fr/ipcc/node/10>.

² La puissance thermique nominale correspond à la puissance thermique fixée et garantie par le constructeur exprimée en pouvoir calorifique inférieur et susceptible d'être consommée en marche continue.

d'effets « types ». Le champ des modélisations des scénarios d'accidents exclut donc les grandes installations de combustion, pour lesquelles la puissance thermique nominale est supérieure à 50 MW_{th}. Les scénarios d'accidents présentés dans le guide sont néanmoins applicables sur une gamme de puissance plus large, allant jusqu'à plusieurs centaines de mégawatts.

Les seuils de puissance au-delà desquels les installations de combustion sont considérées comme ICPE (rubrique 2910-A de la nomenclature) sont les suivants :

- Déclaration avec contrôle périodique : $2 \text{ MW} \leq P < 20 \text{ MW}$;
- Autorisation : $P \geq 20 \text{ MW}$.

Ces seuils sont valables lorsque l'installation consomme exclusivement, seuls ou en mélange, du gaz naturel, des gaz de pétrole liquéfiés, du fioul domestique, du charbon, des fiouls lourds et de la biomasse³. D'autres seuils s'appliquent dans le cas où d'autres combustibles sont utilisés (voir 2910-B et 2910-C).

Les arrêtés de la rubrique 2910-A de la nomenclature des ICPE sont les suivants :

- **L'arrêté du 26 août 2013** modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion) ;
- **L'arrêté du 26 août 2013** relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931.

Note :

Il est précisé que bien que les chaudières soumises à déclaration ne fassent pas l'objet d'une EDD spécifique, elles sont couvertes par ce guide car il se peut qu'elles soient installées sur un site soumis à autorisation. Or, la circulaire du 4 mai 2007 relative au porter à connaissance sur les risques technologiques précise que pour les sites soumis à simple autorisation, les phénomènes dangereux issus des installations soumises à déclaration sont à prendre en considération en tant que potentiel événement initiateur d'un phénomène dangereux pouvant avoir lieu sur une installation soumise à autorisation.

Par ailleurs, au titre de ladite circulaire, il est également précisé que le porter à connaissance prévu pour les installations soumises à autorisation doit contenir l'ensemble des phénomènes dangereux susceptibles d'être générés par ces installations, ainsi que les seules installations et équipements soumis à déclaration qui, par leur proximité et leur connexité avec les installations soumises à autorisation, sont de nature à modifier les dangers pour les intérêts visés à l'article L 511-1 du code de l'environnement.

³ Les produits visés par le terme « biomasse » sont explicitement cités dans la rubrique 2910.

Ainsi, une EDD doit également porter sur les installations soumises à déclaration dès lors que, par effets dominos, ces dernières peuvent être à l'origine d'un potentiel phénomène dangereux sur une installation soumise à autorisation ou lorsqu'elles sont susceptibles d'augmenter l'intensité d'un phénomène dangereux de l'installation soumise à autorisation.

De plus, dans le cas où la chaudière et ses installations annexes sont installées au sein d'un établissement Seveso (seuil bas ou seuil haut), elles sont à étudier dans le cadre de l'EDD, qu'elles soient ou non considérées comme ICPE et qu'elles soient ou non cibles ou sources de potentiels effets dominos.

1.2.3 Combustible utilisé

Ce guide traite de chaudières fonctionnant au gaz naturel, au fioul (lourd ou domestique) ou au biodiesel et pouvant démarrer au propane. Les installations liées au combustible liquide et gazeux sont également étudiées dans ce guide, à savoir : la citerne de dépotage de combustible liquide, les bacs de stockage de combustible liquide, les tuyauteries de combustible (liquide et gazeux) et le stockage de propane.

Dans le cas où un autre combustible est utilisé (biomasse, charbon, gaz de pétrole liquéfié) ou dans le cas où la chaudière est poly-combustible (utilisée avec plusieurs combustibles différents), les risques induits par ces autres modes de fonctionnement doivent être étudiés par ailleurs dans le cadre de l'EDD.

1.2.4 Traitement de l'eau alimentaire

Les installations de traitement de l'eau alimentaire de la chaudière ne sont pas étudiées dans le présent guide (ex : traitement externe : décantation, filtration, adoucissement, dégazage thermique, etc. et traitement interne ou conditionnement chimique : protection contre l'entartrage, la corrosion et le primage⁴). Une description succincte du principe des traitements externe et interne des eaux de chaudière est présentée en Annexe 1. Les risques induits par ces dispositifs de traitement sont à étudier par ailleurs dans le cadre de l'EDD.

1.2.5 Traitement des fumées de combustion

Les installations de traitement des fumées de combustion ne sont pas couvertes par le présent guide (ex : traitement des oxydes d'azote -NOx-, traitement des oxydes de soufre, dépoussiérage, etc.). Dans le cas où du fioul lourd est utilisé comme combustible, un traitement à base d'urée sous forme liquide peut être mis en place. Le gaz naturel ne comporte pas d'azote, mais des NOx peuvent être formés dans la chambre de combustion par réaction entre l'azote et l'oxygène de l'air comburant. Cette réaction est d'autant plus efficace que la température de combustion est élevée. D'où le principe des brûleurs bas-NOx qui réduisent la formation de NOx en

⁴ Le phénomène de primage consiste en l'entraînement de gouttelettes d'eau contenant sels minéraux dissous et matières en suspension par la vapeur qui lui donne un caractère érodant pour les parois rencontrées.

retardant le mélange air/combustible et en réduisant la température de flamme et la teneur en oxygène.

Un dispositif de traitement de fumées est généralement mis en place lorsque le combustible consiste en de la biomasse ou des ordures ménagères (combustibles non étudiés dans le guide). Un traitement de fumées peut également s'avérer nécessaire lorsque les puissances nominales dépassent un certain seuil. Une présentation succincte des dispositifs de traitement des fumées se trouve en Annexe 1. Les risques induits par ces dispositifs sont à étudier par ailleurs dans le cadre de l'EDD (ex : explosion de poussières ou incendie dans le filtre à manches).

1.2.6 Circuit de vapeur

Les pertes de confinement de vapeur du circuit de vapeur haute pression en aval de la chaudière sont à prendre en compte lors de l'identification des événements initiateurs à l'origine d'une perte de confinement sur les tuyauteries de combustible présentes à proximité ou sur toute autre installation contenant des substances dangereuses.

1.3 UTILISATION DU PRÉSENT GUIDE

Ce guide présente des éléments facilitant la rédaction d'une EDD soit des installations de chaufferie elles-mêmes, soit d'un site industriel sur lequel se trouvent des installations de chaufferie dont il faut étudier les potentiels effets dominos. Ces éléments sont les suivants :

- Découpage fonctionnel des installations de chaufferie et identification des potentiels de dangers (Chapitre 2) ;
- Analyse du retour d'expérience (Chapitre 3) ;
- Description des scénarios d'accidents classiquement rencontrés sur les installations de chaufferie et barrières de sécurité associées (Chapitre 4) ;
- Caractérisation de l'intensité des phénomènes dangereux identifiés (Chapitre 5) ;
- Caractérisation de la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux modélisés (Chapitre 6) ;
- Caractérisation de la cinétique des phénomènes dangereux (Chapitre 7) ;
- Étude des effets dominos potentiels (Chapitre 8).

De plus, il présente les annexes informatives suivantes :

- Annexe 1 : Description des chaufferies industrielles ;
- Annexe 2 : Accidentologie des installations de chaufferie : exemples d'accidents caractéristiques ;
- Annexe 3 : Extrait de la norme NF EN 32-020-1 : Mode d'exploitation des chaufferies : Prescriptions générales de sécurité ;

- Annexe 4 : Éléments pour l'évaluation de la performance des barrières de sécurité ;
- Annexe 5 : Caractérisation de l'intensité ;
- Annexe 6 : Éléments de probabilité.

Le schéma ci-dessous situe ces éléments dans le cadre de la réalisation d'une EDD complète (voir Oméga 9 de l'INERIS). Ce logigramme est construit sur la base du contenu des EDD proposé dans la circulaire du 10 mai 2010.

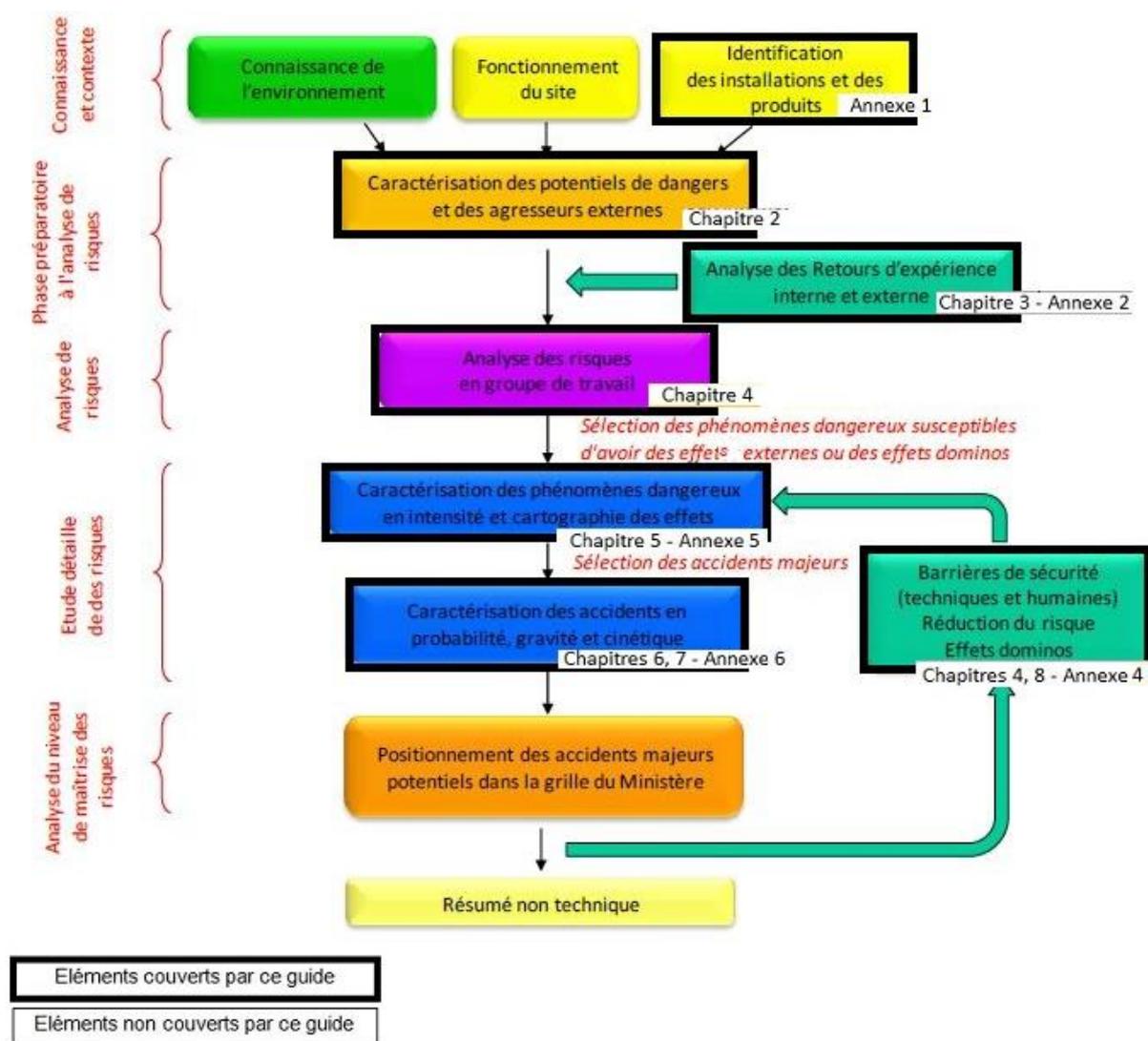


Figure 1 : Logigramme représentant le champ d'utilisation du présent guide

2. DÉCOUPAGE FONCTIONNEL DES INSTALLATIONS ET IDENTIFICATION DES POTENTIELS DE DANGERS

Ce chapitre a pour objectif de caractériser l'installation envisagée afin de permettre d'identifier les principaux potentiels de danger qu'elle représente, au regard notamment de la sensibilité de l'environnement.

2.1 DESCRIPTION DES INSTALLATIONS ET DÉCOUPAGE FONCTIONNEL

Un exemple de principe général d'une unité de production de vapeur est donné dans le schéma ci-dessous (cas d'une chaudière à tubes d'eau alimentée en fioul lourd déposé par barge).

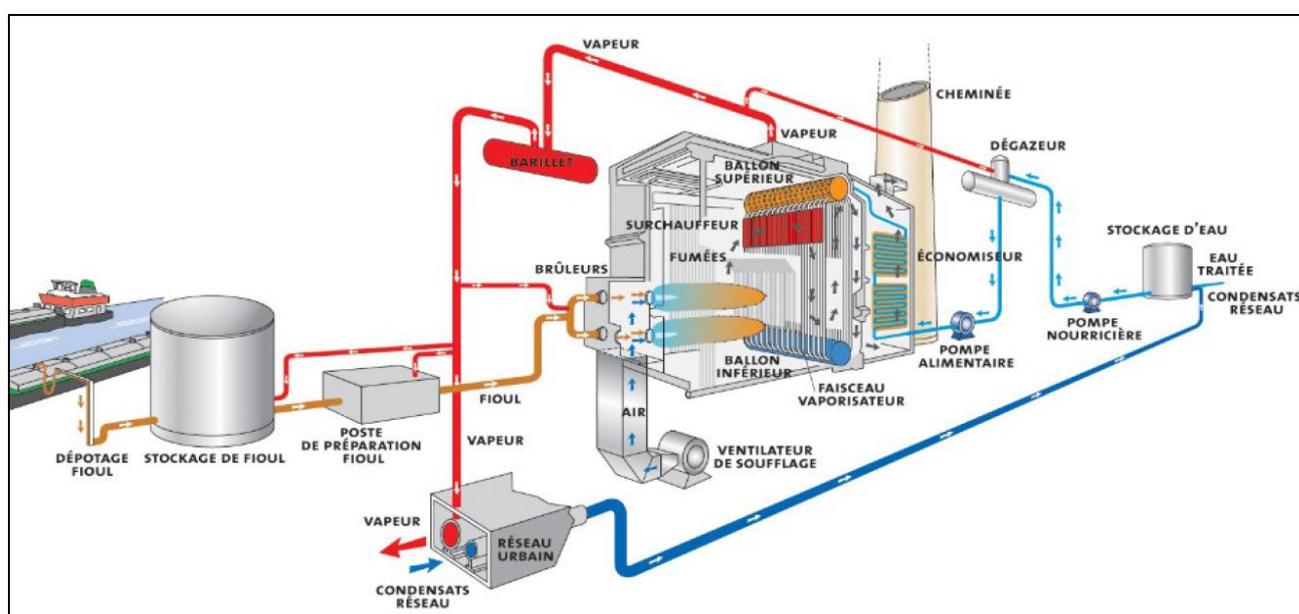


Figure 2: Exemple de principe général d'une unité de production de vapeur

Le combustible liquide peut aussi être déposé par camion ou wagon citernes. De plus, comme indiqué précédemment, des combustibles autres que le fioul lourd peuvent être utilisés. Dans le cas du fioul domestique ou du biodiesel, le poste de préparation de fioul, destiné à réchauffer le fioul lourd avant envoi dans la chambre de combustion, n'est pas présent. Dans le cas du gaz naturel, les installations liées au dépotage, au stockage et à la préparation du combustible n'existent pas mais on retrouve un ou plusieurs postes de détente de gaz en amont de la chambre de combustion.

Dans certains cas, du propane peut être utilisé lors des phases de (re)démarrage des chaudières. Il s'agit alors du combustible d'alimentation des allumeurs des brûleurs. En général, le propane est stocké sous forme liquéfiée sous pression dans des bouteilles entreposées dans un local dédié. Ce mode de démarrage n'est cependant pas systématique et dans le cas de chaudières fonctionnant au gaz naturel, il est possible d'utiliser le gaz combustible pour initier le démarrage de la chaudière.

Les installations concernées par le présent guide sont les suivantes :

- Les installations liées au combustible liquide (fioul lourd / fioul domestique / biodiesel) :
 - Aire de dépotage (camion ou wagon citerne, barge) ;
 - Bacs de stockage ;
 - Poste de préparation du fioul (dans le cas du fioul lourd) ;
 - Pompes et tuyauteries.
- Les installations liées au combustible gazeux (gaz naturel) :
 - Postes de détente primaire / secondaire ;
 - Tuyauteries.
- Les installations liées à l'utilisation de propane :
 - Bouteilles dans un local de stockage ;
 - Tuyauteries.
- Les chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées :
 - Brûleur et chambre de combustion ;
 - Ballon d'eau.
- Le local chaufferie.

Note :

Pour rappel, sont exclues du champ d'application de ce guide :

- Les installations de traitement de l'eau alimentaire ;
- Les installations de traitement des fumées ;
- Le circuit de vapeur d'eau.

2.2 POTENTIELS DE DANGERS LIÉS AUX SUBSTANCES

2.2.1 Risques liés au gaz naturel

Le gaz naturel est une énergie fossile contribuant à la production de 21,3% de l'énergie primaire en 2012⁵. Il est issu de la transformation naturelle, pendant des millions d'années, de matières organiques enfouies dans le sous-sol.

Il est composé à 95% de méthane (CH₄), à moins de 4% d'éthane et d'azote, ainsi qu'à 1% de dioxyde de carbone et de propane.

Le gaz naturel est plus léger que l'air. C'est un gaz stable qui n'est ni corrosif ni toxique. Le Règlement CLP classe notamment le méthane comme gaz extrêmement inflammable.

⁵ Données du Key World Energy Statistics 2014 de l'Agence Internationale de l'Énergie

En cas de perte de confinement de gaz naturel, les phénomènes dangereux redoutés sont le feu torche, le VCE (Vapour Cloud Explosion, c'est-à-dire l'explosion de la chaufferie) et l'UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion).

2.2.2 Risques liés au propane

Le propane (C₃H₈) peut être utilisé lors des phases de démarrage des chaudières. Il s'agit d'un gaz de pétrole liquéfié (GPL) classé extrêmement inflammable dans le Règlement CLP. À la différence du gaz naturel, le propane est un gaz plus lourd que l'air.

En cas de perte de confinement de propane, les phénomènes dangereux redoutés sont le feu torche, le VCE, l'UVCE et le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) d'une bouteille de propane.

2.2.3 Risques liés au fioul

Le fioul oil domestique (FOD) possède des caractéristiques assez proches de celles du gazole. Il est principalement utilisé comme combustible pour le chauffage. Le FOD est notamment classé liquide inflammable de catégorie 3 (point éclair⁶ -PE- compris entre 55 et 60°C) et toxique chronique catégorie 2 pour les organismes aquatiques selon le Règlement CLP.

Une perte de confinement de FOD peut conduire à un feu de nappe qui, s'il enveloppe le bac de stockage, peut mener à une pressurisation lente de bac. De plus, la présence d'une ATEX (atmosphère explosive) dans le ciel gazeux du bac peut conduire à une explosion du ciel gazeux du bac, à la suite de laquelle un feu de bac et un boil-over en couche mince peuvent se produire.

Le fioul lourd (FL) est un combustible principalement utilisé dans l'industrie (verreries, papeteries, etc.) et les centrales thermiques pour la production d'électricité et de chauffage. En France, depuis le 1^{er} janvier 2003, seuls les fiouls lourds à très basse teneur en soufre (inférieure ou égale à 1%) sont autorisés à l'utilisation en l'état. Le FL n'est pas un liquide inflammable au sens du Règlement CLP (point éclair supérieur à 60°C). Il est en revanche notamment classé toxique aigu et chronique catégorie 1 pour les organismes aquatiques.

De la même manière que dans le cas du FOD, une pressurisation lente de bac est envisageable. De plus, lorsque le FL est utilisé comme combustible dans les chaudières, il est chauffé dans le bac aux alentours de 50°C pour faciliter son pompage et son acheminement vers la chaudière. Un défaut de régulation du chauffage du fioul pourrait entraîner une surchauffe de ce dernier au-delà de son point éclair et une explosion du ciel gazeux du bac, à la suite de laquelle un feu de bac et un boil-over classique peuvent se produire.

⁶ Le point éclair (PE) d'un liquide est la température minimale pour laquelle la concentration des vapeurs émises est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme ou d'un point chaud dans les conditions normalisées, mais insuffisante pour produire la propagation de la combustion en l'absence de la flamme "pilote" (<http://www.pointclair.com/spip.php?article1>)

Notes :

Étant donnée la faible volatilité du fioul (FOD ou FL), une perte de confinement de fioul ne conduira pas à l'occurrence d'un UVCE. Par ailleurs, les vapeurs de FL chauffé se refroidiront rapidement.

De plus, un rejet massif d'un mélange gazeux en surpression par l'évent de la citerne de dépotage ou du bac ne conduira pas à un phénomène dangereux à l'origine d'un accident ayant des effets en dehors des limites du site (UVCE non retenu de par le refroidissement rapide des vapeurs et feu torche exclu de par les conditions de rejet).

Plus de précisions sur les risques liés au fioul (FOD ou FL) sont apportées dans les Fiches de Données Sécurité (FDS) auxquelles l'exploitant est invité à se reporter.

2.2.4 Risques liés au biodiesel

Le biodiesel est une substance synthétisée par transestérification d'huiles naturelles avec du méthanol pour produire des esters méthyliques et de la glycérine (les matières premières utilisées sont l'huile de soja, l'huile de tournesol, l'huile de palme et tous les dérivés analogues). Il ne s'agit pas d'une substance dangereuse au sens du règlement CLP. Son point éclair est bien au-delà de 60°C (> 130°C) et il ne présente pas de danger de toxicité aiguë ou chronique pour l'homme ou l'environnement.

Bien que l'inflammation du biodiesel soit peu probable, elle reste possible dans le cas d'un éventuel impact par des effets dominos thermiques. Ainsi, les phénomènes de feu de nappe / cuvette et feu de bac ne sont pas à exclure. La possibilité d'occurrence d'un boil-over est à déterminer selon les caractéristiques du produit utilisé.

2.2.5 Synthèse des propriétés physico-chimiques

Le tableau ci-dessous récapitule les principales propriétés physico-chimiques des substances mises en jeu dans l'exploitation d'une chaudière.

Tableau 1: Synthèse des propriétés physico-chimiques des substances mises en jeu dans l'exploitation d'une chaudière

	Gaz naturel	Propane pur	FOD	FL	Biodiesel
État physique	gaz	gaz liquéfié	liquide	liquide	liquide
Température ébullition (°C)	- 162	- 43	/	/	/
Densité/air	0,56	1,6	/	/	/
Point d'éclair (°C)	-	< - 50	> 55	> 70	> 130
LIE (%v/v)	5	2,4	~ 0,5	~ 0,5	~ 0,3
LSE (%v/v)	15	9,3	~ 5	~ 5	~ 10
TAI (°C)	595	470	> 250	> 250	177
EMI (mJ)	0,3	0,24	/	/	/

	Gaz naturel	Propane pur	FOD	FL	Biodiesel
Masse molaire ou volumique	16 g/mol	44 g/mol	830 à 880 kg/m ³	920 à 1060 kg/m ³	800 à 900 kg/m ³

Les valeurs du propane sont les valeurs du gaz pur. Le propane commercial généralement utilisé est composé de 90% de propane et de propène, les 10% restant étant des gaz plus volatils (éthane, éthylène), ou moins volatils (butane et butène).

2.3 POTENTIELS DE DANGERS LIÉS AUX ÉQUIPEMENTS ET AU PROCÉDÉ

L'identification des dangers liés aux équipements et au procédé tient compte :

- des différentes catégories de dangers présentés par les substances présentes ;
- des différents équipements et de leurs dangers associés (présence de flamme, eau sous pression, etc.) ;
- des conditions opératoires d'utilisation et de mise en œuvre ;
- des conditions de fonctionnement.

Le tableau suivant présente une identification des dangers liés aux procédés obtenue sur la base d'un travail préalable aux analyses de risques.

Tableau 2: Dangers liés aux équipements et aux procédés

Équipements	Substances	Conditions opératoires	Phénomènes dangereux redoutés
Citernes (camion, wagon), barges et bacs	FOD, FL, biodiesel	Dépotage	Pollution, feu de nappe, pressurisation lente de la citerne, explosion du ciel gazeux de la citerne
		Stockage	Pollution, feu de cuvette, pressurisation lente de bac, explosion du ciel gazeux du bac, feu de bac, boil-over
Pompes et tuyauteries	FOD, FL, biodiesel	Transfert, fonctionnement de la chaudière	Pollution, feu de nappe
Tuyauteries et postes de détente	Gaz naturel	Transfert, fonctionnement de la chaudière	VCE (explosion de la chaufferie), UVCE, feu torche
Bouteilles	Propane	Démarrage de la chaudière	VCE, UVCE, feu torche, BLEVE de bouteille
Chambre de combustion	Combustible (liquide, gazeux)	Démarrage de la chaudière, fonctionnement de la chaudière	VCE (explosion de la chambre de combustion)
Capacités (ex : ballon d'eau, calandre, surchauffeur)	Eau, vapeur d'eau	Démarrage de la chaudière, fonctionnement de la chaudière	BLEVE de capacité d'eau, éclatement de capacité

2.4 RÉDUCTION DES POTENTIELS DE DANGERS

Les stratégies de réduction des potentiels de dangers dépendent du contexte dans lequel s'inscrit le site étudié (installations existantes ou nouvelles, environnement avec plus ou moins d'enjeux, etc.). Les stratégies citées dans ce paragraphe n'ont pas vocation à être exhaustives, elles sont à considérer comme des exemples.

Dans le cas des chaufferies industrielles, réduire le risque à la source peut par exemple passer par la réduction des diamètres et des longueurs des tuyauteries ainsi que de la pression du combustible qui y circule (débit de pompe dans le cas d'un liquide). La réduction du diamètre et de la pression permet en effet de réduire le débit en cas de fuite (débit proportionnel au carré du diamètre et à la racine carrée de la pression relative) et réduit donc les distances d'effets.

La diminution du volume des capacités peut également représenter une solution de réduction du risque à la source. Il peut s'agir des volumes des bacs de stockage de combustible liquide mais aussi des volumes de la chambre de combustion, du ballon d'eau ou de la calandre de la chaudière.

Dans ces différents cas, la diminution de la taille des équipements restera limitée par des contraintes techniques, de rendement et de performances à atteindre par l'installation.

Il peut également être noté que le risque d'explosion de la chaufferie peut être minimisé par la mise en place d'une ventilation naturelle ou mécanique de sorte à éviter la formation d'une ATEX dans le local. Dans le cas où une ATEX se forme et explose dans le local, les distances d'effets de surpression peuvent être réduites grâce à la présence de surfaces éventables sur les parois du local chaufferie. De plus, les effets thermiques liés à un incendie dans la chaufferie peuvent être limités par la présence de murs coupe-feu dans le local.

3. ANALYSE DU RETOUR D'EXPÉRIENCE

Ce chapitre présente une synthèse de l'accidentologie liée aux chaudières industrielles en France, qui alimente notamment l'analyse des risques.

L'étude de l'accidentologie est basée en partie sur une analyse du BARPI concernant 121 événements survenus entre juin 1972 et février 2007 sur des chaudières alimentées au gaz naturel ou dont le retour d'expérience est transposable aux installations fonctionnant au gaz. 37 accidents étrangers du même type, survenus entre février 1973 et juillet 2007, ont aussi été pris en compte dans l'étude du BARPI⁷.

L'INERIS a procédé à un complément de cette analyse pour la période de février 2007 à juin 2014 (identification de 17 événements supplémentaires en France).

Une étude concernant les chaufferies alimentées au fioul a également été réalisée sur la période juin 1974 à juin 2014. 87 événements ont été recensés en France pour cette période.

Les données collectées dans la base du BARPI ne donnent aucune information sur des accidents liés à l'utilisation de biodiesel dans des chaufferies (tous les accidents recensés dans base ARIA et mettant en jeu du biodiesel concernent la fabrication de biodiesel (usines) ou le transport de biodiesel).

Le détail de la répartition des phénomènes dangereux par équipement est donné dans l'Annexe 2 de ce guide. La répartition par type de phénomènes dangereux et une synthèse de l'accidentologie sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Remarques :

- Le complément d'analyse pour les chaudières à gaz entre 2007 et 2014 suit une logique différente de l'analyse réalisée par le BARPI entre 1974 et 2007. Dans l'analyse du BARPI, le fait qu'un accident puisse donner lieu à plusieurs phénomènes dangereux est pris en compte, alors que dans le complément, ceci n'est pas pris en compte i.e. il est considéré qu'un accident donne lieu à un phénomène dangereux. Cela est en partie dû à la précision limitée des descriptifs d'accidents reportés dans la base ARIA.
- Les accidents ayant eu lieu à l'étranger ont également été étudiés mais ceux-ci n'apportent pas de scénarios complémentaires par rapport à l'étude française. Ils ne sont pas présentés dans le guide mais les plus remarquables sont détaillés en Annexe 2.

⁷ L'étude est disponible sur internet à l'adresse suivante : http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/1373988006chaufferies_web_sept08.pdf

3.1 CHAUDIÈRES ALIMENTÉES AU GAZ

La répartition des phénomènes dangereux générés par des chaudières à gaz est illustrée dans le diagramme ci-dessous.

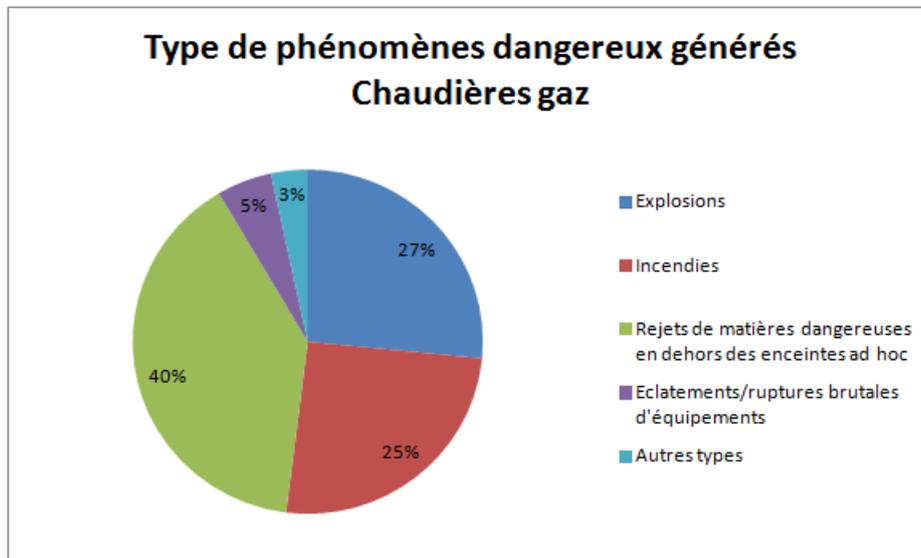


Figure 3: Répartition des phénomènes parmi les cas impliquant des chaudières gaz

Les phénomènes dangereux les plus représentatifs des chaudières à gaz sont l'explosion et l'incendie, qui concernent respectivement 27 et 25% des accidents étudiés.

Le rejet de matières dangereuses s'applique à 40% de ces accidents. Il peut être soit le phénomène initial, soit une conséquence de celui-ci. Le rejet de gaz est inclus dans cette catégorie.

L'éclatement et la rupture d'équipements sous pression peut également survenir, voire provoquer des atteintes aux installations alentours.

Les scénarios accidentels impliquant les chaudières à gaz peuvent être catégorisés de la manière suivante :

- Fuites de gaz en amont de la chaudière pouvant conduire à un incendie ou une explosion du local chaufferie ;
- Explosion dans la chambre de combustion de la chaudière ;
- Accidents impliquant le circuit de vapeur ;
- Autres.

Les fuites de gaz sur le circuit d'alimentation de la chaudière peuvent être la conséquence d'événements accidentels tels que la rupture d'une tuyauterie ou une brèche par collision avec un chariot de manutention, par exemple.

Elles peuvent faire suite à la défaillance d'équipements annexes à la tuyauterie, tels que les raccords, joints ou vannes.

Autrement que par des défaillances mécaniques, le rejet du gaz à l'extérieur peut être provoqué par la mauvaise manipulation des organes de sectionnement, le plus souvent dans le cadre d'opérations de réparation ou de maintenance.

Les événements consécutifs aux fuites en amont de la chaudière ont les conséquences potentielles les plus graves.

L'apparition des conditions propices à des explosions en chambre de combustion est rare en phase normale d'exploitation. Celle-ci survient généralement durant les phases de mise en service ou de redémarrage de l'équipement, et peut être provoquée par :

- Le défaut de fermeture de l'alimentation en combustible, suite à la défaillance d'éléments mécaniques (électrovannes, clapets de détenteur, canalisation, etc.) pouvant mener à un décrochage de flamme ;
- Une pression trop faible du gaz aux injecteurs pouvant mener à un décrochage de flamme ;
- Un défaut de balayage avant rallumage ;
- Une erreur de représentation d'un opérateur conduisant à une prise de décision inadéquate, du fait de l'indisponibilité de l'information permettant d'établir l'existence possible ou avérée d'une atmosphère explosible à l'intérieur de la chambre de combustion (dysfonctionnement des équipements de surveillance et de mesure par exemple).

Les fortes pressions engendrées par ces événements et le caractère confiné de la chambre de combustion peuvent également conduire à des effets de surpression importants combinés à des effets missiles avec des distances pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres.

Le fluide caloporteur (eau) a été impliqué dans plusieurs cas d'explosion, d'incendie ou de ruine à l'intérieur de chaudières. Le mécanisme en jeu est généralement la vaporisation brutale du fluide surchauffé suite à une perte de confinement accidentelle pouvant être causées par :

- La présence d'eau dans le corps de chauffe ;
- Le manque d'eau dans le corps de la chaudière (tubes de fumées) associé à une défaillance des éléments de contrôle de niveau ;
- La pollution (par exemple la contamination des fluides par les hydrocarbures lors de leur utilisation) ou la dégradation du fluide après de nombreux cycles, qui en modifient les propriétés physiques et peuvent conduire à des effets indirects.

De plus, les fuites de fluide caloporteur ou des produits d'entretien de son circuit de circulation en dehors de la chaudière peuvent avoir des conséquences en termes de pollution du milieu. Enfin, les tuyauteries chaudes constituent des sources d'ignition pour les produits inflammables mis en contact.

Bien que minoritaires, d'autres scénarios d'accidents ont été observés sur des chaudières à gaz :

- Émission de fumées riches en monoxyde de carbone générée par une mauvaise combustion dans la chaudière qui peut être accentuée par le mauvais tirage d'une cheminée ;
- Explosion de la chaudière suite à l'accumulation de gaz dans la chambre de combustion du fait du mauvais tirage d'une cheminée ;
- Inflammation d'une gaine calorifugée par des fuites de fumées chaudes.

En outre, les chaudières sont parfois la source d'ignition de nuages inflammables provenant d'un dysfonctionnement externe.

3.2 CHAUDIÈRES ALIMENTÉES AU FIOUL

La répartition des phénomènes dangereux générés par des chaudières fioul est illustrée dans le diagramme ci-dessous.

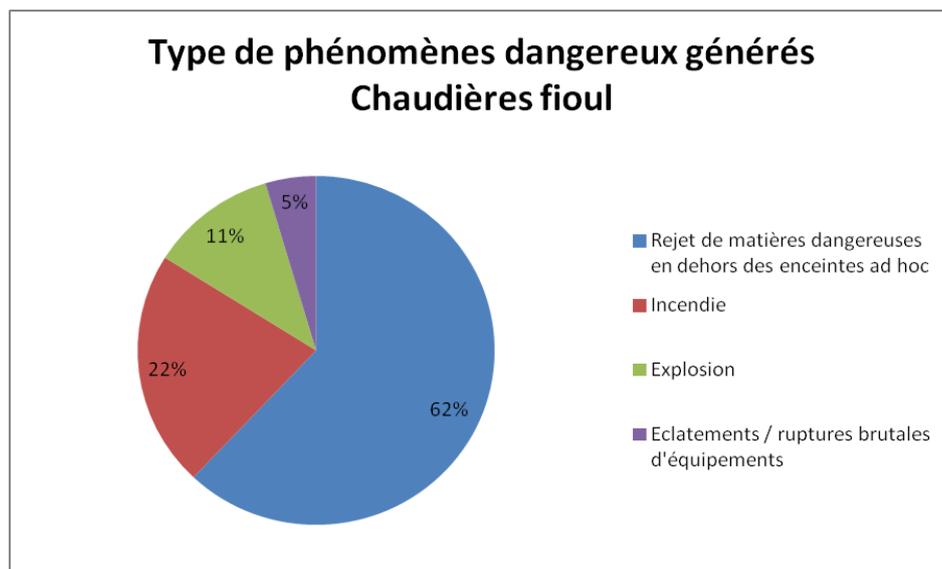


Figure 4: Répartition des phénomènes parmi les cas impliquant des chaudières fioul

Les équipements à fioul se distinguent des chaudières gaz par une sensibilité moindre à l'explosion, liée à la nature du combustible. De même, les conditions nécessaires à une explosion liée au fioul se retrouvent principalement au niveau du corps de chauffe, soit dans un périmètre délimité.

Les incendies restent présents.

Le phénomène dangereux le plus fréquent est le rejet de fioul hors des enceintes ad hoc, donnant lieu à une pollution du milieu.

Les scénarios accidentels impliquant les chaudières à fioul peuvent être catégorisés de la manière suivante :

- Perte de confinement du fioul ;
- Explosion dans la chambre de combustion de la chaudière ;
- Accidents impliquant le circuit de vapeur ;
- Autres.

La perte de confinement du fioul peut donner lieu à une pollution ou à un incendie en cas d'inflammation.

La cause identifiée comme majoritaire d'une telle perte de confinement est la rupture du circuit d'alimentation en amont de la chaudière, généralement due au vieillissement de la ligne.

L'erreur humaine est fréquemment impliquée avec la manipulation inadaptée (oublis en position ouverte par exemple) des organes de sectionnement lors des opérations de maintenance ou d'autres travaux effectués soit sur la chaudière elle-même, soit sur un équipement associé.

L'odeur caractéristique du fioul représente un moyen de détection efficace dans de nombreux cas.

Pour le fioul comme pour le gaz, les explosions sont généralement consécutives au rallumage du brûleur combiné à la présence anormale d'une atmosphère explosible dans le corps de chauffe.

La défaillance peut être de deux ordres :

- Soit un dysfonctionnement de l'analyse d'air dans la chambre de combustion (mesure de CO ou O₂ non fiable) ;
- Soit une indisponibilité d'information de l'opérateur qui, alors que la chaudière est automatiquement mise en sécurité, ne peut valider l'hypothèse d'explosibilité de l'atmosphère dans le corps de chauffe, et force le redémarrage de l'équipement (ceci couplé à un défaut de balayage avant rallumage).

Les causes d'accident impliquant le fluide caloporteur (eau) sont identiques à celles rencontrées pour les chaudières à gaz.

Dans les accidents étudiés, la défaillance des équipements annexes tels que les pompes de pressurisation du circuit de circulation du fluide caloporteur ou de contrôle de niveau peuvent donner lieu à l'échauffement d'éléments métalliques et à des éclatements ou des départs d'incendie.

D'autres scénarios d'accidents peuvent également être observés de façon minoritaire sur les chaudières fioul, sur l'échantillon étudié on recense notamment l'émission de fumées riches en monoxyde de carbone ou en suie.

4. ANALYSE DE RISQUES ET SCÉNARIOS D'ACCIDENT

4.1 INTRODUCTION

Afin de faciliter l'utilisation de ce guide, l'analyse de risques réalisée est plus concise que si elle était menée dans le cadre d'une EDD. Elle a pour objectif principal d'identifier les scénarios d'accidents dont les effets sortent potentiellement des limites du site ainsi que les barrières de sécurité qui empêchent ces scénarios de se produire ou en limitent les effets. Les scénarios dont les phénomènes dangereux génèrent des effets qui restent à l'intérieur du site sont indiqués à la suite des nœuds papillon présentés au paragraphe 4.4.

Dans le cadre de ce guide, l'analyse des risques consiste à :

- identifier de façon la plus exhaustive possible les phénomènes dangereux pouvant conduire à des accidents dont les effets sortent potentiellement des limites du site induits par différents scénarios identifiés lors de la mise en œuvre d'une méthode adaptée aux installations ; la méthode est basée sur un questionnement systématique des causes et conséquences possibles des événements accidentels, ainsi que sur le retour d'expérience disponible ;
- lister les barrières de sécurité (techniques et/ou organisationnelles) de prévention et/ou de protection agissant sur le scénario d'accident identifié ; des propositions peuvent être faites concernant l'ajout ou la modification de barrières de sécurité.

L'objectif de ce chapitre est de guider le lecteur dans la conduite de sa propre analyse de risques dans le cadre de la réalisation de son EDD. Les phénomènes pouvant avoir des distances d'effets hors du site ou bien conduire à des effets dominos sur les autres installations du site peuvent être facilement identifiés et intégrés à l'EDD globale du site étudié. Néanmoins, l'applicabilité et l'exhaustivité des scénarios présentés ci-après sont à vérifier.

Les phénomènes dangereux identifiés lors de cette étape d'analyse de risques, synthétisés au paragraphe suivant, sont ensuite caractérisés en termes d'intensité, de probabilité d'occurrence annuelle et de cinétique (éléments abordés respectivement dans les chapitres 5, 6 et 7).

4.2 ÉVÉNEMENTS REDOUTÉS CENTRAUX ET PHÉNOMÈNES DANGEREUX RETENUS

Au vu des éléments présentés dans le chapitre 2 et notamment dans le Tableau 2, l'analyse de risques a conduit à retenir certains événements redoutés centraux et phénomènes dangereux constituant les scénarios d'accidents dont les effets sortent potentiellement des limites du site. Ils sont présentés dans le tableau page suivante.

Tableau 3: Scénarios d'accidents retenus au terme de l'analyse des risques

Système étudié	Sous-système	Evénements redoutés centraux	Phénomènes dangereux	Nom du PhD	Remarques	
1 Installations liées au combustible liquide	Dépotage combustible liquide par camion citerne / wagon citerne / barge	Epanchage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de dépotage de combustible liquide	Feu de nappe Pressurisation lente de la citerne Pollution		Ordre de grandeur des effets thermiques donné par la modélisation du feu de cuvette suite à épanchage au niveau des bacs de stockage de combustible liquide A étudier au cas par cas	
		ATEX dans le ciel gazeux de la citerne	Explosion du ciel gazeux de la citerne		A étudier au cas par cas	
	Bacs de stockage de combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de stockage de combustible liquide	Feu de cuvette Pressurisation lente de bac Pollution	StockCombLiq_PhD1 StockCombLiq_PhD2	Pressurisation physiquement impossible pour des bacs enterrés ou si présence d'événements de pressurisation dimensionnés selon l'annexe 1 de l'arrêté du 03/10/2010	
		ATEX dans le ciel gazeux du bac de combustible liquide	Explosion du ciel gazeux du bac Feu de bac	StockCombLiq_PhD3 StockCombLiq_PhD4		
	Tuyauteries combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement de la tuyauterie de combustible liquide à l'extérieur / intérieur de la chaufferie	Feu de nappe Pollution	TuyCombLiq_PhD1		
		Rejet de combustible liquide par une soupape de la tuyauterie	Feu de nappe Pollution		Ordre de grandeur des effets thermiques donné par la modélisation du feu de nappe suite à perte de confinement de la tuyauterie	
	2 Installations liées au combustible gazeux	Tuyauteries gaz	Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'extérieur de la chaufferie	Feu torche UVCE / flash fire	TuyGaz_PhD1 TuyGaz_PhD2	
			Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'intérieur de la chaufferie	Feu torche VCE (explosion de la chaufferie)	TuyGaz_PhD1 TuyGaz_PhD3	
			Rejet massif de gaz naturel en surpression par les soupapes	Feu torche UVCE / flash fire		Ordre de grandeur des effets thermiques et de surpression donné par la modélisation du feu torche / (U)VCE suite à perte de confinement de tuyauterie de gaz
3 Propane	Stockage propane	Perte de confinement au niveau du raccordement de la bouteille ou du circuit de transfert de propane	Feu torche UVCE/ VCE / flash fire		Effets localisés Ordre de grandeur des effets thermiques et de surpression donné par la modélisation de l'(U)VCE suite à perte de confinement de tuyauterie de gaz	
		Surpression dans une bouteille de propane	BLEVE de bouteille		Effets localisés	
4 Chaudières tubes d'eau (TE) / tubes de fumées (TF)	Brûleur / chambre de combustion	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant re-démarrage	Explosion de la chambre de combustion	Chaud_PhD1a Chaud_PhD1b	TE TF	
	Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	BLEVE de la capacité d'eau	Chaud_PhD2		
		Arrivée d'eau sur TF surchauffés et vaporisation brutale d'eau	Eclatement de la calandre		Ordre de grandeur des effets de surpression donné par la modélisation du BLEVE de la calandre	
	Surchauffeur (TE)	Surpression dans le surchauffeur (TE)	Eclatement du surchauffeur		Ordre de grandeur des effets de surpression donné par la modélisation du BLEVE du ballon d'eau	

Phénomènes dangereux non modélisés

4.3 BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

4.3.1 Identification des barrières de sécurité

L'identification des barrières de sécurité pouvant intervenir en prévention ou en protection des scénarios d'accidents s'est appuyée sur des référentiels réglementaires, normatifs ou de bonnes pratiques. Ces documents de référence sont listés dans ce paragraphe.

Textes réglementaires liées aux installations de combustion :

- Les arrêtés de la rubrique 2910-A de la nomenclature des ICPE relative aux installations de combustion, traitant le risque d'incendie et d'explosion dans la chaufferie engendrant des effets majeurs pour l'environnement industriel.

L'**arrêté du 26 août 2013** modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion) s'applique.

L'**arrêté du 26 août 2013** relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931 s'applique.

Ces textes recommandent des analyses de risques, en particulier des risques d'incendie et d'explosion, et spécifient des règles de conception, d'installation, d'entretien et de maintenance, qui évitent notamment la formation d'atmosphères explosives. Les arrêtés spécifient des prescriptions techniques relatives à la ventilation, aux installations électriques, à l'alimentation en combustible, au contrôle de la combustion, à la détection gaz et incendie et aux emplacements présentant des risques d'explosion ;

- La directive 97/23/CE « Équipement sous pression », traitant le risque d'explosion d'origine physique inhérent au système sous pression.

La conformité aux normes harmonisées **NF EN 12952** (chaudières à tubes d'eau et installations auxiliaires, et **NF EN 12953** (chaudières à tubes de fumées) vaut présomption de conformité par rapport aux exigences essentielles de cette directive. En France, la série de norme **NF EN 32-020** (équipements de chaufferie à caractère industriel. Sécurité d'exploitation des générateurs de vapeur ou d'eau surchauffée avec ou sans présence humaine permanente) fixe les règles de sécurité en exploitation ;

- La directive 98/37/CE ou « Directive Machines », traitant le risque inhérent à la machine constituée par la chaudière.

La conformité à la norme harmonisée **NF EN 746** (équipements thermiques industriels) vaut présomption de conformité par rapport aux exigences essentielles de cette directive ;

- Il est intéressant de souligner que la norme américaine **NFPA 85** (boiler and combustion systems hazards code) indique de façon claire des mesures de sécurité inhérentes aux chaudières à gaz.

Textes réglementaires liées au dépotage / stockage / transfert de liquides inflammables :

Ces textes sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4: Synthèse des textes réglementaires applicables aux liquides inflammables

Régime	Réservoirs aériens	réipients mobiles	réservoirs enterrés	Mélange-Emploi
Déclaration	AM du 22/12/08		AM du 18/04/08	20/04/2005
Autorisation	AM du 03/10/10	AM du 16/07/12		/

De plus, le régime de l'enregistrement prévu au titre des rubriques 4331 (liquides inflammable de catégorie 2 ou 3 à l'exclusion de ceux relevant de la rubrique 4330) et 4734 (produits pétroliers spécifiques et carburants de substitution) de la nomenclature des ICPE est encadré par l'**arrêté du 01/06/2015**.

Note :

La norme NF EN 32-020-1 donne une définition des quatre modes d'exploitation des chaudières et fixe les prescriptions générales de sécurité pour chacun de ces modes. Elles concernent la surveillance, la conduite et les équipements des chaudières. Les modes d'exploitation traités sont les suivants :

- Avec présence humaine permanente ;
- Avec présence humaine intermittente ;
- En télécontrôle ;
- En autocontrôle.

En vue de faciliter l'utilisation de ce guide, les barrières de sécurité ne sont pas différenciées selon le mode d'exploitation de la chaudière. Afin d'être aussi exhaustif que possible, ce guide traite les mesures prescrites tout mode d'exploitation confondu, depuis des barrières à mettre en place sur toutes les installations quel que soit leur mode d'exploitation jusqu'à des barrières concernant uniquement les chaudières en autocontrôle par exemple.

L'Annexe 3 présente les prescriptions générales à mettre en place pour les chaudières vapeur selon leur mode d'exploitation (exploitation de la norme NF EN 32-020-1 complétée par la norme NFE 32-106 : Sécurité eau et pression).

Les barrières de sécurité sont identifiées sur les nœuds papillons par la fonction de sécurité qu'elles sont censées remplir. Pour rappel, toutes les barrières listées dans ce guide ne sont pas à considérer comme des exigences réglementaires. C'est lors

de la phase d'analyse de risques que l'exploitant devra identifier les barrières qui sont à mettre en place sur son site (au vu des enjeux ou des pratiques du groupe par exemple).

4.3.2 Évaluation de la performance des barrières de sécurité

Des éléments d'évaluation de la performance de certaines barrières de sécurité, ainsi qu'un rappel des exigences réglementaires associées, sont fournis en Annexe 4.

Ces éléments s'appuient sur les méthodologies décrites dans les deux référentiels disponibles sur le site internet de l'INERIS :

- Oméga 10⁸ pour les barrières techniques de sécurité ;
- Oméga 20⁹ pour les barrières humaines de sécurité. Pour les barrières humaines de sécurité la fiche n°7 de la circulaire du 10 mai 2010 fournit également une méthodologie d'évaluation.

L'évaluation s'appuie sur les évaluations individuelles de chaque élément de la barrière (détection, traitement, action) mais c'est l'évaluation de la barrière globale qui est retenue dans les évaluations de probabilité des événements.

Les critères d'évaluation (communs aux barrières techniques et humaines) sont :

- **L'indépendance** : faculté d'une barrière, de par sa conception, son exploitation et son environnement, à ne pas dépendre du fonctionnement d'autres éléments et notamment d'une part d'autres barrières, et d'autre part, du système de conduite de l'installation, afin d'éviter les modes communs de défaillance ou de limiter leur fréquence d'occurrence.
- **L'efficacité** : capacité à remplir la mission/fonction de sécurité qui lui est confiée pendant une durée donnée et dans son contexte d'utilisation
- **Le temps de réponse** : ce temps de réponse est inclus dans la cinétique de mise en œuvre d'une fonction de sécurité. Cette dernière doit être en adéquation [significativement plus courte] avec la cinétique du ou des phénomène(s) qu'elle doit maîtriser.
- **Le niveau de confiance** : il traduit la fiabilité de la barrière ;
- **Le maintien des performances** des barrières (testabilité, maintenabilité).

Les tableaux d'évaluation de la performance des barrières de sécurité présentés en Annexe 4 sont éventuellement à adapter et à compléter par l'exploitant.

⁸ Rapport DRA-08-95403-01561B « Évaluation des performances des Barrières Techniques de Sécurité (DCE DRA-73) - Évaluation des Barrières Techniques de Sécurité - Ω 10 » du 01/09/2008 ;

⁹ Rapport DRA-09-103041-06026B « Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20 - Programme 181 - DRA 77 : Maîtrise des risques accidentels par les dispositions technologiques et organisationnelles » du 21/09/2009

4.4 SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS D'ACCIDENTS RETENUS

4.4.1 Introduction

Ce paragraphe a pour objectif de présenter les scénarios d'accidents retenus avec des barrières de sécurité agissant en prévention ou en protection de ces scénarios. L'outil utilisé pour cela est le nœud papillon (combinaison d'un arbre de défaillances et d'un arbre d'événements autour d'un événement redouté central).

Les chapitres 5, 6 et 7 fournissent des éléments pour caractériser les phénomènes dangereux identifiés dans ces scénarios d'accidents en intensité, probabilité et cinétique.

Remarques générales :

- Les événements initiateurs peuvent être de plusieurs types :
 - Événements d'origine externe :
 - Cause naturelle : séisme, foudre, neige et vent, inondation, etc. ;
 - Cause anthropique : accidents routiers ou ferroviaires, chute d'aéronefs, effets dominos externes, etc. ;
 - Événements d'origine interne : travaux, chocs par véhicules, effets dominos internes, événements liés au procédé.

Dans les nœuds papillon présentés ci-après, tous les événements qui ne sont pas liés à des effets dominos ou propres au procédé sont traités de façon générique sous la dénomination « agressions externes (chocs, travaux) ». Ils seront à traiter de façon plus détaillée dans le cadre d'une EDD.

- Il est rappelé que les barrières proposées ne sont pas exhaustives et ne doivent pas être considérées comme des exigences. Ce sont des propositions en vue de faciliter l'analyse de risques. Leurs performances sont à évaluer en fonction du contexte dans lequel elles sont utilisées.
- Un point de vigilance est mis en avant concernant le fonctionnement des barrières de sécurité intervenant en protection des scénarios d'accidents. Le bon fonctionnement de ces barrières peut mener à des phénomènes dangereux d'intensité moindre ou supprimer la possibilité d'occurrence d'un phénomène dangereux. Sur un nœud papillon, cela est généralement représenté par une branche de l'arbre d'événements qui part de la barrière de sécurité et mène à un phénomène dangereux d'intensité moindre ou nulle.

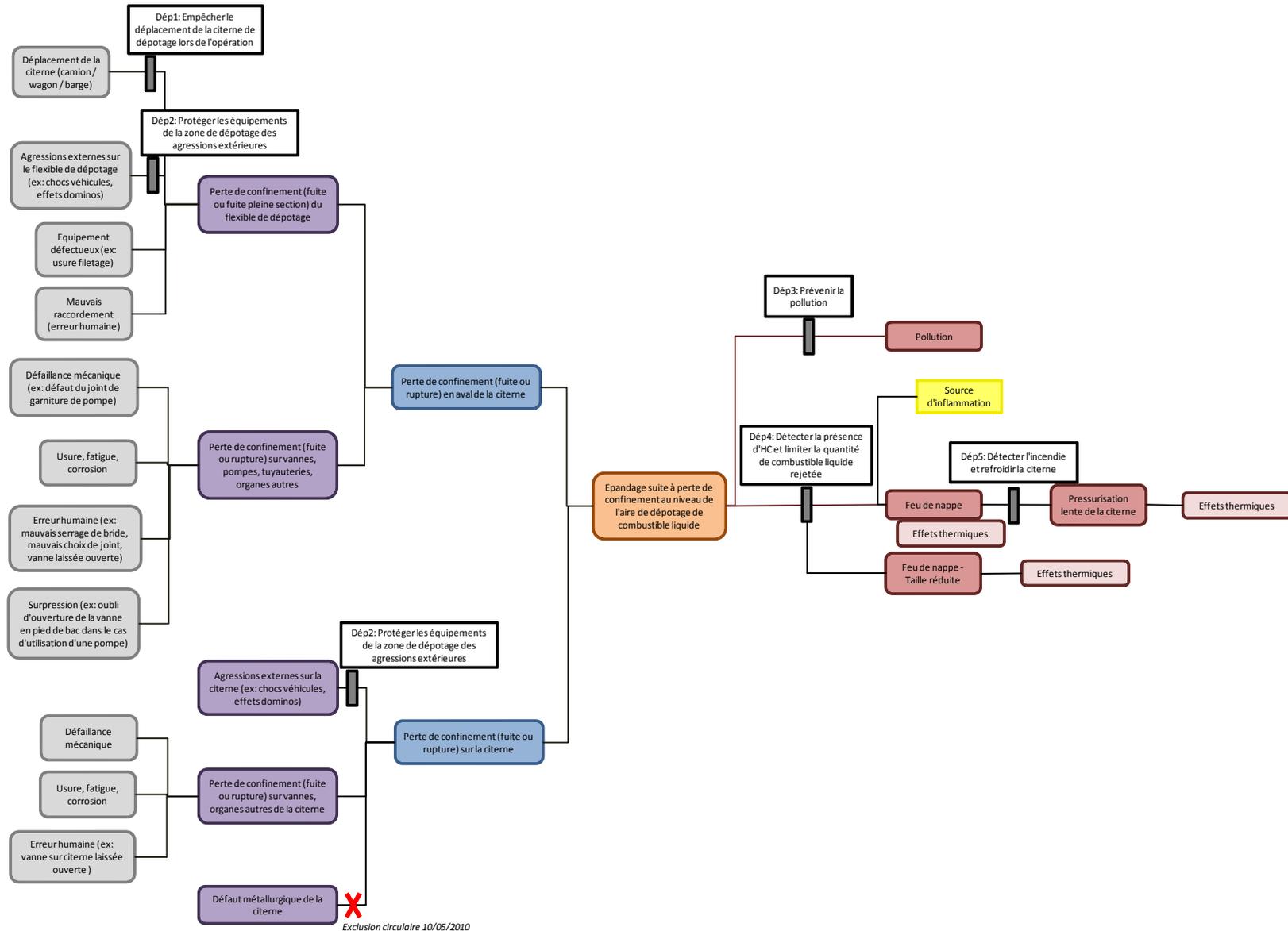
Exemple : une barrière qui consiste à détecter une fuite de substance dangereuse et à en couper l'alimentation permet, si elle fonctionne correctement, de limiter le temps de la fuite et donc de limiter les conséquences des phénomènes dangereux générés. En cas de dysfonctionnement, la fuite peut être considérée comme illimitée.

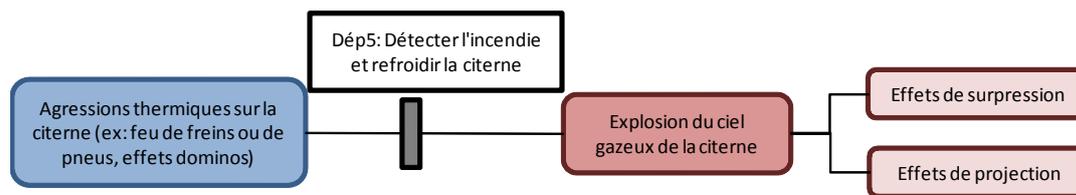
Dans le cadre de ce guide, les modélisations réalisées couvrent des intervalles de paramètres représentatifs d'un bon ou d'un mauvais fonctionnement des barrières de protection. Par exemple, pour une fuite de tuyauterie de combustible liquide, les résultats de modélisation sont paramétrés selon le diamètre du feu de nappe, qui peut être déterminé à partir du volume de combustible liquide libéré. Si la barrière de détection fonctionne, on retiendra un volume de combustible liquide libéré moins important que si la barrière ne fonctionne pas.

- La cuvette de rétention n'apparaît pas sur les nœuds papillon des scénarios de type « feu de nappe » car elle ne permet pas d'en réduire la probabilité d'occurrence. Elle permet d'en limiter les effets (en limitant la taille de la nappe) et dans le cadre du présent guide, les hypothèses de modélisation prennent en compte la présence d'une cuvette de rétention dans la zone de stockage de combustible liquide (cf. paragraphe 5.2).

La cuvette de rétention permet néanmoins d'empêcher une éventuelle pollution, et figure à ce titre en prévention de ce phénomène sur les nœuds papillon.

4.4.2 Dépotage de combustible liquide





Remarques :

- Le transport de marchandises dangereuses est régi par des règlements internationaux (ADR pour le transport par route, RID pour le transport par chemins de fer et ADN pour le transport par voies de navigation intérieures), qui encadrent précisément la construction, les épreuves, les contrôles périodiques et les conditions d'utilisation des citernes. Dans ces conditions, la circulaire du 10/05/2010 permet de ne pas évaluer la fréquence d'occurrence de l'événement initiateur « défaut métallurgique de la citerne » pour déterminer la probabilité du phénomène de ruine de la citerne, sous réserve du respect des observations qui suivent, notamment que l'exploitant, dans le cadre de son système de suivi a mis en place les moyens pour :
 - s'assurer que la citerne fonctionne dans la gamme de paramètres pour laquelle elle a été conçue (température, pression, produit, ...) ;
 - contrôler que les spécificités de la citerne permettant la fonction de confinement et les organes de sécurité, sont correctement maintenues dans le temps.
- Un ordre de grandeur des distances des effets thermiques du feu de nappe généré suite à épandage au niveau de l'aire de dépotage de combustible liquide peut être obtenu en exploitant les abaques du phénomène de feu de cuvette au niveau des bacs de stockage de combustible liquide (voir Annexe 5).
- Les scénarios de pressurisation de la citerne et d'explosion du ciel gazeux de la citerne peuvent être physiquement possibles mais n'ont pas été étudiés plus en détails dans le cadre de ce guide. En effet, les situations rencontrées peuvent être très différentes d'un site à l'autre (type de citerne, disposition de l'aire de dépotage, etc.) et il est recommandé d'étudier ces phénomènes au cas par cas. Par exemple, en cas de présence d'une cuvette de rétention déportée au niveau de l'aire de dépotage, l'éventuel feu de nappe résultant d'une perte de confinement ne mènera pas à une pressurisation de la citerne.

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Dép1	Empêcher le déplacement de la citerne de dépotage lors de l'opération	Mise en place de cales (camions), amarrage à l'appontement (barges), actions d'immobilisation identifiées dans la procédure de dépotage (tous), etc
Dép2	Protéger les équipements de l'aire de dépotage des agressions extérieures	Ex: glissière de sécurité, interdiction d'accès à la zone de dépotage, etc
Dép5	Détecter l'incendie et refroidir la citerne	Déluge sur la zone de dépotage suite à détection incendie ou détection humaine

Barrières de protection :

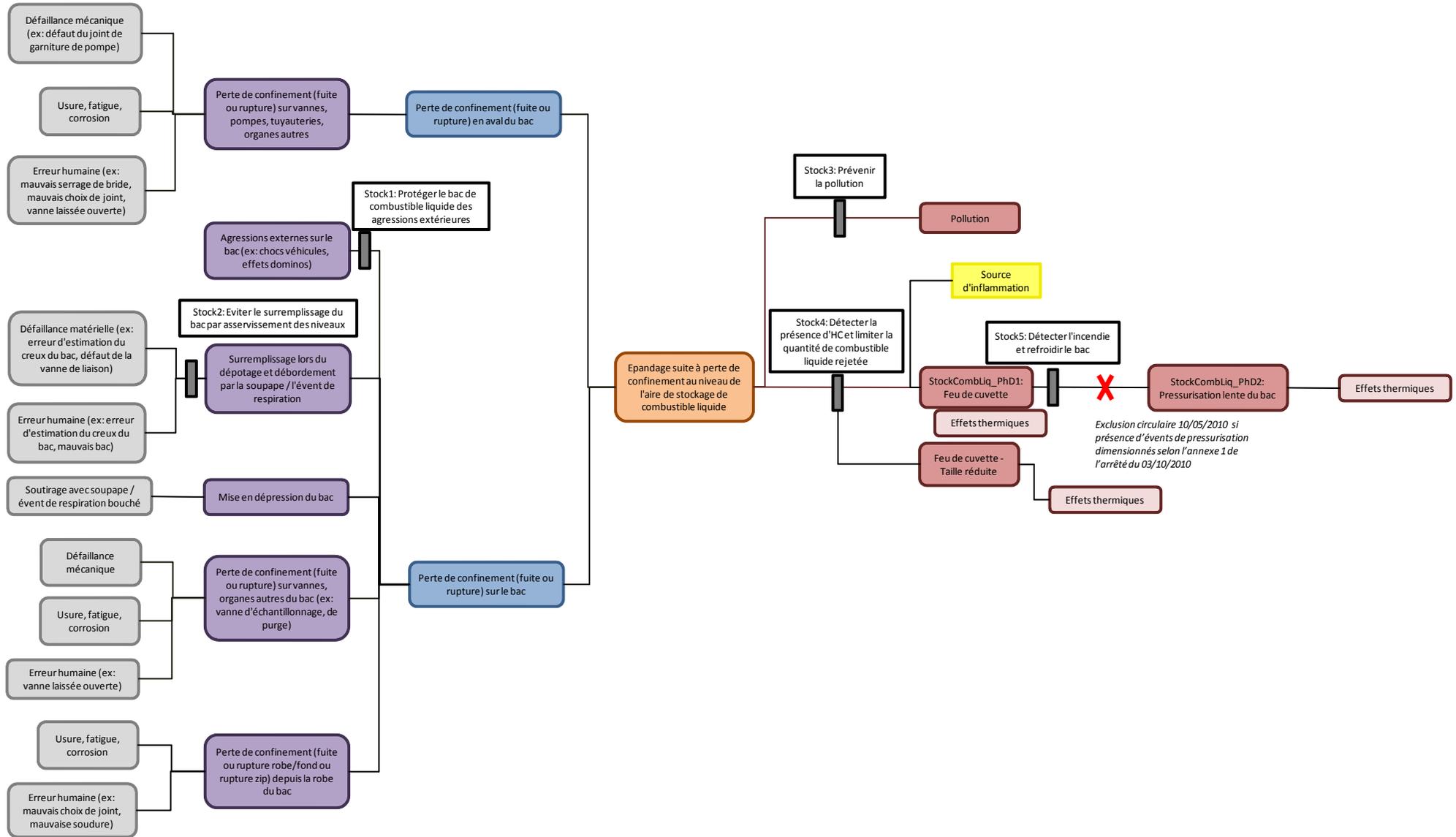
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Dép3	Prévenir la pollution	Zone de rétention bien dimensionnée
<i>Dép4</i>	<i>Détecter la présence d'hydrocarbures et limiter la quantité de combustible liquide rejetée</i>	<i>Fermeture de la vanne de fond de la citerne / arrêt pompe sur détection humaine de perte de confinement ou détection HC (barrière efficace uniquement pour les EI "perte de confinement en aval de la citerne")</i>
<i>Dép5</i>	<i>Détecter l'incendie et refroidir la citerne</i>	<i>Déluge sur la zone de dépotage suite à détection incendie ou détection humaine</i>

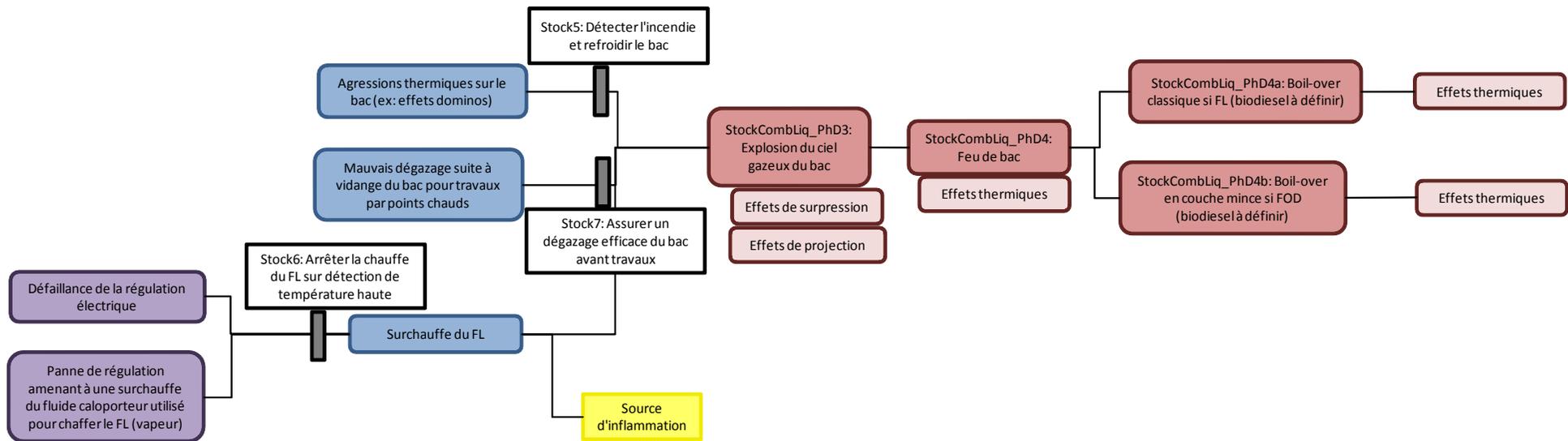
Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.3 Stockage de combustible liquide





Remarques :

- La circulaire du 10/05/2010 précise que le phénomène de pressurisation lente de bac est rendu physiquement impossible par la présence d'évents de pressurisation dimensionnés selon l'annexe 1 de l'arrêté du 03/10/2010.
- Le feu de bac n'est observé que s'il n'y a plus aucun obstacle au-dessus du liquide. Ceci suppose que le toit fixe du bac ait été éjecté par une explosion du ciel gazeux.
- Le phénomène de boilover est physiquement impossible si le bac est un cylindre horizontal ou si le bac est un cylindre enterré. De plus, dans le cas où le bac est enterré, le phénomène de pressurisation lente de bac n'est pas retenu.
- Dans le cas où du biodiesel est utilisé, la possibilité d'occurrence d'un boilover est à déterminer en vérifiant si les caractéristiques du produit remplissent les critères cités dans l'Oméga 13 de l'INERIS (ex : densité, viscosité, pureté, etc.). Si l'exploitant ne dispose pas des caractéristiques physico-chimiques du produit utilisé, des tests peuvent être réalisés.

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Stock1	Protéger le bac de combustible liquide des agressions extérieures	Cuvette de rétention du bac
Stock2	Eviter le surremplissage du bac par asservissement des niveaux	Asservissement remplissage bac sur niveau haut et niveau anti-débordement (fermeture vanne / arrêt pompe)
Stock5	Détecter l'incendie et refroidir le bac	Couronne de refroidissement sur le bac de stockage suite à détection incendie ou détection humaine
Stock6	Arrêter la chauffe du FL sur détection de température haute	Asservissement de la chauffe du FL sur température haute
Stock7	Assurer un dégazage efficace du bac avant travaux	Actions de vidange, d'aération et de consignation du bac et vérification par explosimètre identifiées dans la procédure de travaux par points chauds

Barrière de protection :

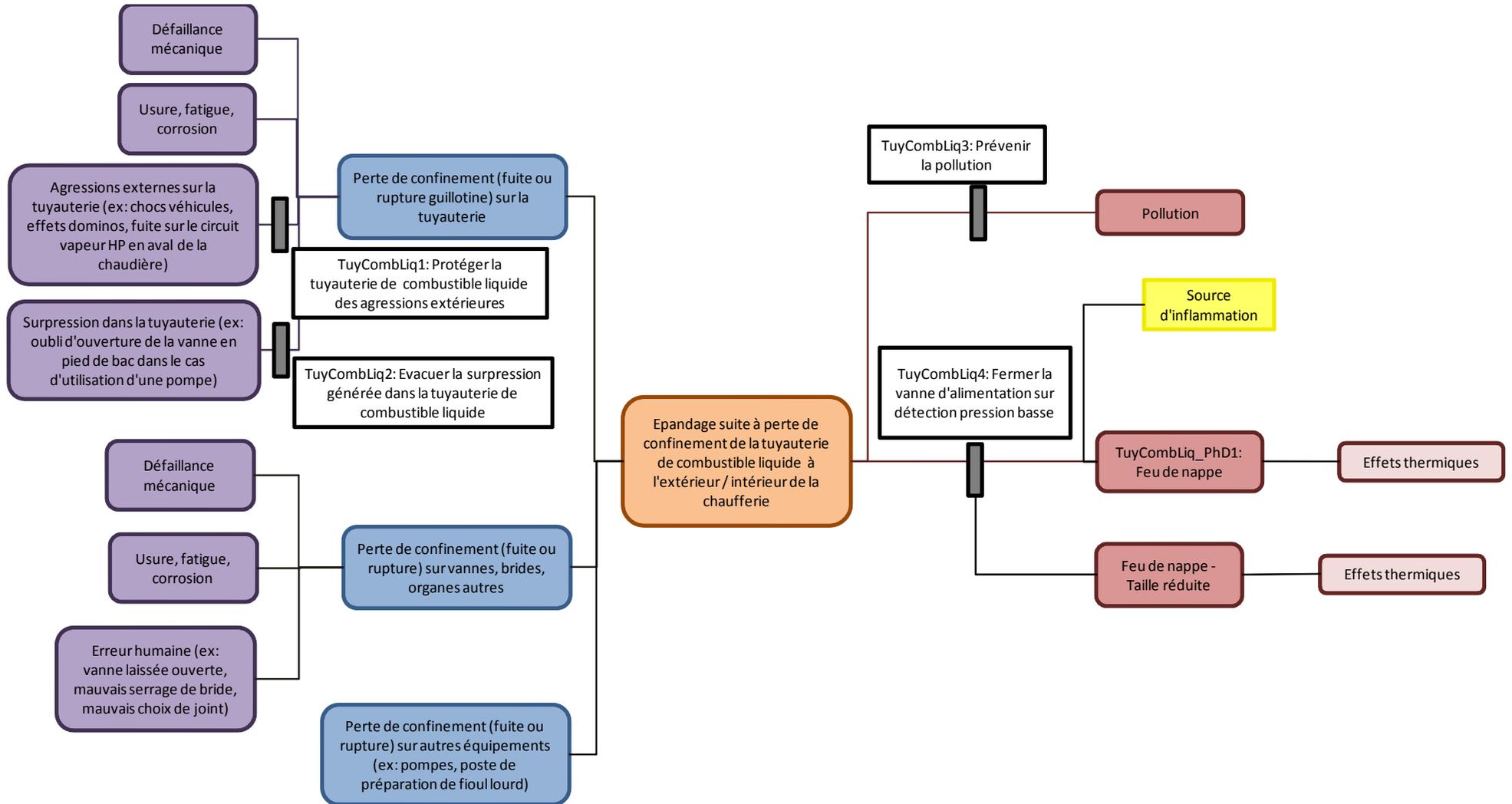
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Stock3	Prévenir la pollution	Cuvette de rétention avec vanne vers l'extérieur maintenue fermée en permanence
Stock4	Détecter la présence d'hydrocarbures et limiter la quantité de combustible liquide rejetée	Fermeture de la vanne de fond du bac / vannes d'isolement sur détection humaine de perte de confinement ou détection HC (barrière efficace uniquement pour les EI "perte de confinement en aval du bac" + "surremplissage")
Stock5	Détecter l'incendie et refroidir le bac	Couronne de refroidissement sur le bac de stockage suite à détection incendie ou détection humaine

Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.4 Tuyauteries de transfert de combustible liquide et leurs équipements



Remarques :

- Les scénarios identifiés ci-dessus concernent les cas où les tuyauteries sont enterrées et aériennes. Le poste de préparation du fioul dans le cas où du fioul lourd est utilisé est également traité au travers de ces scénarios.
- Les scénarios sur les tuyauteries de combustible liquide situées à l'extérieur ou bien à l'intérieur de la chaufferie sont de même nature mais peuvent différer sur certains éléments (par exemple l'événement initiateur « choc par véhicule » peut ne pas être retenu dans le cas où la tuyauterie se situe à l'intérieur de la chaufferie, la taille de nappe et le temps de détection incendie seront probablement différents, etc.). Le cas où la tuyauterie de combustible liquide est à l'extérieur et celui où elle est à l'intérieur de la chaufferie sont donc à étudier séparément.
- Dans le cadre de l'étude de dangers, les scénarios de fuite et de rupture guillotine de la tuyauterie sont à étudier séparément afin que la quantification en fréquence d'occurrence soit la plus représentative possible. La représentation « agrégée » a été choisie dans ce guide car les résultats des modélisations sont donnés sous forme d'abaques, paramétrées selon la quantité de combustible liquide libérée (voir Annexe 5) mais en réalité, certaines causes identifiées sur le nœud papillon ci-dessus ne mèneront pas à une rupture guillotine de tuyauterie.
- La détection de pression basse n'est efficace que dans le cas de fuites importantes. Cette barrière de sécurité n'est donc pas à valoriser dans le cas de petites fuites.
- Le feu de nappe à l'intérieur de la chaufferie peut ne pas être retenu dans le cadre de l'étude de dangers si la chaufferie est par exemple équipée de murs coupe-feu 2 heures et que l'exploitant s'engage sur la possibilité d'éteindre le feu dans ce délai (à voir au cas par cas selon la nature du feu, les moyens et l'efficacité des services d'incendie et de secours).

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TuyCombLiq1	Protéger la tuyauterie de combustible liquide des agressions extérieures	Ex: gabarit, glissières de sécurité
TuyCombLiq2	Evacuer la surpression générée dans la tuyauterie de combustible liquide	Arrêt du pompage sur pression haute / tourne-en-rond pompe

Barrières de protection :

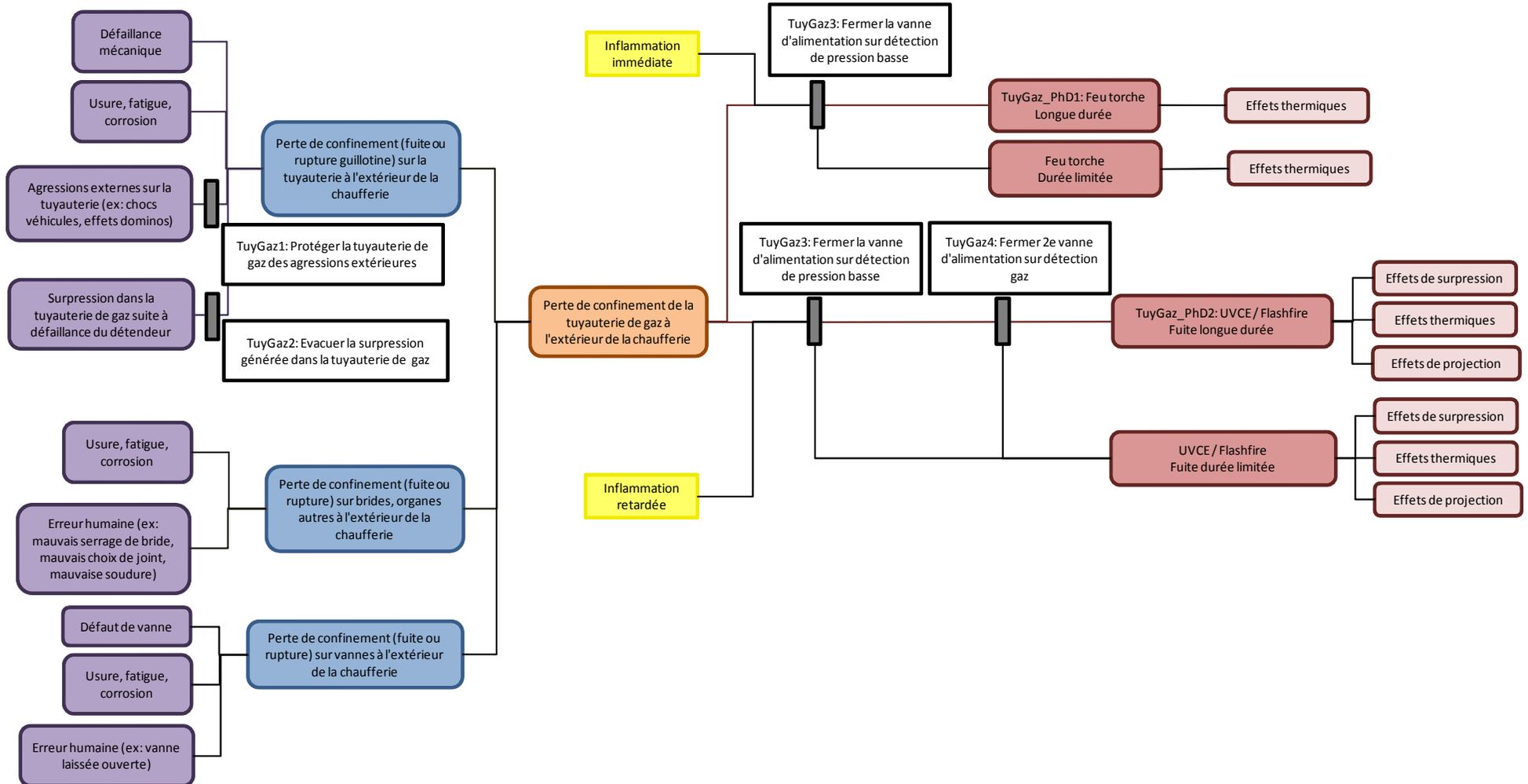
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TuyCombLiq3	Prévenir la pollution	Cheminement sur zone bétonnée avec collecte vers séparateur d'hydrocarbures
TuyCombLiq4	Fermer la vanne d'alimentation sur détection pression basse	Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection pression basse (ou sur écart de quantités)

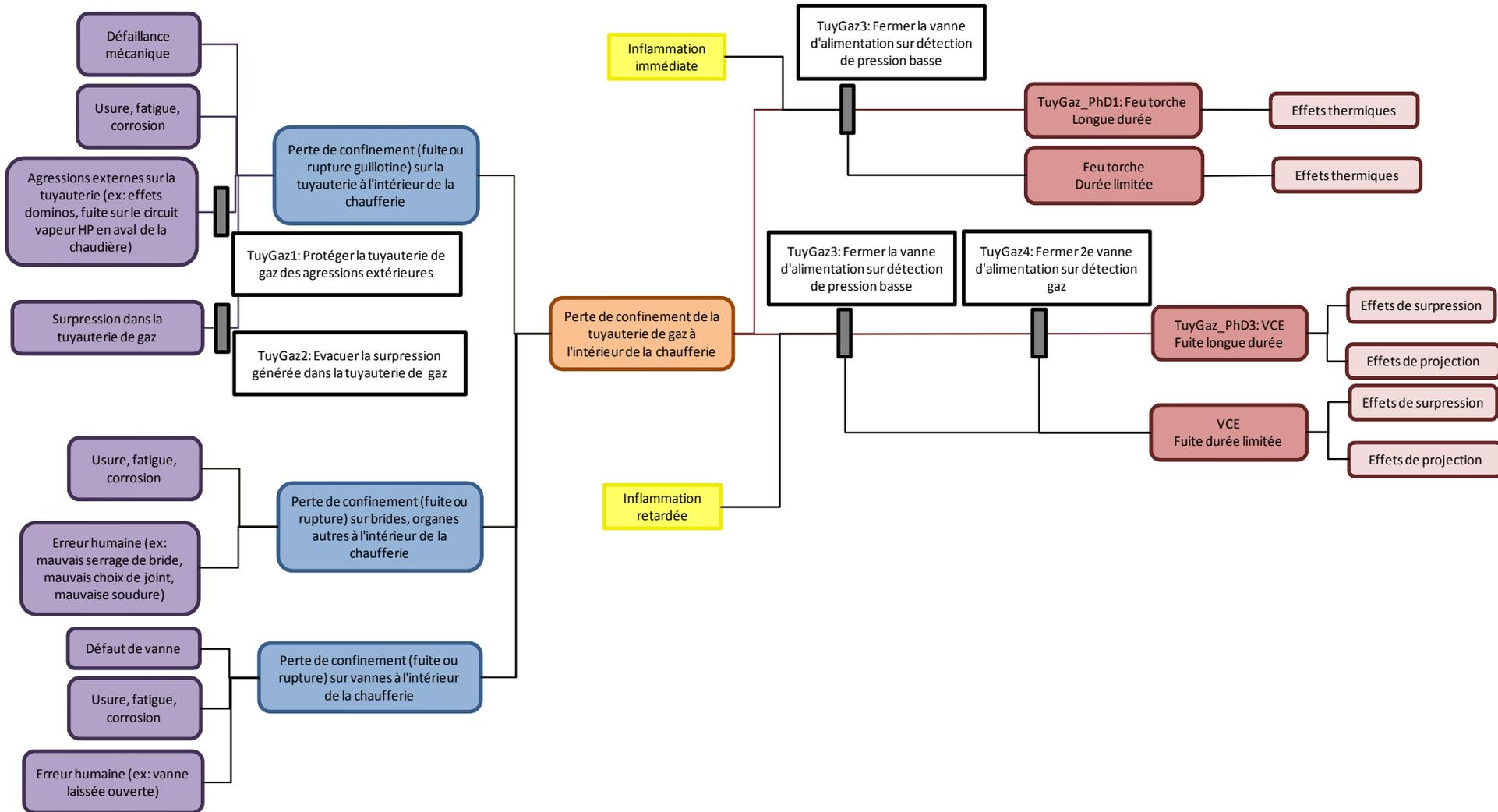
Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.5 Tuyauteries de gaz et leurs équipements





Remarques :

- Les scénarios identifiés ci-dessus concernent les cas où les tuyauteries sont enterrées et aériennes. Dans le cas de tuyauteries enterrées, le rejet est considéré vertical. Dans le cas où les tuyauteries sont aériennes, le rejet est considéré horizontal. Néanmoins, les quantifications en probabilité des événements différera selon que la tuyauterie est enterrée ou aérienne.
- Les scénarios sur les tuyauteries de gaz présentent quelques particularités selon que celles-ci se situent à l'extérieur ou bien à l'intérieur de la chaufferie. On peut citer notamment la phénoménologie (UVCE vs VCE : explosion du local) ou bien l'efficacité des barrières de sécurité impliquées en protection.
- Dans le cadre de l'étude de dangers, les scénarios de fuite et de rupture guillotine de la tuyauterie sont à étudier séparément afin que la quantification en fréquence d'occurrence soit la plus représentative possible. La représentation « agrégée » a été choisie dans ce guide car les résultats des modélisations sont donnés sous forme d'abaques, paramétrées selon la quantité de combustible liquide libérée (voir Annexe 5) mais en réalité, certaines causes identifiées sur le nœud papillon ci-dessus ne mèneront pas à une rupture guillotine de tuyauterie.
- Une surpression dans la tuyauterie de gaz naturel peut mener à l'ouverture des soupapes de la tuyauterie de gaz et à un feu torche ou un (U)VCE. Ces phénomènes peuvent conduire à des effets dominos à étudier dans le cadre de l'étude de dangers. Dans le cadre de ce guide, ces phénomènes n'ont pas été modélisés car un ordre de grandeur des distances de leurs effets de surpression et thermiques peut être obtenu en exploitant les abaques des phénomènes de feu torche et d'(U)VCE suite à une perte de confinement sur la tuyauterie de gaz (voir Annexe 5).
- La détection de pression basse n'est efficace que dans le cas de fuites importantes. Cette barrière de sécurité n'est donc pas à valoriser dans le cas de petites fuites.
- La détection de gaz n'est pas valorisée dans le cas d'un feu torche car ce phénomène résulte d'une inflammation immédiate du gaz qui ne peut donc pas être détectée.
- Le bon fonctionnement des barrières d'isolement sur détection de pression basse et détection gaz conduit à des scénarios de fuite de durée limitée, durée qui peut être différente selon le mode de détection impliqué. Le cas échéant, plusieurs scénarios correspondant à des durées de fuite différentes seront à distinguer. Dans le cadre de ce guide, les modélisations ont été réalisées pour plusieurs durées de fuite.
- Il est possible de rencontrer des tuyauteries de gaz à double enveloppe avec détection de fuite dans la double enveloppe. Le cas échéant, seule la rupture guillotine peut être retenue, le scénario de fuite pouvant être écarté sur des arguments de conception.

- Le feu torche qui se produit à l'intérieur de la chaufferie peut ne pas être retenu dans le cadre de l'étude de dangers si la chaufferie est par exemple équipée de murs coupe-feu 2 heures et que l'exploitant s'engage sur la possibilité de fermer l'alimentation de gaz dans ce délai (à voir au cas par cas selon la nature du feu, les moyens et l'efficacité des services d'incendie et de secours).

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TuyGaz1	Protéger la tuyauterie de gaz des agressions extérieures	Ex: gabarit, glissières de sécurité
TuyGaz2	Evacuer la surpression générée dans la tuyauterie de gaz	Soupape de sécurité de la tuyauterie de gaz

Barrières de protection :

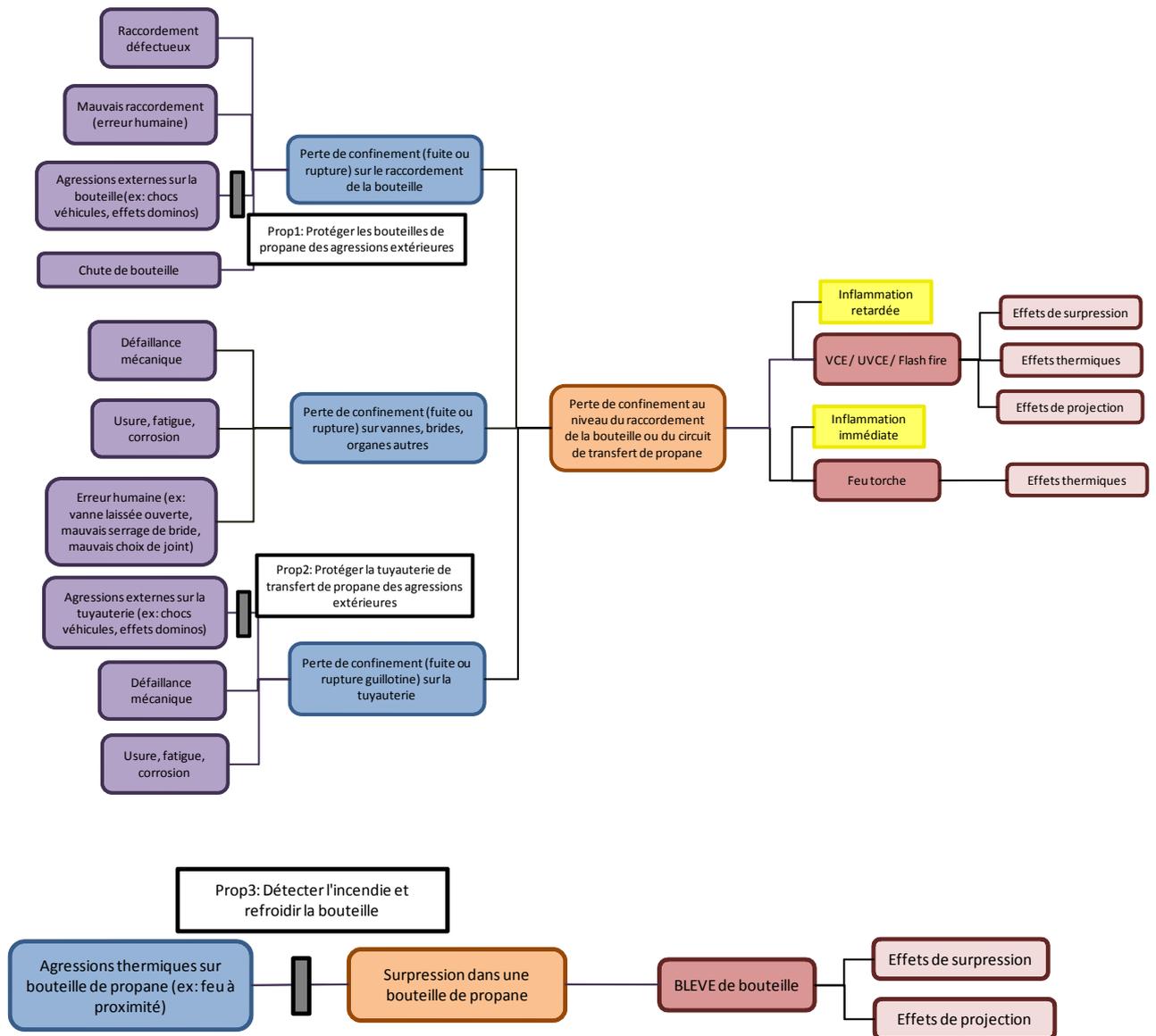
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TuyGaz3	<i>Fermer la vanne d'alimentation sur détection de pression basse</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection de pression basse</i>
TuyGaz4	<i>Fermer la 2e vanne d'alimentation sur détection gaz</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection gaz</i>

Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.6 Stockage et transfert de propane



Remarque :

- La fuite / rupture guillotine du robinet de la bouteille peut être exclue car, la bouteille étant soumise à la réglementation des Équipements Sous Pression (et donc suivant un certain nombre de normes), cet événement peut être considéré comme « physiquement impossible ». Cette exclusion, prévue dans la circulaire du 10 mai 2010, peut être appliquée sous réserve de la démonstration que les bouteilles sont utilisées dans des conditions ne pouvant mener à des agressions supérieures à celles décrites dans les normes.

- Les effets thermiques du feu torche suite à perte de confinement au niveau du raccordement d'une bouteille de propane ou au niveau des tuyauteries de transfert sont localisés (de l'ordre de 0,5 m pour un débit de 10 kg/h¹⁰).
- Les effets de surpression du BLEVE d'une bouteille de propane sont localisés (moins de 10 m pour une bouteille de 35 kg en extérieur).
- Un ordre de grandeur des distances des effets de surpression et thermiques de l'UVCE / VCE consécutif à la perte de confinement de propane peut être obtenu en exploitant les abaques de l'UVCE / VCE consécutif à la perte de confinement de la tuyauterie de gaz (voir Annexe 5).

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Prop1	Protéger les bouteilles de propane des agressions extérieures	Dispositions constructives autour du stockage de propane (ex: gabarit, local)
Prop2	Protéger la tuyauterie de transfert de propane des agressions extérieures	Dispositions constructives autour des tuyauteries de propane (ex: gabarit, glissières de sécurité)
Prop3	Détecter l'incendie et refroidir la bouteille	<i>Déluge sur la zone de stockage de propane suite à détection incendie ou détection humaine</i>

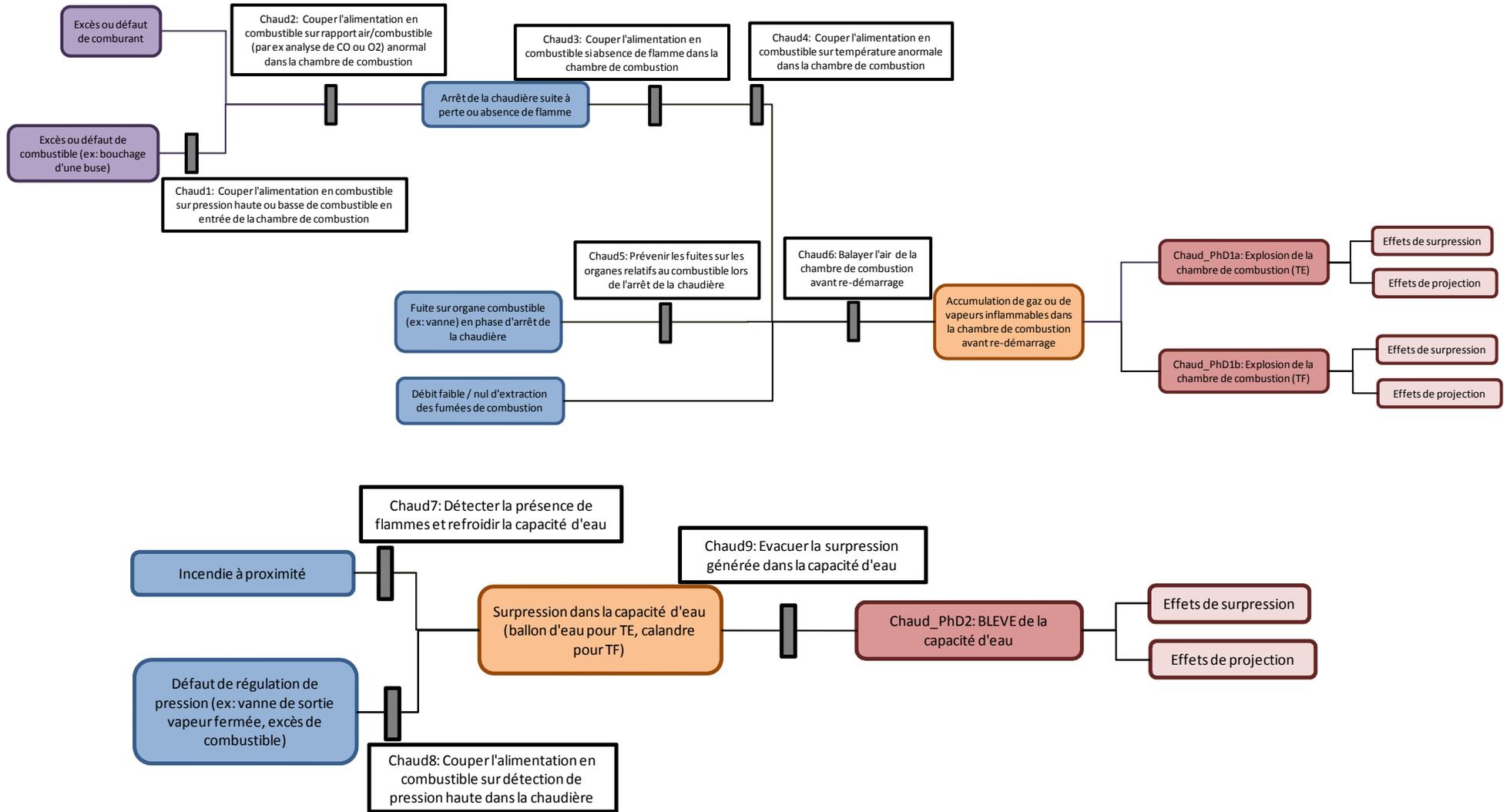
Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

¹⁰ Débit moyen d'une bouteille de 35 kg pour une durée de service de 15 minutes et une température extérieure de 10°C.

4.4.7 Chambre de combustion et capacité d'eau de la chaudière



Remarques :

- L'indépendance des barrières 1, 2, 3 et 4 est à assurer pour les valoriser sur le même scénario d'accident (s'assurer notamment que les éléments de traitement de l'information et d'action sont bien indépendants, par exemple que les vannes de coupure de l'alimentation en combustible soient distinctes).
- Dans certains cas, la chaudière est équipée de plusieurs brûleurs et la perte de flamme sur un des brûleurs n'empêchera pas le gaz d'être brûlé par les autres brûleurs. L'existence de modes communs de défaillance des brûleurs devra néanmoins être étudiée en phase d'analyse de risques.
- Le phénomène d'explosion de la chambre de combustion de la chaudière peut également être dû à une accumulation de propane dans la chambre de combustion. Le cas d'explosion de la chambre de combustion suite à accumulation de propane dans la chambre a été assimilé à celui de l'explosion de la chambre suite à accumulation de gaz naturel. En effet, propane et gaz naturel ont des réactivités proches (vitesses laminaires de flamme du même ordre de grandeur). De plus, le propane n'est pas systématiquement utilisé pour la mise en route de la chaudière. C'est alors le gaz naturel qui, en plus de son rôle de combustible, permet le premier allumage de la chaudière.

Barrières de prévention :

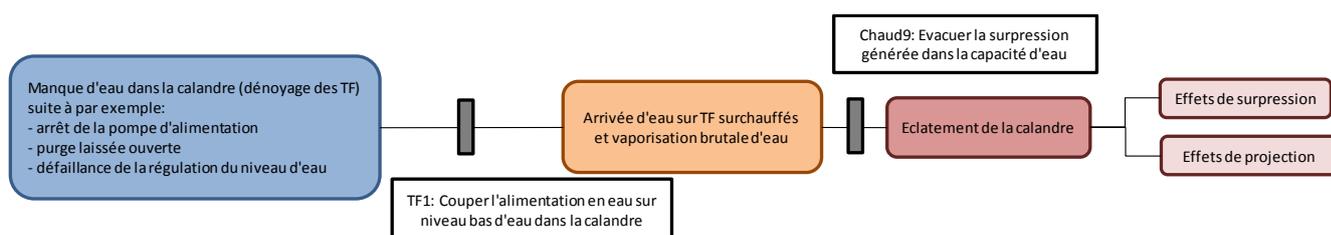
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
<i>Chaud1</i>	<i>Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la pression de combustible en entrée de la chambre de combustion</i>
<i>Chaud2</i>	<i>Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O₂) anormal dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur le rapport air / combustible dans la chambre de combustion</i>
<i>Chaud3</i>	<i>Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la présence de la flamme dans la chambre de combustion</i>
<i>Chaud4</i>	<i>Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur la température dans la chambre de combustion</i>
<i>Chaud5</i>	<i>Prévenir les fuites sur les organes relatifs au combustible lors de l'arrêt de la chaudière</i>	<i>Actions de contrôle d'étanchéité, purge, etc identifiées dans la procédure de mise en service / d'arrêt de la chaudière</i>
<i>Chaud6</i>	<i>Balayer l'air de la chambre de combustion avant re-démarrage</i>	<i>Action de balayage intégrée dans la séquence de ré-allumage de la chaudière</i>
<i>Chaud7</i>	<i>Détecter la présence de flammes et refroidir la capacité d'eau</i>	<i>Déluge dans la chaufferie suite à détection incendie ou détection humaine</i>
<i>Chaud8</i>	<i>Couper l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière</i>

Barrières de protection :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
<i>Chaud9</i>	<i>Evacuer la surpression générée dans la capacité d'eau</i>	<i>Soupape de sécurité de la chaudière</i>

<p><u>Légende:</u> <i>Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5</i> Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives</p>
--

4.4.8 Chaudière à tubes de fumées



Remarques :

- Une vaporisation brutale d'eau suite à une remise en eau sur des tubes de fumées surchauffés peut générer un éclatement de la calandre (pressurisation rapide). Un ordre de grandeur des distances des effets de surpression associés peut être obtenu en exploitant les abaques du BLEVE de la capacité d'eau (voir Annexe 5).
- Une vaporisation d'eau peut avoir lieu suite à une fuite sur un tube de fumées. Les effets redoutés sont une déformation de la calandre voire un arrachement du brûleur, mais ils restent limités.
- Un retour de combustible liquide dans le circuit de vapeur servant à réchauffer les bacs de combustible liquide peut mener à une cokéfaction sur les tubes de fumées et une surchauffe de ces derniers. Un affaissement des faisceaux de tubes peut alors avoir lieu mais les effets restent limités.
- Un surremplissage en eau dans la chaudière peut avoir lieu suite à une défaillance des jaugeurs de niveau (à cause par exemple d'un retour de polluants depuis la bêche alimentaire suite à un mauvais traitement d'eau). Les effets redoutés restent limités (par exemple déformation de la calandre).

Barrières de prévention :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
TF1	<i>Couper l'alimentation en eau sur niveau bas d'eau dans la calandre</i>	<i>Asservissement de l'alimentation en eau sur détection de niveau bas d'eau dans la chaudière</i>

Barrières de protection :

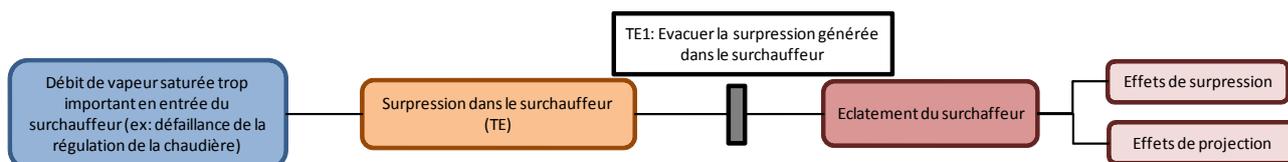
Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
Chaud9	<i>Evacuer la surpression générée dans la capacité d'eau</i>	<i>Soupape de sécurité de la chaudière</i>

Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

4.4.9 Chaudière à tubes d'eau avec surchauffeur



Remarque :

- Un débit de vapeur saturée trop important en entrée du surchauffeur peut générer une surpression dans le surchauffeur, menant à l'éclatement de celui-ci. Un ordre de grandeur des distances des effets de surpression associés peut être obtenu en exploitant les abaques du BLEVE de la capacité d'eau (voir Annexe 5).
- Une vaporisation brutale d'une faible quantité d'eau dans la chambre de combustion de la chaudière peut avoir lieu suite à une fuite sur un tube d'eau. Les effets redoutés sont une déformation de la paroi de la chambre voire un arrachement du brûleur, mais ils restent limités.

Barrières de protection :

Nom	Fonction de sécurité	Exemples d'éléments de la barrière
<i>TE1</i>	<i>Evacuer la surpression générée dans le surchauffeur</i>	<i>Soupape de sécurité du surchauffeur</i>

Légende:

Barrière étudiée en détails dans l'Annexe 5

Barrière issue d'exigences réglementaires ou normatives

5. CARACTÉRISATION DE L'INTENSITÉ DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

Ce chapitre présente les principes d'évaluation des intensités des phénomènes dangereux récapitulés au paragraphe 5.1 ci-après. Il s'articule en trois parties :

- Synthèse des phénomènes dangereux modélisés ;
- Principales hypothèses de modélisation ;
- Données de base générales pour les modélisations.

Les distances d'effets sont présentées dans l'Annexe 5, sous forme d'abaques. Pour rappel (voir Tableau 3), certains phénomènes dangereux n'ont pas été modélisés car :

- Des ordres de grandeur des distances de leurs effets de surpression et / ou thermiques peuvent être obtenus en exploitant les abaques appropriés en Annexe 5 ;
- Ils sont à traiter au cas par cas (phénomènes relatifs à la citerne de combustible liquide par exemple).

5.1 SYNTHÈSE DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX MODÉLISÉS

Le tableau page suivante constitue une synthèse des phénomènes dangereux retenus dans le cadre de ce guide et illustrés sur les nœuds papillon présentés au paragraphe 4.4.

Tableau 5: Synthèse des phénomènes dangereux modélisés

Système étudié	Sous-système	Événements redoutés centraux	Phénomènes dangereux	Remarques (modélisation)
Installations liées au combustible liquide	Bacs de stockage de combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de stockage de combustible liquide	StockCombLiq_PhD1: Feu de cuvette StockCombLiq_PhD2: Pressurisation lente de bac	Fonction du diamètre de la cuvette Fonction du volume du bac, pour plusieurs pressions de rupture
		ATEX dans le ciel gazeux du bac de combustible liquide	StockCombLiq_PhD3: Explosion du ciel gazeux du bac StockCombLiq_PhD4: Feu de bac StockCombLiq_PhD4a: Boilover classique (FL / biodiesel à définir) StockCombLiq_PhD4b: Boilover couche mince (FOD / biodiesel à définir)	Fonction du volume du bac Fonction du diamètre du bac Fonction du volume de liquide dans le bac et de la hauteur du bac
	Tuyauteries combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement de la tuyauterie de combustible liquide à l'extérieur / intérieur de la chaufferie	TuyCombLiq_PhD1: Feu de nappe	Fonction du diamètre du feu de nappe
Installations liées au combustible gazeux	Tuyauteries gaz	Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'extérieur de la chaufferie	TuyGaz_PhD1: Feu torche TuyGaz_PhD2: UVCE / flash fire	Fonction du diamètre de fuite, pour plusieurs pressions d'alimentation Rejet vertical pour tuyauterie enterrée ¹ Rejet horizontal pour tuyauterie aérienne ²
		Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'intérieur de la chaufferie	TuyGaz_PhD1: Feu torche TuyGaz_PhD3: VCE (explosion de la chaufferie)	Fonction du diamètre de fuite, pour plusieurs pressions d'alimentation Rejet vertical pour tuyauterie enterrée ¹ Rejet horizontal pour tuyauterie aérienne ² Fonction du volume de la chaufferie et des surfaces d'ouverture
Chaudières tubes d'eau (TE) / tubes de fumées (TF)	Brûleur / chambre de combustion	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant re-démarrage	Chaud_PhD1a/b: Explosion de la chambre de combustion	Fonction du volume de la chambre de combustion
	Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	Chaud_PhD2: BLEVE de la capacité d'eau	Fonction du volume de la capacité d'eau et de la pression de rupture

¹ Pour une tuyauterie enterrée, l'usage est de prendre un rejet vertical (sauf cas particulier). Cet usage est en accord avec les recommandations du guide GESIP EDD sur les canalisations de transport.

² Un rejet horizontal donne des effets plus importants. Pour une tuyauterie aérienne, sur laquelle il n'y a a priori aucune contrainte d'orientation de rejet, c'est donc le rejet horizontal qui est considéré (sauf cas particulier).

5.2 PRINCIPALES HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION

5.2.1 *Présentation des résultats*

Les résultats de modélisation consistent en des courbes paramétrées présentant les distances aux effets létaux significatifs, effets létaux, effets irréversibles et effets indirects, atteintes par les différents phénomènes dangereux identifiés dans le Tableau 5, et ce en fonction de plusieurs paramètres.

L'objet des paragraphes ci-dessous est de présenter les hypothèses générales de modélisation et paramètres utilisés pour la construction des abaques. Les hypothèses plus précises sur chaque scénario modélisé sont présentées en Annexe 5, ainsi que les abaques obtenus.

Pour faciliter la lisibilité et ainsi l'exploitation des résultats, les modélisations ont été effectuées pour des chaudières dont les puissances thermiques nominales sont comprises entre 1 et 50 MW_{th}.

Point de vigilance

Les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeur permettant d'avoir un regard critique sur des distances d'effets obtenues pour une installation donnée dans le cadre d'une EDD.

5.2.2 *Stockage de combustible liquide*

Des bacs cylindriques verticaux de 10 à 500 m³, de hauteur 1,5 fois le diamètre et remplis à 80% de leur volume, sont considérés dans les modélisations. Le rapport hauteur sur diamètre étant supérieur à 1, la pression de rupture retenue pour un scénario d'explosion de ciel gazeux est égale à 1 bar. De plus, pour ce phénomène, il est supposé que les bacs soient à toit fixe.

Si le bac est pris dans un incendie, la pression de rupture va diminuer. Les pressions de rupture de 100, 250 et 500 mbar ont été considérées pour modéliser le phénomène de pressurisation lente de bac.

Les bacs se trouvent dans des cuvettes de rétention circulaires.

5.2.3 *Tuyauteries de combustible*

Les cas traités dans les modélisations de perte de confinement des tuyauteries de combustible liquide ou gazeux couvrent les situations de rupture guillotine et de brèche sur la tuyauterie.

Les situations où les tuyauteries sont enterrées ou aériennes sont couvertes. Si le combustible est gazeux, cela est pris en compte au travers des directions du rejet (verticales ou horizontales) :

- Pour une tuyauterie enterrée, l'usage est de prendre un rejet vertical (sauf cas particulier). Cet usage est en accord avec les recommandations du guide GESIP EDD sur les canalisations de transport.

- Pour une tuyauterie aérienne, il n'y a *a priori* aucune contrainte sur la direction du rejet. Comme le rejet horizontal donne des effets plus importants, c'est celui-ci qui est considéré (sauf cas particulier).

Si le combustible est liquide, seul le phénomène de feu de nappe est retenu et il est applicable au cas où la tuyauterie est enterrée et au cas où elle est aérienne.

Pour le combustible liquide, les cas où la tuyauterie est à l'extérieur ou à l'intérieur de la chaufferie n'ont pas été distingués. Que l'on soit à l'extérieur ou à l'intérieur du local, le phénomène dangereux modélisé est un feu de nappe. La modélisation a été réalisée en considérant le cas le plus pénalisant, c'est-à-dire celui où la nappe s'étend sans limites et est enflammée de façon retardée. C'est dans ce cas que la nappe atteint sa taille la plus importante.

Dans le cas des tuyauteries de combustible liquide, le phénomène de feu torche a été exclu mais il peut arriver que le combustible liquide soit alimenté sous de fortes pressions et températures dans la chambre de combustion. Le cas échéant, le feu torche sur la tuyauterie de combustible liquide serait à étudier.

Dans le cas où le combustible mis en jeu est du gaz naturel, la distinction extérieur/intérieur de la chaufferie a été faite.

Les effets d'une explosion de gaz à l'extérieur de la chaufferie dépendent notamment de la pression de rejet du gaz et du diamètre de la fuite. Les pressions de gaz considérées sont les suivantes : 5 bars absolus (bara), 2 bara et 1,3 bara. Le diamètre de fuite a été déterminé directement à partir du diamètre de la tuyauterie de gaz. Ce diamètre de tuyauterie a été évalué en se basant sur la consommation de gaz nécessaire au fonctionnement de la chaudière (qui est directement liée à la puissance de la chaudière). Un débit volumique requis est ainsi déterminé, qui, associé à une vitesse minimale de gaz dans la tuyauterie pour une perte de charge acceptable, donne une section de tuyauterie minimale. Des diamètres de tuyauterie de 25 à 400 mm ont été étudiés.

L'hypothèse que le jet ne rencontre ni parois ni zones encombrées a été formulée. Dans le cas où le jet est impactant ou si une zone encombrée est atteinte, un calcul spécifique est nécessaire.

Les hypothèses formulées dans le cas d'une explosion de gaz à l'intérieur de la chaufferie sont présentées dans le paragraphe ci-après.

5.2.4 Explosion de gaz dans la chaufferie

Pour les gammes de puissance évoquées dans le paragraphe ci-dessus, les volumes de chaufferie peuvent être très variables, de plusieurs centaines à plusieurs milliers de m³. La gamme de volumes de chaufferie couverts dans les modélisations s'étend de 1000 à 25000 m³.

Deux types de matériaux de construction de chaufferie ont été considérés : le béton et le bardage.

Il a dans un premier temps été considéré que toutes les parois du bâtiment cédaient instantanément lors de la montée en pression dans le bâtiment, rendant l'influence des surfaces soufflables négligeable.

Dans un deuxième temps, l'influence des surfaces éventables a été étudiée en prenant l'exemple d'un bâtiment en béton de dimensions moyennes (bâtiment de 5000 m³) dans lequel est envisagée la fuite moyenne, et sur lequel est installée une paroi éventable dont la surface varie de 50 à 500 m² (500 m² correspondant environ à la surface du toit). La ventilation constitue en effet un paramètre clé pour déterminer les effets de l'explosion de la chaufferie due à une fuite de gaz dans le local. Le Document Technique Unifié (DTU) n°65.4 « Prescriptions techniques relatives aux chaufferies aux gaz et aux hydrocarbures liquéfiés » (Novembre 1997) fournit des règles de dimensionnement des sections de ventilation en parties haute et basse, selon la puissance de la chaudière.

Les distances d'effets dues à l'explosion du bâtiment sont calculées à l'aide de la méthode multi-énergie, qui fait appel aux critères suivants :

- Type de gaz combustible en mélange avec l'air ;
- Volume du mélange inflammable ;
- Encombrement de la zone où se propage le mélange inflammable.

Volume du mélange inflammable

Dans ce guide, plusieurs types de fuites de gaz ont été étudiés : petite, moyenne et grande fuite, chacune emplissant le local de façon à ce que le mélange air/gaz soit dans des proportions stœchiométriques. Les régimes de gaz correspondants ont ainsi des niveaux de turbulence plus ou moins importants.

Le volume de mélange inflammable retenu dans le guide est celui du local chaufferie. Il est à noter que la géométrie réelle de la chaufferie serait à considérer dans l'estimation de ce volume de mélange inflammable. Le volume occupé par les différents équipements présents au sein de la chaufferie serait à retrancher au volume total de la chaufferie pour estimer le volume du mélange inflammable.

Encombrement de la zone

Une flamme se propageant dans un mélange gazeux réactif accélère si le volume occupé par les gaz est caractérisé par la présence répétée d'obstacles et d'espaces partiellement confinés. En l'absence d'obstacles et d'espaces confinés, l'inflammation des mélanges gazeux peut conduire à des surpressions de faible amplitude.

L'hypothèse de confinement est reflétée par l'indice de violence de la méthode multi-energy (allant de 1 à 10). Le Yellow Book du TNO présente les conclusions suivantes suite aux essais d'explosion pour le gaz naturel :

Tableau 6: Encombrement et indice de violence de la méthode Multi-Energy (Yellow Book, 2005, TNO)

Caractérisation de l'encombrement	Degré de violence (indice de la méthode-multi energy)	Surpression maximum (mbar)
Moyen	3 à 4	65
Important	5 à 6	210
Très dense	6 à 7	500 à 870

Ce guide considère un indice 10 pour les modélisations, ce qui est majorant. Une réévaluation de cet indice serait à réaliser au cas par cas. Il est par exemple possible d'identifier plusieurs zones de confinement au sein de la chaufferie, chacune étant caractérisée par un volume de mélange inflammable et un indice de violence.

Un exemple des effets d'explosion secondaire à l'extérieur de la chaufferie est présenté en Annexe 5. Ce phénomène, pouvant faire suite à une explosion primaire dans le local, est dû à la combustion des gaz imbrûlés propulsés hors de la chaufferie par l'explosion primaire.

5.2.5 *Caractéristiques des chaudières*

Pour rappel, les modélisations ont été effectuées pour des chaudières dont les puissances thermiques nominales sont comprises entre 1 et 50 MW_{th}.

Au vu de ces intervalles de puissances, les volumes de chambre de combustion considérés pour une chaudière à tubes d'eau vont de 10 à 150 m³. Dans le cas d'une chaudière à tubes de fumées, la chambre de combustion consiste en un tube foyer dont il a été considéré que le volume pouvait varier entre 5 et 40 m³. La pression de rupture de chambre de combustion d'une chaudière à tubes d'eau ne dépasse pas 1 bar. Dans le cas d'une chaudière à tubes de fumées, le tube foyer résiste à la pression mais les extrémités de ce tube constituent des parties faibles. La pression s'échapperait donc côté brûleur et boîtes arrières sur les côtés de la chaudière. La pression de rupture de chambre de combustion d'une chaudière à tubes de fumées peut être prise à 1 bar.

Les volumes d'eau liquide contenus dans les capacités (ballon d'eau pour tubes d'eau, calandre de la chaudière pour tubes de fumée) varient de 5 à 250 m³. Les pressions de rupture de ces capacités sont comprises entre 10 et 30 bars.

5.2.6 *BLEVE de capacités d'eau*

Les calculs de BLEVE ont été réalisés à l'aide de l'outil PROJEX, dont la méthode est présentée dans le document Oméga 15 de l'INERIS. Les modèles de cet outil sont en train d'être affinés pour représenter, en plus des effets engendrés par la rupture hydraulique, les effets engendrés par le flash vapeur (expansion volumique).

Les distances présentées en Annexe 5 sont donc à considérer avec grande prudence puisqu'elles ne sont pas représentatives de la réalité physique du phénomène.

5.3 DONNÉES DE BASE GÉNÉRALES POUR LES MODÉLISATIONS

5.3.1 Seuils d'effets sur l'homme

Les effets des phénomènes dangereux sont des effets de surpression ou des effets thermiques. L'intensité de ces phénomènes dangereux est caractérisée par des distances à des seuils réglementaires définis pour les hommes, conformément aux instructions de l'arrêté du 29 septembre 2005 récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7 : Valeurs seuils des effets sur l'homme des phénomènes dangereux

	Seuils des effets de surpression	Seuils des effets thermiques	
	mbar	kW/m ²	(kW/m ²) ^{4/3} s
SER : Effets indirects (bris de vitre)	20 ⁽¹⁾	-	-
SEI : Dangers significatifs ou effets irréversibles	50	3	600
SEL : Dangers graves ou effets létaux	140	5	1000
SELS : Dangers très graves ou effets létaux significatifs	200	8	1800

(1) : Compte tenu des dispersions de modélisation pour les faibles surpressions, il peut être adopté pour la surpression de 20 mbar une distance d'effets égale à deux fois la distance d'effets obtenue pour une surpression de 50 mbar.

5.3.2 Conditions météorologiques

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 (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 » indique que « les conditions (D,5) et (F,3) sont généralement retenues pour des rejets au niveau du sol ».

La première de ces conditions permet de représenter une situation courante (condition neutre et vitesse de vent de 5 m/s), la seconde permettant une évaluation des conséquences dans des conditions atmosphériques défavorables (conditions très stables et vitesse de 3 m/s) pour des rejets au niveau du sol.

Pour les rejets en hauteur, s'ajoutent à ces conditions météorologiques, les conditions (A,3), (B,3), (B,5), (C,5), (C,10), (D,10) et (E,3).

Tableau 8: Conditions météorologiques génériques

Stabilité atm.	-	A	B	B	C	C	D	D	E	F
Vitesse du vent	(m/s)	3	3	5	5	10	5	10	3	3
T° ambiante	(°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	15
T° du sol	(°C)	20	20	20	20	20	20	20	20	15
Humidité relative	(%)	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Ray. solaire	(kW/m ²)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0

5.3.3 Environnement

Les rejets sont considérés en champ libre, le paramètre de rugosité choisi correspond à un site industriel.

6. ELÉMENTS POUR LA CARACTÉRISATION DES PROBABILITÉS D'OCCURRENCE DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

Ce chapitre explicite la méthode utilisée pour évaluer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et des accidents identifiés dans les chapitres précédents.

6.1 INTRODUCTION

Dans le cadre d'une EDD, les phénomènes dangereux et accidents sont quantifiés en classe de probabilité conformément à l'Annexe 1 (relative aux échelles de probabilité) de l'arrêté PCIG du 29 septembre 2005. Ces classes sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 9: Classes de probabilité (Annexe 1 de l'Arrêté du 29 septembre 2005)

Echelle de probabilité	E	D	C	B	A
Qualitative (si le REX est suffisant)	« événement possible mais non rencontré au niveau mondial » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles	« événement très improbable » : s'est déjà produit mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement la probabilité de ce scénario	« événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le 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	« événement probable sur site » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie des installations	« événement courant » : se produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie des installations, malgré d'éventuelles mesures correctives
Semi-quantitative	Cette échelle est intermédiaire entre les échelles qualitative et quantitative, et permet de tenir compte de la cotation des mesures de maîtrise des risques mises en place				
Quantitative (par unité et par an)		10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²

L'estimation semi-quantitative de la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux se décompose en trois étapes principales :

- Étape 1 : Choix d'une méthode d'estimation de la probabilité ;
- Étape 2 : Collecte des données d'entrées nécessaires à l'estimation ;
- Étape 3 : Agrégation des données le long du nœud papillon et affectation d'une classe de probabilité d'occurrence pour l'accident potentiel ou le phénomène dangereux conformément à l'échelle présentée ci-dessus.

6.2 ÉTAPE 1 : CHOIX D'UNE MÉTHODE D'ESTIMATION DE LA PROBABILITÉ

La probabilité d'occurrence d'un accident peut être estimée par plusieurs méthodes.

La première méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux à partir des événements initiateurs (EI) en utilisant des bases de données publiques ou bien des données de retour d'expérience de l'exploitant. C'est l'approche la plus complète qui permet, pour une installation particulière, de prendre en compte des éléments spécifiques dans l'estimation de la probabilité.

Mais cette approche est également la plus longue et elle peut être source d'estimation erronée. En effet, les fréquences retenues pour chaque événement initiateur ainsi que les probabilités de défaillance des barrières de sécurité peuvent être estimées de façon pénalisante. De plus, dans le cas où des données de retour d'expérience sont utilisées, celles-ci peuvent être de moindre qualité.

La deuxième méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir des ERC. C'est une approche simplifiée et plus rapide. Elle est applicable par exemple lorsque l'installation est répandue dans l'industrie dans des configurations similaires. Basée sur un retour d'expérience, elle permet a priori de bien apprécier la fréquence d'occurrence d'un ERC. Il est important de préciser que les fréquences affichées dans la littérature prennent en compte la présence de barrières de sécurité génériques que l'exploitant se doit d'identifier. L'utilisation de ces fréquences sous-entend que l'exploitant a évalué de façon qualitative le niveau de performance des barrières de sécurité concernées et s'est assuré de leur suivi (notamment au travers d'une politique de tests et de maintenance).

Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte la spécificité d'une installation (par exemple, présence de barrières supplémentaires ou façon d'opérer différente) et n'intègre pas les évolutions potentielles dans le temps (vieillesse des installations par exemple).

Une autre méthode consiste à évaluer la probabilité d'occurrence à partir du phénomène dangereux. Cette approche peut uniquement être utilisée lorsque les installations sont considérées comme identiques et que les données disponibles sont jugées fiables. C'est le cas notamment pour les dépôts de liquides inflammables (DLI). On retrouve globalement les mêmes avantages et mêmes critiques que pour la méthode précédente.

Dans le cadre de ce guide, des données concernant certains événements initiateurs, événements redoutés centraux et phénomènes dangereux sont fournies (voir Annexe 6). Elles proviennent de bases de données adaptées. L'exploitant est laissé libre de les utiliser ou de valoriser des éléments spécifiques à son installation.

Remarque :

Pour quantifier la probabilité des événements initiateurs ayant souvent des fréquences d'occurrence annuelles importantes, une échelle de classe de fréquences est proposée ci-après.

Tableau 10: Classes de fréquence

Classes de probabilité	<u>E</u>	D	C	B	A	-	-
Classes de fréquence	≤ F5	F4	F3	F2	F1	F0	F-1
Fréquence / an	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	

6.3 ÉTAPE 2 : COLLECTE DES DONNÉES D'ENTRÉES NÉCESSAIRES À L'ESTIMATION

6.3.1 Introduction

Les données d'entrée nécessaires à l'estimation de la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux sont :

- Les fréquences ou classes de fréquence d'occurrence annuelle des EI ou des ERC (par exemple : nombre de fois dans l'année où la vanne en aval s'est bloquée, le nombre d'erreurs lors des opérations de dépotage, la fréquence d'occurrence annuelle de fuite sur une tuyauterie, etc.) : voir paragraphe 6.3.2.
- Niveau de confiance des barrières de sécurité, qui reflète un facteur de réduction des risques, soit directement exprimé en une valeur soit reflété par une probabilité de défaillance à la sollicitation : voir paragraphe 6.3.3.
- Probabilité d'occurrence conditionnelle des événements secondaires (par exemple : la probabilité de présence d'une source d'inflammation d'énergie suffisante, sachant qu'il y a formation d'une atmosphère explosive) : voir paragraphe 6.3.4.

6.3.2 Fréquences des EI / ERC / PhD

Ces données d'entrée peuvent être évaluées de plusieurs manières. Si elles sont disponibles et adaptées au cas d'étude, des données de retour d'expérience peuvent être utilisées (non couvert dans le cadre de ce guide). Dans le cas contraire, des données provenant de bases de données publiques devront être employées.

L'Annexe 6 de ce guide fournit des données concernant certains événements initiateurs, événements redoutés centraux et phénomènes dangereux pour les équipements suivants :

- Capacités sous pression ;
- Échangeurs tubulaires ;
Note : Les bases de données publiques ne faisant pas spécifiquement référence aux équipements types chaudières, celles-ci peuvent être assimilées à ce type d'équipements.
- Citernes routières et ferroviaires ;
- Réservoirs atmosphériques ;
- Tuyauteries ;
- Pompes ;

- Vannes, joints et brides ;
- Flexibles ;
- Soupapes ;
- Autres.

Les bases de données exploitées sont listées en références de ce document et rappelées en Annexe 6.

Certaines données sont exprimées par mètre de tuyauterie par an, par opération ou par heure de dépotage. Elles doivent donc être complétées par des informations du site (longueur de la tuyauterie, nombre d'heures de dépotage par an, etc.) afin d'obtenir la fréquence annuelle de l'événement étudié.

Un exemple d'exploitation des données fournies en Annexe 6 est présenté au paragraphe 6.5.

6.3.3 Niveau de confiance des barrières de sécurité

Les éléments pour estimer le niveau de confiance des barrières de sécurité sont introduits au paragraphe 4.3.2. Ils sont déclinés pour certaines barrières de sécurité identifiées sur les scénarios d'accidents dans l'Annexe 4.

L'exploitant devra compléter l'évaluation de la performance des barrières de sécurité pour en déterminer un niveau de confiance, en s'appuyant sur les référentiels Oméga 10 et Oméga 20 de l'INERIS.

6.3.4 Éléments sur la probabilité d'inflammation

Il existe différentes méthodologies d'évaluation des probabilités d'inflammation, présentées en détail dans le document du CCPS « Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass », daté de juillet 2014. Le rapport d'étude INERIS n°DRA-13-133211-12545A « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation » du 22/06/2015 présente une approche d'évaluation semi-quantitative des probabilités d'inflammation et des fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux de type explosion en fonction de la substance et du type de zone rencontrée.

Des mesures telles que la prévention contre la foudre, les mises à la terre, la présence d'un arrête-flamme, une procédure de travaux par points chauds, etc. permettent de réduire la fréquence d'apparition des sources d'inflammation dans l'ATEX susceptible de se former.

6.4 ÉTAPE 3 : AGRÉGATION DES DONNÉES LE LONG DU NŒUD PAPILLON ET AFFECTATION D'UNE CLASSE DE PROBABILITÉ D'OCCURRENCE

Les règles d'agrégation des fréquences le long du nœud papillon et d'attribution d'une classe de probabilité d'occurrence annuelle des phénomènes dangereux sont traitées en détail dans le rapport Oméga Probabilités de l'INERIS « Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées », daté du 20/10/2015.

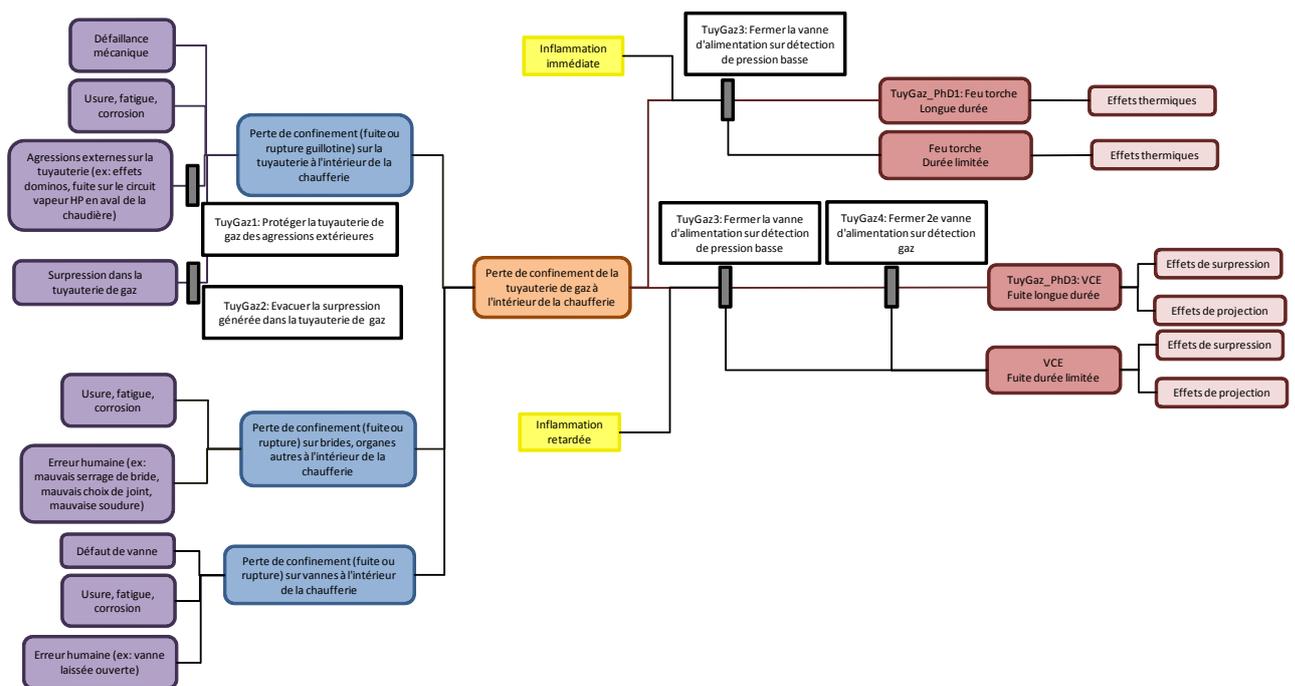
6.5 CAS D'ÉTUDE

6.5.1 Perte de confinement de la tuyauterie de gaz dans la chaufferie

Le cas d'étude présenté ici a pour but d'illustrer la manière dont les données présentées en Annexe 6 peuvent être utilisées pour quantifier la probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux. Il n'a pas vocation à présenter la démarche de quantification dans son ensemble. Ceci est l'objet du rapport Oméga Probabilités de l'INERIS « Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées » daté du 20/10/2015.

Le scénario étudié est celui d'une perte de confinement (fuite et rupture guillotine) de la tuyauterie de gaz dans la chaufferie. L'évaluation de la probabilité d'occurrence est réalisée à partir de l'ERC, une tuyauterie de gaz étant une installation répandue dans l'industrie dans des configurations similaires.

Le nœud papillon du scénario de perte de confinement de la tuyauterie de gaz dans la chaufferie est rappelé ci-dessous.



Les données d'entrée nécessaires à l'estimation de la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux sont :

- Les classes de fréquence d'occurrence annuelle de l'ERC, à savoir ici la perte de confinement (fuite et rupture guillotine) de la tuyauterie de gaz à l'intérieur de la chaufferie ;
- Le niveau de confiance des barrières de sécurité en protection, qui reflète un facteur de réduction des risques ;
- Les probabilités d'inflammation immédiate et retardée.

Ces données sont extraites respectivement de bases de données publiques (voir Annexe 6), des référentiels Oméga 10 de l'INERIS pour les barrières techniques de sécurité et Oméga 20 pour les barrières humaines de sécurité et de guides d'évaluation des probabilités d'inflammation reconnus (voir paragraphe 6.3).

Ce cas d'étude ne traite que de l'utilisation des données de l'Annexe 6 pour estimer la classe de fréquence d'occurrence annuelle de l'ERC.

Dans le cas du scénario de perte de confinement de la tuyauterie de gaz dans la chaufferie, les événements de « fuite » et de « rupture guillotine » sont à évaluer et à agréger.

Les bases de données usuelles fournissent des valeurs de perte de confinement de tuyauteries selon le diamètre nominal de celles-ci et la taille de la brèche (depuis la « petite » brèche jusqu'à la rupture guillotine). Les fréquences sont généralement exprimées par mètre et par an. Dans le cadre de cet exemple, les données fournies par le BEVI sont utilisées. Il est rappelé que les valeurs fournies par le BEVI incluent les fréquences de défaillance au niveau des organes de la tuyauterie (brides, joints, vannes, etc.).

On considère une tuyauterie de gaz dont 10 mètres se trouvent à l'intérieur de la chaufferie en DN 150 mm.

Fuite :

Dans le BEVI, la fréquence de brèche 10% du DN (soit 15 mm) pour une tuyauterie de DN compris entre 75 et 150 mm est estimée à $2 \cdot 10^{-6}$ par mètre par an.

Ainsi, pour la tuyauterie de gaz étudiée ici, la fréquence de fuite est estimée à $2 \cdot 10^{-6} \times 10 = 2 \cdot 10^{-5}$ / an.

Rupture guillotine :

Dans le BEVI, la fréquence de rupture guillotine pour une tuyauterie de DN compris entre 75 et 150 mm est estimée à $3 \cdot 10^{-7}$ par mètre par an.

Ainsi, pour la tuyauterie de gaz étudiée ici, la fréquence de rupture guillotine est estimée à $3 \cdot 10^{-7} \times 10 = 3 \cdot 10^{-6}$ / an.

Conclusion :

La fréquence d'occurrence annuelle de l'événement « perte de confinement (fuite et rupture guillotine) de la tuyauterie de gaz dans la chaufferie » est estimée à $2 \cdot 10^{-5} + 3 \cdot 10^{-6} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ / an.

Soit une classe de fréquence F4 d'après l'échelle présentée au paragraphe 6.2.

6.5.2 Autres scénarios

Les scénarios suivants pourront être traités d'une façon différente de celle présentée ci-dessus (cotation autrement que par les événements initiateurs ou par l'événement redouté central) :

- Feu de cuvette (stockage de combustible liquide)

Le Guide de maîtrise des risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables (GTDLI)¹¹ - Octobre 2008 fournit à titre indicatif une valeur de probabilité d'occurrence d'un feu de cuvette.

- Explosion du ciel gazeux du bac de combustible liquide

Le GTDLI fournit à titre indicatif une valeur de probabilité d'occurrence d'une explosion de bac (à toit fixe). L'exploitant pourra repartir des EI ou ERC pour la cotation de ce phénomène s'il veut valoriser des éléments spécifiques au site étudié.

- Pressurisation lente du bac de combustible liquide

Au vu de la phénoménologie de la pressurisation lente de bac, il est proposé de partir de la valeur de probabilité d'occurrence du feu de cuvette fournie dans le GTDLI et d'y associer la barrière de sécurité liée à la lutte contre l'incendie (moyens fixes). Une telle barrière peut se voir attribuer un niveau de confiance générique de 1.

- Boilover du bac de combustible liquide

Le GTDLI fournit à titre indicatif une valeur de probabilité d'occurrence d'un boilover de bac de bruts.

- Explosion de la chambre de combustion

Les données relatives à certains EI ne sont pas présentées dans les bases de données génériques couvertes par l'Annexe 6. L'exploitant pourra utiliser des données issues du retour d'expérience pour évaluer les fréquences de ces EI¹².

- Éclatement de la calandre (TF) / du surchauffeur (TE)

Les données relatives aux EI ne sont pas présentées dans les bases de données génériques couvertes par l'Annexe 6. L'exploitant pourra utiliser des données issues du retour d'expérience pour évaluer ces fréquences.

¹¹ GTDLI - Guide de maîtrise des risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables - Octobre 2008

¹² Voir rapport INERIS DRA-15-149432-05862A « Méthode d'évaluation des fréquences et des probabilités à partir des données de retour d'expérience » du 01/07/2015.

7. CARACTÉRISATION DE LA CINÉTIQUE DES ÉVÈNEMENTS

L'ensemble des phénomènes dangereux et accidents retenus dans le présent guide sont à cinétique rapide, à l'exception du boil-over classique qui peut être proposé en cinétique lente, sous réserve d'une démonstration dans l'EDD. Cette dernière doit porter sur la possibilité pour le Service Départemental d'Incendie et de Secours d'évacuer les personnes situées dans les zones d'effets du boil-over dans un délai inférieur au temps d'apparition du boil-over.

8. EFFETS DOMINOS

Dans le cadre de l'étude de dangers, les phénomènes dangereux issus de l'installation de chaufferie ou bien impactant l'installation de chaufferie doivent être pris en considération en tant que potentiels événements initiateurs d'un phénomène dangereux pouvant avoir lieu respectivement sur une autre installation dangereuse ou sur l'installation de chaufferie. Si elles sont disponibles, les probabilités d'occurrence de ces phénomènes extérieurs sont alors à intégrer au calcul de la probabilité du phénomène dangereux étudié.

L'exploitant doit ainsi déterminer :

- Si des effets de phénomènes dangereux générés par l'installation de chaufferie (effets thermiques, de surpression, projectiles, etc.) peuvent atteindre d'autres installations potentiellement dangereuses ;
- Si l'installation de chaufferie peut être atteinte par des effets d'un accident ayant lieu sur une autre partie du site ou à l'extérieur.

Plus de précisions sur la prise en compte des effets dominos dans les études de dangers sont données dans la circulaire du 10 mai 2010.

9. RÉFÉRENCES

Rapports et ouvrages

Rapport d'étude INERIS N° DRA-09-102957-01582B – Référentiels, normes et guides de bonnes pratiques pour l'exploitation des chaudières industrielles au gaz – 09/08/2010

Rapport d'étude INERIS N°DRA CPr/CPr – 00-22751/effexc.doc – Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement : EFFEX, un outil de simulation – 2000

Dossier Techniques de l'Ingénieur – Différents types de chaudières industrielles – 10/02/1990

INERIS, Rapport Oméga-2 : Feux de nappe

INERIS, Rapport Oméga-9 : Étude de dangers d'une installation classée

INERIS, Rapport Oméga-13 : Boil-over classique et boil-over couche mince

INERIS, Rapport Oméga-15 : Les éclatements de capacités, phénoménologie et modélisation des effets

INERIS, Rapport Oméga Probabilités : Agrégation semi-quantitative des probabilités dans les études de dangers des installations classées

Drysdale, An introduction to fire dynamics. – New-York: Wiley, 1999.

Sites internet

Fonctionnement des chaudières :

http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_chaudiere.html

http://www.babcock-wanson.fr/produits_chaudieres_vapeur_tdfprinc.aspx

<http://www.clayton.fr/home.htm>

<http://www.la-chaudiere-industrielle.fr/files/files/chaudieres-vapeur.pdf>

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Chaudi%C3%A8re>

<http://direns.mines-paristech.fr/Sites/Thopt/fr/co/chaudieres.html>

http://www.quebecochimie.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89:chaudieres-a-vapeur-un-peu-dhistoire&catid=36:nouvelles

<http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gaz-naturel-quels-dangers>

Traitement des fumées :

<http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-primaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>

<http://www.citepa.org/fr/pollution-et-climat/techniques-de-reduction/mesures-secondaires-de-reduction-des-emissions-de-nox>

http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Appareils_combustion_cle7813e6.pdf

<http://atee.fr/energie-plus-magazine/reduction-des-nox-traitement-primaire-adapter-la-combustion>

http://www.ofme.org/bois-energie/documents/Projet/20120101_ADEME_Guide_bonnes_pratiques_maintenance.pdf

Traitement de l'eau :

http://fr-eu.nalco.com/eu/applications/boiler-water-treatment.htm#Internal_Treatment

<http://www.lenntech.fr/applications/process/chaudiere/chaudiere/eau-alimentation-chaudiere.htm>

http://www.babcock-wanson.fr/produits_eau_traitement.aspx

<http://www.eauxindustrielles.fr/traitement-des-eaux-de-chaudieres-industrielles.html>

<http://www.grtgaz.com/fileadmin/clients/agenda/documents/fr/5-GRTgaz-pistes-economies-chaufferie-industrielle.pdf>

<http://www.ms-protech.com/fr/cms/programme-de-traitement-des-eaux-de-chaudieres>

<http://www.sart-von-rohr.fr/pdf/dtec.pdf>

Directive IED :

<http://www.ineris.fr/ipcc/>

Bases de données

Base ARIA du BARPI

FRED - Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments - Juin 2012

Handboek Faalfrequenties - Appendix to Handbook failure frequencies - 2009

Reference manual BEVI risk assessment - Janvier 2009

Reldat - Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant - Septembre 2006

ICSI - Résumé des travaux du groupe de travail « fréquence des événements initiateurs d'accidents et disponibilité des barrières de protection et de prévention » - juillet 2006

GTDLI - Guide de maîtrise des risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables - Octobre 2008

OGP - International association of Oil & Gas Producers - Storage incident frequencies - Mars 2010

SINTEF - OREDA (Offshore Reliability Database)

Textes réglementaires

Arrêté du 29/09/2005 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

Circulaire DPPR/SEI2/FA-07-0066 du 04/05/07 relatif au porter à la connaissance "risques technologiques" et maîtrise de l'urbanisation autour des installations classées

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 (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003

Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion) ;

Arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931.

10. LISTE DES ANNEXES

Annexe	Désignation précise	Nb de pages
1	Description des chaufferies industrielles	14
2	Accidentologie des installations de chaufferie : exemples d'accidents caractéristiques	9
3	Extrait de la norme NF EN 32-020-1 : Mode d'exploitation des chaufferies : Prescriptions générales de sécurité	6
4	Éléments pour l'évaluation de la performance des barrières de sécurité	26
5	Caractérisation de l'intensité	27
6	Éléments de probabilité	10

ANNEXE 1 – DESCRIPTION DES CHAUFFERIES INDUSTRIELLES	1
1. Introduction.....	1
2. Principe d'une chaudière à vapeur	1
3. Chaudières à tubes de fumées / tubes d'eau	2
3.1 Chaudières à tubes de fumées	2
3.2 Chaudières à tubes d'eau	4
3.3 Quelques caractéristiques importantes.....	5
4. Caractéristiques des autres équipements	5
4.1 Dépotage et stockage du combustible liquide.....	5
4.2 Traitement des eaux de la chaudière.....	5
4.2.1 Traitement externe	6
4.2.2 Traitement interne	7
4.3 Traitement des fumées	7
4.3.1 Traitement des NOx	8
4.3.2 Traitement des SOx.....	10
4.3.3 Dépoussiérage	12
ANNEXE 2 – ACCIDENTOLOGIE DES INSTALLATIONS DE CHAUFFERIE	1
ANNEXE 3 – MODE D'EXPLOITATION DES CHAUFFERIES : PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES DE SÉCURITÉ.....	1
(NORME NF EN 32-020-1).....	1
ANNEXE 4 – ÉLÉMENTS POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ	1
1. Introduction.....	1
2. Exigences réglementaires	1
3. Méthodes d'évaluation des barrières de sécurité	2
4. Tableaux de synthèse d'évaluation des barrières de sécurité	3
4.1 Modèles utilisés	3
4.1.1 Barrière humaine	3
4.1.2 Dispositif technique passif	4
4.1.3 Dispositif technique actif / Système Instrumenté de Sécurité (SIS)	5
4.2 Dépotage de combustible liquide	6
4.3 Stockage de combustible liquide.....	7
4.4 Transfert de combustible liquide	10
4.5 Tuyauteries de gaz	12

4.6	Stockage et transfert de propane.....	15
4.7	Fonctionnement de la chaudière.....	16
4.7.1	Prescriptions générales.....	16
4.7.2	Barrières identifiées sur les nœuds papillon.....	17
ANNEXE 5 – CARACTÉRISATION DE L'INTENSITÉ		1
1.	Rappel des phénomènes dangereux modélisés.....	1
2.	Stockage de combustible liquide.....	2
2.1	StockCombLiq_PhD1 : Feu de cuvette.....	2
2.2	StockCombLiq_PhD2 : Pressurisation lente de bac.....	2
2.3	StockCombLiq_PhD3 : Explosion du ciel gazeux du bac.....	4
2.3.1	Scénarios envisagés.....	4
2.3.2	Données d'entrée.....	4
2.3.3	Résultats.....	4
2.4	StockCombLiq_PhD4 : Feu de bac.....	5
2.5	StockCombLiq_PhD4a : Boilover classique.....	6
2.6	StockCombLiq_PhD4b: Boilover couche mince.....	7
3.	Transfert de combustible liquide.....	7
3.1	TuyCombLiq_PhD1 : Feu de nappe.....	7
4.	Transfert de gaz.....	9
4.1	TuyGaz_PhD1 : Feu torche.....	9
4.1.1	Rejet horizontal.....	9
4.1.2	Rejet vertical.....	11
4.2	TuyGaz_PhD2 : UVCE / flash fire.....	12
4.2.1	Scénarios envisagés.....	12
4.2.2	Données d'entrée.....	13
4.2.3	Surpressions.....	13
4.2.4	Distances d'effets thermiques dus au flash fire.....	16
4.3	TuyGaz_PhD3 : Explosion de la chaufferie.....	17
4.3.1	Scénarios envisagés.....	17
4.3.2	Données d'entrée.....	18
4.3.3	Résultats.....	19
4.3.4	Explosion secondaire.....	22
4.3.5	Influence de la surface éventable.....	22
5.	Fonctionnement de la chaudière.....	24
5.1	Chaud_PhD1a : Explosion de la chambre de combustion (TE).....	24

5.2	Chaud_PhD1b : Explosion de la chambre de combustion (TF)	25
5.3	Chaud_PhD2 : BLEVE de la capacité d'eau	26
5.3.1	Données d'entrée	26
5.3.2	Résultats.....	26
ANNEXE 6 – ELÉMENTS DE PROBABILITÉ		1
1.	Introduction.....	1
2.	Capacités sous pression	2
3.	Echangeurs tubulaires.....	3
4.	Citernes routières et ferroviaires	4
5.	Réservoirs atmosphériques.....	4
6.	Tuyauteries.....	5
7.	Pompes	6
8.	Vannes	7
9.	Jointes et brides	7
10.	Flexibles	8
11.	Soupapes	9
12.	Autres.....	10

ANNEXE 1 – DESCRIPTION DES CHAUFFERIES INDUSTRIELLES

1. INTRODUCTION

La production et le transport de chaleur est un élément important du fonctionnement de nombreux procédés industriels.

La combustion est souvent le moyen le plus économique pour générer de la chaleur. Elle peut être réalisée avec des combustibles divers solides, liquides ou gazeux, en utilisant de l'air en convection naturelle ou forcée, ou plus rarement de l'oxygène. Cette combustion peut être réalisée dans différents types d'appareils tels une chaudière à eau chaude (type chaudière gaz de maison individuelle), une chaudière à vapeur (distribution de cette vapeur vers les utilisateurs par réseaux de tuyauteries), ou des fours permettant de chauffer directement le produit concerné (alimentation d'un réacteur par exemple, charge d'une colonne...).

Une des méthodes les plus employées dans l'industrie pour transporter la chaleur jusqu'au lieu de consommation consiste à la transporter au moyen de vapeur d'eau, via des réseaux vapeur. On appelle cette pratique « transport par chaleur latente ». Elle consiste à produire de la **vapeur d'eau saturée** sous pression dans une ou plusieurs chaudières. Cette vapeur est amenée par des tuyauteries calorifugées sur le lieu de consommation. Elle est alors condensée dans des échangeurs, opération au cours de laquelle elle restitue sa chaleur latente de vaporisation (ainsi qu'un peu de chaleur sensible). Pour s'adapter aux différents niveaux de températures requis en différents points du procédé, une usine possède généralement plusieurs réseaux de vapeur à des pressions différentes, permettant un étalement des températures de condensation sur toute la gamme de température requise.

Une chaudière à vapeur peut également produire de la **vapeur d'eau surchauffée**, qui sert principalement à être turbinée dans le but d'entraîner un alternateur et produire de l'électricité.

L'objet de cette annexe est de décrire le principe de fonctionnement des chaudières produisant la vapeur d'eau utilisée pour transporter la chaleur nécessaire au bon fonctionnement des procédés. L'annexe fournit également des informations sur les équipements constituant les installations. Dans la suite, on appelle chaufferie le local dans lequel se situe la chaudière ou, si la chaudière est à l'extérieur, la zone dans laquelle elle se situe.

Les informations sont issues de différents documents et d'échanges avec la société Stein Energy Manufacturing.

2. PRINCIPE D'UNE CHAUDIÈRE À VAPEUR

Une chaudière est un système qui utilise un combustible pour apporter de l'énergie à un fluide caloporteur et fournir ainsi un fluide avec des caractéristiques imposées par l'utilisation qui en sera faite.

L'Article R 224-20 du code de l'environnement définit une chaudière comme étant « l'ensemble corps de chaudière et brûleur s'il existe, produisant de l'eau chaude, de la vapeur d'eau, de l'eau surchauffée, ou modifiant la température d'un fluide thermique grâce à la chaleur libérée par la combustion ».

Dans le cas des chaudières à vapeur, le fluide caloporteur est de l'eau. Ce type de chaudière se compose de deux compartiments distincts : un dans lequel brûle le combustible (brûleur) et un autre dans lequel l'eau est chauffée.

Le guide couvre deux types de chaudière à vapeur, dénommées d'après le fluide qui circule à l'intérieur des tubes :

- Les chaudières à tubes de fumées, parcourus intérieurement par les gaz de combustion ;
- Les chaudières à tubes d'eau, parcourus intérieurement par l'eau et l'émulsion eau-vapeur.

Il existe une multitude de combustibles possibles pour alimenter une chaudière, chacun présentant avantages et inconvénients en termes d'émissions et de rendement principalement. On peut citer à titre d'exemple le charbon, le fioul (lourd ou domestique), le biodiesel, le gaz naturel, la biomasse.

Dans certains cas, du propane peut être utilisé lors des phases de (re)démarrage des chaudières. Il s'agit alors du combustible d'alimentation des allumeurs des brûleurs. En général, le propane est stocké sous forme liquéfiée sous pression dans des bouteilles entreposées dans un local dédié.

Quelle que soit la technologie étudiée (tubes d'eau ou tubes de fumées), le principe de fonctionnement d'une chaudière à vapeur peut être schématisé de la manière suivante :

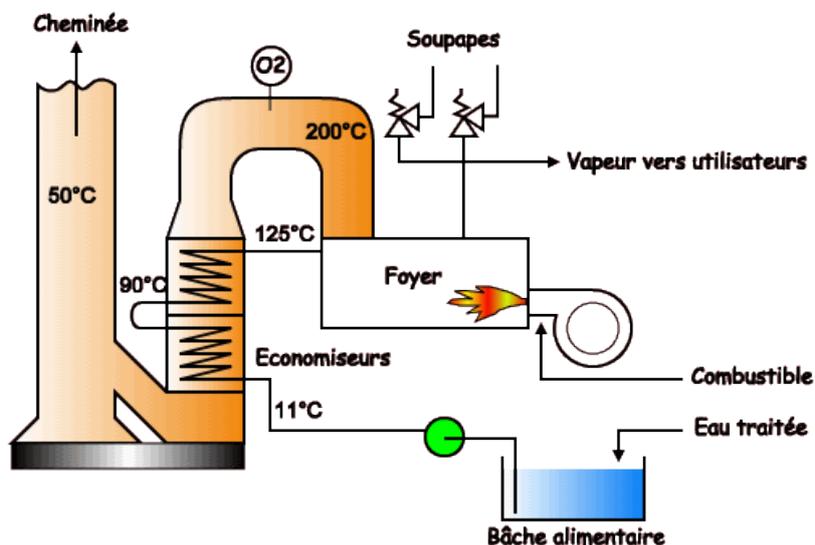


Figure 1: Schéma de principe d'une chaudière à vapeur

Source : http://www.azprocede.fr/Cours_GC/combustion_chaudiere.html

Une chaudière à vapeur est constituée des éléments suivants :

- Bâche alimentaire avec appoint d'eau traitée (décarbonatée, déminéralisée, dégazée...);
- Pompe alimentaire (dont la pression de refoulement est supérieure à la pression de la vapeur produite);
- Économiseurs (primaire et secondaire) permettant de refroidir les fumées en préchauffant l'eau d'alimentation;
- Foyer avec brûleur;
- Réseau vapeur avec soupapes de protection;
- Analyseur d'oxygène sur les fumées pour réglage de l'excès d'air;
- Cheminée pour rejet des fumées.

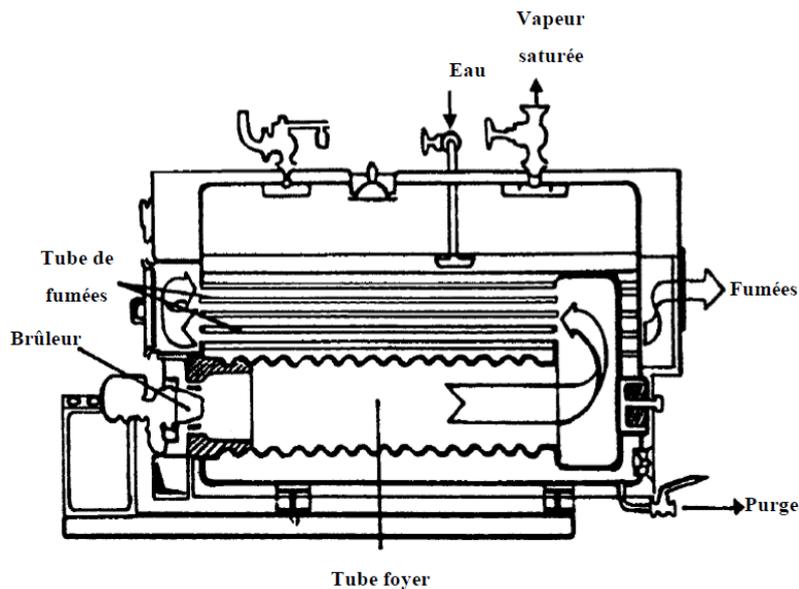
L'économiseur est un dispositif installé entre la chaudière et la cheminée qui permet de récupérer une partie de la chaleur des fumées pour préchauffer l'eau d'alimentation et ainsi augmenter le rendement.

3. CHAUDIÈRES À TUBES DE FUMÉES / TUBES D'EAU

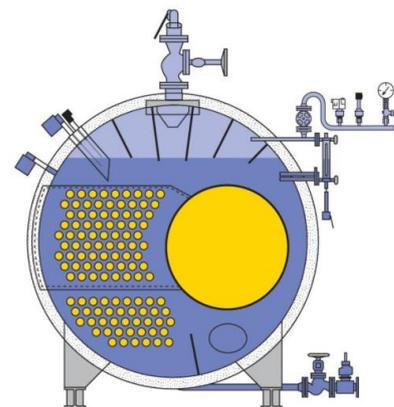
3.1 CHAUDIÈRES À TUBES DE FUMÉES

Dans une chaudière à tubes de fumées, les gaz de combustion circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau. L'ensemble constitue le corps cylindrique de la chaudière. La principale caractéristique des chaudières de ce type est de comporter un grand volume d'eau sous pression. La gamme de puissance de ces chaudières s'étend de 0,2 à 50 t/h de vapeur saturée, ce qui correspond à des puissances thermiques de l'ordre de 100 kW à 30 MW.

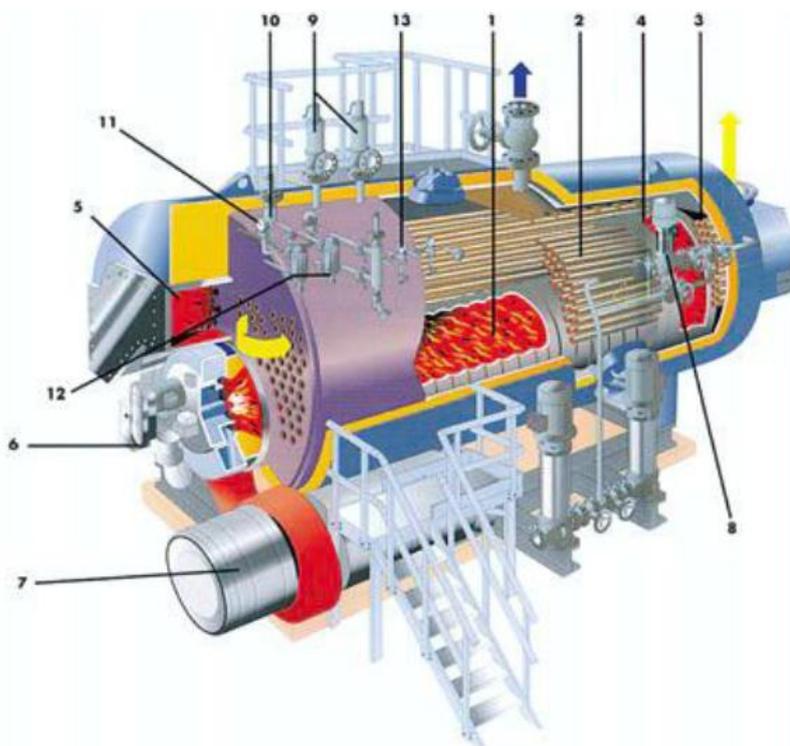
Une chaudière à tubes de fumées est schématisée ci-dessous.



Source : Académie de Poitiers



Source : BBC Loos



Source : Académie de Poitiers

1. Foyer
2. Tube de fumée 2^{ème} passe
3. Tube de fumée 3^{ème} passe
4. Boîte arrière à refroidissement par eau
5. Chambre de combustion
6. Brûleur
7. Ventilateur de combustion
8. Vanne de régulation
9. Soupape de sécurité
10. Indicateur de niveau de sécurité d'eau
11. Manomètre
12. Indicateur de niveau à glace
13. Bloc d'isolement + manomètre

Figure 2: Schéma de principe d'une chaudière à tubes de fumées

L'alimentation en eau est effectuée à la partie inférieure de la calandre, le faisceau tubulaire étant entièrement noyé dans l'eau liquide.

Le tube foyer, qui se trouve dans le ballon même de la chaudière, sous le plan d'eau, collecte les gaz chauds en sortie de brûleur. Les gaz chauds, accumulés dans un premier caisson à l'arrière de la chaudière, sont véhiculés par un groupe de tubes immergés dans l'eau du ballon vers un second caisson à l'avant de la chaudière. Un second groupe de tubes immergés emmène les gaz vers un troisième caisson à l'arrière de la chaudière, ce troisième caisson débouche sur la cheminée pour

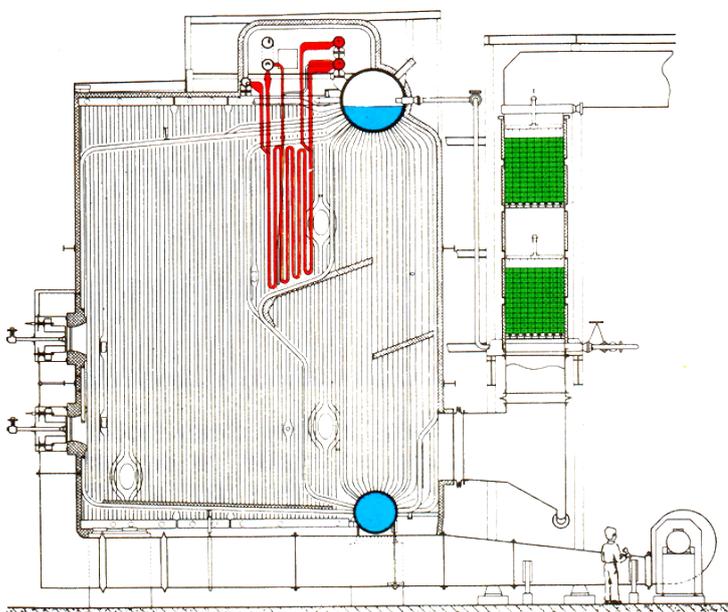
évacuation des fumées vers l'extérieur après passage éventuel dans un économiseur qui assure le refroidissement des fumées.

Il y a donc circulation des gaz de combustion dans des tubes assurant, par conduction vers l'eau de la calandre, la vaporisation par apport de calories.

Pour produire de la vapeur surchauffée, il est nécessaire de recourir à un surchauffeur (source de chaleur indépendante) en aval de la chaudière à tubes de fumées.

3.2 CHAUDIÈRES À TUBES D'EAU

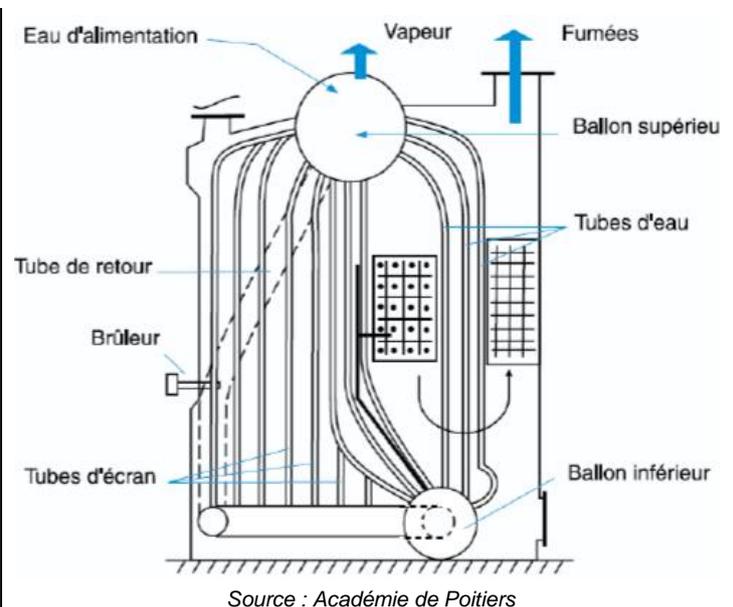
À l'inverse des chaudières à tubes de fumées, les chaudières à tubes d'eau sont conçues de sorte que ce soit l'eau qui circule à l'intérieur des tubes. Leur gamme de puissance est large, de 0,1 à 150 tonnes de vapeur par heure. Pour les grandes puissances (20 à 150 t/h), la chaudière est constituée d'une grande chambre de combustion parallélépipédique dont les parois sont tapissées de faisceaux de tubes d'eau verticaux, munis d'ailettes longitudinales soudées (schématisée ci-dessous).



En rouge : surchauffeur permettant de surchauffer la vapeur produite à la température désirée

En vert : économiseurs

Source : AZProcédé



Source : Académie de Poitiers

Figure 3: Schéma de principe d'une chaudière à tubes d'eau

Ce type de chaudière possède deux réservoirs appelés ballon collecteur (ou encore ballon de vaporisation, en partie supérieure) et ballon distributeur (en partie inférieure), reliés par un faisceau de tubes vaporisateurs. Le ballon supérieur réalise la séparation des deux phases liquide et vapeur. Le ballon inférieur alimente en eau liquide tous les tubes dans lesquels l'eau soumise à l'apport de chaleur se vaporise partiellement avant de retourner au ballon supérieur.

Les gaz chauds produits par le brûleur sont directement en contact avec les tubes vaporisateurs à l'intérieur desquels se produit la vaporisation par convection. La vapeur ainsi générée est collectée dans le ballon supérieur, l'eau excédentaire est ramenée vers le ballon inférieur par des tubes de chute non soumis à la chaleur. La circulation de l'eau dans la zone de vaporisation est le plus souvent naturelle dans le cas des chaudières industrielles dont la pression est inférieure à 190 bars. Pour des pressions supérieures, la circulation est assurée par une pompe qui en impose le débit. Dans le cas de la circulation naturelle, le ballon supérieur constitue le point de départ de la circulation de l'eau.

Dans une chaudière à tubes d'eau, la vapeur saturée produite peut cheminer dans un ensemble de tubes installés dans le faisceau tubulaire de la chaudière et soumis à la chaleur dégagée par les gaz

de combustion (aussi appelés surchauffeurs). Les gaz chauds apportent donc à cette vapeur saturée une énergie supplémentaire qui en élève la température sans en modifier la pression. On peut ainsi obtenir de la vapeur surchauffée à la sortie.

3.3 QUELQUES CARACTÉRISTIQUES IMPORTANTES

Le tableau ci-dessous présente des caractéristiques et valeurs types relatives aux chaudières industrielles. Elles sont fournies pour apporter des éléments de comparaison et de réflexion avec l'installation étudiée. Les valeurs réelles sont à adapter au cas par cas.

	Tubes de fumées	Tubes d'eau
Fluide circulant dans les tubes	Gaz de combustion	Eau alimentaire
% du parc français	52%	32%
Production (t vapeur / h)	0,2 à 50 Moyenne : 3 t/h	0,1 à 150 Moyenne : 35 t/h
Timbre (pression max d'utilisation en bar)	10 à 20	90 à 220
Temp. de rejet des fumées (°C) avant économiseur	220 à 250	300
Rendement	95% avec économiseur	Légèrement inférieur à 95% avec économiseur
Principale caractéristique	Grand volume d'eau sous pression	Très petit volume d'eau sous pression
Vapeur délivrée	Fourniture de vapeur saturée sous faible pression (< 15 bars)	Fourniture de vapeur surchauffée à moyenne et forte pression

4. CARACTÉRISTIQUES DES AUTRES ÉQUIPEMENTS

4.1 DÉPOTAGE ET STOCKAGE DU COMBUSTIBLE LIQUIDE

Dans le cadre de ce guide, les dépotages par wagon-citerne, camion-citerne et barges sont couverts

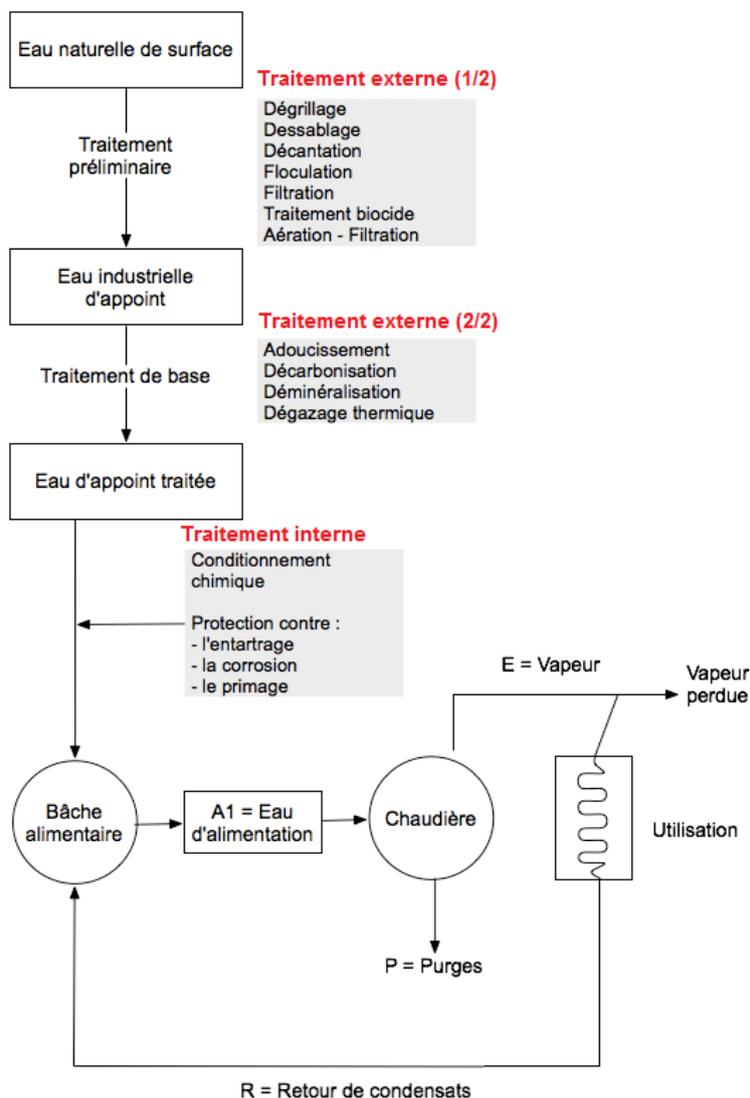
4.2 TRAITEMENT DES EAUX DE LA CHAUDIÈRE

L'eau d'alimentation des chaudières se compose d'eau condensée récupérée et d'eau d'appoint. La composition de l'eau d'alimentation dépend donc de la quantité de condensats qui retourne dans la chaudière et de la qualité de l'eau d'appoint. Le bon fonctionnement d'une chaudière exige :

- Une préparation de l'eau d'alimentation avant son passage dans la chaudière : c'est le traitement externe de l'eau alimentaire ;
- Une protection des surfaces internes de la chaudière : c'est le traitement interne ou conditionnement chimique ;
- Une optimisation du retour du condensat.

Ces mesures visent à éviter les problèmes de tartre, de dépôts, de corrosion et de primage (phénomène d'entraînement de gouttelettes d'eau contenant sels minéraux dissous et matières en suspension par la vapeur qui lui donne un caractère érodant pour les parois rencontrées). Ces problèmes ne sont pas isolés ; par exemple, les mécanismes de concentration sous la couche de tartre ou de dépôt peuvent également entraîner une corrosion sous les dépôts. Le primage peut être dû à des niveaux élevés de produits de corrosion dans la vapeur.

Le schéma ci-dessous positionne les différents traitements qui peuvent avoir lieu sur les eaux de chaudière.



Source : <http://www.ms-protech.com/fr/cms/programme-de-traitement-des-eaux-de-chaudieres>

4.2.1 Traitement externe

Une première phase consiste à éliminer par filtration les matières en suspension pouvant être présentes dans l'eau brute.

La deuxième phase vise à éliminer les ions calcium et magnésium responsables de l'entartrage par passage sur résines échangeuses d'ions ; c'est l'adoucissement. Les adoucisseurs se présentent sous forme de bouteilles contenant la résine et sont régénérés périodiquement à l'aide d'une solution chargée en chlorure de sodium. Ce type de traitement n'est pas toujours suffisant pour les applications industrielles. En effet, les carbonates, la silice et les autres ions, les gaz dissous passent au travers de ces résines et seront autant de sources de corrosion, d'encrassement, de moussage ou d'entraînement dans la vapeur. L'élimination de ces composés peut être réalisée grâce respectivement à une décarbonatation (qui permet de réduire l'alcalinité de l'eau brute), une déminéralisation et un dégazage thermique.

Le principe d'un dégazeur thermique repose sur la loi de Henry selon laquelle la quantité de gaz dissout dans un liquide, à température constante et à saturation, est proportionnelle à la pression

qu'exerce ce gaz sur le liquide. Plus la température du liquide est élevée, plus la pression exercée par le gaz est faible et plus la quantité de ce gaz au sein du liquide sera faible. Le principe de fonctionnement d'un dégazeur thermique consiste donc à maintenir l'eau en ébullition permanente afin d'en extraire les incondensables.

4.2.2 Traitement interne

Prévention de la formation de tartre et de dépôts

Le principe du conditionnement des eaux de chaudière repose sur les points suivants :

- toute la dureté résiduelle apportée par l'eau d'appoint traitée doit être soit précipitée dans la chaudière sous forme non entartrante, soit chélatée ;
- l'eau de chaudière doit contenir un excès de réactif afin de précipiter une quantité supplémentaire de dureté qui pourrait arriver accidentellement lors d'une déficience de l'adoucisseur d'eau ;
- des dispositions sont à prendre pour éviter les dépôts de silice (dans le cas d'eaux naturelles ayant une concentration en SiO_2 supérieure à 6 mg/l).

Les produits utilisés sont les suivants :

- les phosphates : mono et polyphosphates ;
- les séquestrants ou chélatants : sels de sodium, des acides nitriloacétiques (NTA) et de l'éthylène diamine tétracétique (EDTA) ;
- les dispersants : les tanins, les lignosulfonates, les polyamines, les polymères synthétiques.

Prévention de la corrosion

Un dégazage chimique permet d'éliminer l'oxygène résiduel présent dans l'eau d'alimentation de la chaudière en le combinant avec une substance réductrice. Les principaux réducteurs utilisés sont le sulfite de sodium, l'ammoniac et l'hydrazine.

L'élimination du CO_2 dissous dans l'eau est nécessaire dans les circuits de retour d'eau condensée où le risque de corrosion est important. Des produits au pouvoir neutralisant ou filmogène sont utilisés.

La corrosion due à l'acidité (attaque du fer) est-elle prévenue grâce au réglage de l'alcalinité. Selon le traitement de base utilisé, la correction de l'acidité ou de l'alcalinité de l'eau sera effectuée par l'emploi de phosphates appropriés, de manière à atteindre un pH dans la chaudière voisin de 11.

Prévention du phénomène de primage

Les anti-mousses tels que les alcools, polyols ou silicones peuvent être utilisés.

4.3 TRAITEMENT DES FUMÉES

Les chaudières, comme tout appareil de combustion, sont à l'origine d'émissions d'oxydes d'azote, de dioxyde de carbone et d'oxydes de soufre à fort impact négatif sur l'environnement (détérioration de la qualité de l'air, contribution à l'effet de serre, etc.). Des dispositions réglementaires en matière de contrôle périodique de l'efficacité énergétique sont applicables aux installations de plus de 400 kW¹. Le traitement des fumées de combustion s'inscrit dans ce cadre.

¹ Arrêté du 2 octobre 2009 relatif au contrôle des chaudières dont la puissance nominale est supérieure à 400 kilowatts et inférieure à 20 mégawatts.

Décret n° 2009-648 du 9 juin 2009 relatif au contrôle des chaudières dont la puissance nominale est supérieure à 400 kilowatts et inférieure à 20 mégawatts.

Il peut y avoir différentes étapes de traitement selon le type de combustible utilisé :

- Réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx) ;
- Réduction des émissions d'oxydes de soufre (SOx) ;
- Dépoussiérage.

Chacune de ces étapes est présentée succinctement dans les paragraphes ci-dessous.

4.3.1 Traitement des NOx

À titre d'information, le tableau ci-dessous présente les émissions en NOx d'une chaudière selon le type de combustible utilisé :

DÉSIGNATION	Facteur d'émission en mg NOx/ kWh
Bois*	216 à 324
FOL	612 à 684
FOD	360
Gaz naturel	216 à 270
Charbon	342 à 1224
Autres produits pétroliers	612

SOURCE : RAPPORT OMINEA 5^{ME} ÉDITION DU CITEPA (01/02/08)

La réduction des émissions de NOx peut être réalisée par des mesures primaires, qui permettent de limiter les émissions à la source, et des mesures secondaires, qui réduisent les émissions par le traitement des polluants déjà émis et présents dans les effluents gazeux.

Mesures primaires de réduction des émissions de NOx

Les NOx se forment lors de la combustion suivant trois mécanismes distincts : le mécanisme « NO-thermique », le mécanisme « NO-précoce » et le mécanisme « NO-combustible ». Les mesures primaires de réduction visent à limiter ces différents mécanismes de formation en intervenant sur le procédé de combustion par modification de :

- La disponibilité de l'oxygène ;
- La température de combustion ;
- Le temps de séjour du combustible dans les zones à haute température et à forte teneur en oxygène.

La combustion en faible excès d'air est une mesure simple et peu coûteuse qui consiste à diminuer la quantité d'oxygène disponible afin de réduire l'oxydation de l'azote de l'air comburant. En réduisant la quantité d'O₂ à la quantité minimale théorique dite stœchiométrique nécessaire pour une combustion complète, l'oxydation de l'azote contenu dans le combustible est fortement limitée. La formation des NO-thermique est également limitée mais de façon moins importante. Cette mesure ne requiert aucune énergie supplémentaire mais elle nécessite d'équiper l'installation d'un système de contrôle et de régulation performant. En effet, en cas de mauvais réglage, la combustion risque d'être incomplète et, de ce fait, produire des composés imbrûlés.

L'étagement de l'air comburant lors de la combustion permet de créer deux zones de combustion distinctes, la première en manque d'oxygène et donc en excès de combustible (substœchiométrique) et la seconde en excès d'oxygène. La première zone est en conditions réductrices. La seconde zone

permet de rendre la combustion complète. La technique de l'étagement d'air se traduit par la mise en place de brûleurs à air soufflé ou d'injection d'air additionnel.

La recirculation des gaz de combustion consiste en la réinjection des fumées dans la zone de combustion, dans l'air comburant ou le combustible. Cette dilution permet de réduire les températures de flamme et les concentrations en oxygène et donc la formation de NOx thermiques et précoces. 20 à 30 % des fumées sont réinjectées, soit par recirculation interne, soit par recirculation externe.

L'étagement du combustible, également appelé recombustion (reburning), repose sur la création de différentes zones de combustion permettant la réduction des NOx déjà formés : une zone primaire, une zone secondaire et une zone de postcombustion. Dans la zone primaire de combustion, 80 à 85 % du combustible est injecté. La combustion est réalisée dans des conditions d'excès d'air classique, ce qui entraîne la formation de NOx thermiques. Dans la zone de combustion secondaire ou zone de recombustion, le combustible restant est injecté (15 à 20 %) dans les fumées issues de la zone primaire de combustion. Cette atmosphère réductrice conduit à la réduction des NOx précédemment formés. La zone de postcombustion consiste en une injection d'air permettant de compléter la combustion et d'oxyder les imbrulés de la zone de recombustion.

Le principe de fonctionnement des brûleurs bas NOx diffère des brûleurs classiques sur le mélange combustible / air et son système d'injection. Le fonctionnement général de ces brûleurs est basé sur trois principes :

- Retarder le mélange air/combustible ;
- Réduire la température de flamme ;
- Réduire la teneur en O₂.

Les brûleurs bas-NOx peuvent être de plusieurs types, dont certains reprennent les techniques expliquées précédemment :

- Les brûleurs à étagement d'air ;
- Les brûleurs avec recirculation des fumées ;
- Les brûleurs à étagement du combustible ;
- Les brûleurs en céramique poreuse ;
- Les brûleurs à vortex.

Un brûleur bas-NOx permet d'atteindre une réduction des émissions allant de 25 à 60 % par rapport à un brûleur classique. Cette performance dépend principalement du type de combustible utilisé. En effet, une réduction de 25 à 40% est attendue dans le cas d'un combustible liquide alors que dans le cas d'un combustible gazeux la réduction peut aller jusqu'à 60%. La performance varie également entre une installation nouvelle et une installation existante.

Mesures secondaires de réduction des émissions de NOx

Les mesures secondaires de réduction consistent à injecter un réactif promoteur de NHi (principalement urée ou ammoniac) dans les fumées. Les réactions de réduction ont lieu en présence, ou non, d'un catalyseur et forment de l'azote moléculaire (N₂) et de l'eau. On distingue :

- La réduction sélective catalytique (SCR) ;
- La réduction sélective non catalytique (SNCR).

La SCR permet d'atteindre des réductions de NOx très élevées, pouvant aller jusqu'à 90% dans les conditions optimales. L'efficacité moyenne de cette mesure est de 70% dans les installations existantes. L'efficacité de cette technique dépend des paramètres suivants :

- la température des lits catalytiques : optimale entre 250 et 380°C ;
- le ratio NH₃/NOx : doit rester proche de 1 ;
- la qualité du mélange agent réducteur / fumées ;
- le type de catalyseur : les catalyseurs les plus utilisés sont des mélanges d'oxydes métalliques, des oxydes de fer, des zéolithes cristallines et du charbon actif. Le catalyseur le plus généralement utilisé est un mélange d'oxydes métalliques : dioxyde de titane (TiO₂) et pentoxyde de vanadium (V₂O₅).

La SNCR permet d'atteindre des taux de réduction d'oxydes d'azote compris entre 40 et 65 %. L'efficacité de cette technique dépend des paramètres suivants :

- la température : optimale entre 850 et 1100°C ;
- le système d'injection ;
- le type d'agent réducteur : l'urée en solution est le réactif le plus simple d'usage sur le plan réglementaire ;
- le temps de séjour : compris entre 0,2 et 0,5 secondes ;
- le ratio NH₃/NOx : optimal entre 1,5 et 2,5.

4.3.2 Traitement des SOx

De la même manière que pour les émissions de NOx, les émissions de SOx (en particulier le dioxyde de soufre : SO₂) peuvent être réduites soit par des mesures primaires (à la source), soit par des mesures secondaires (traitement des polluants déjà formés). Ces mesures sont succinctement décrites ci-après.

Mesures primaires de réduction des émissions de SO₂

L'utilisation d'un combustible peu ou pas soufré peut permettre de limiter fortement les émissions de SO₂. Ainsi, la substitution du charbon par du gaz naturel permet une réduction des émissions de SO₂ de plus de 99%. Le tableau suivant présente les concentrations de SO₂ dans les fumées, en l'absence de désulfuration, par type de combustible.

Combustible	Teneur en soufre (%)	Concentration de SO ₂ (mg/Nm ³) correspondant au teneur en soufre ^{2, 3}
Combustibles solides		
Charbon	0,40%	865
	4,00%	8650
	0,80% ¹	1725
Bois	0,01%	17
Combustibles liquides		
Fioul lourd HTS	4,00%	6810
	1,83% ¹	3115
Fioul lourd BTS	2,00%	3405
	1,41% ¹	2400
Fioul lourd TBTS	1,00%	1700
	0,91% ¹	1550
Fioul lourd TTBTS	0,55%	935
	0,53% ¹	902
Fioul domestique	0,10%	170
Combustibles gazeux		
Gaz naturel	0,00137% ¹	2,1
Gaz de raffinerie	0,11	325
¹ Valeurs moyennes des combustibles vendus en France. ² Teneur en O ₂ 6% pour les combustibles solides ³ Teneur en O ₂ 3% pour les combustibles liquides et gazeux		

Source : CITEPA 2011

La technique de combustion en lit fluidisé désulfurant consiste à faire passer l'air nécessaire à la combustion au travers d'une couche de combustible solide. Ce lit peut être fixe, dense, bouillonnant ou circulant. Afin de réduire la formation de dioxyde de soufre, un réactif alcalin est ajouté au combustible. Les réactifs les plus utilisés sont la chaux vive, la chaux éteinte et le calcaire.

Selon le combustible utilisé, la réaction d'adsorption nécessite un rapport Ca/S compris entre 1,5 et 7. Les sous-produits de cette réaction, des sulfates et des sulfites de calcium, ainsi que d'autres impuretés, sont extraits du lit. Ils sont généralement peu valorisables.

Dans des conditions idéales, cette technique permet d'atteindre un flux de désulfuration supérieur à 90%. La combustion en lit fluidisé permet également de réduire la formation des oxydes d'azote. Néanmoins cette technique peut entraîner une augmentation des émissions de protoxyde d'azote, gaz à effet de serre puissant.

Mesures secondaires de réduction des émissions de SO₂

Parmi ces mesures, deux types de techniques peuvent être distinguées :

- Les techniques régénératives, qui permettent d'extraire le SO₂, de le concentrer et de le récupérer sous forme de soufre élémentaire ou sous forme d'acide sulfurique ;
- Les techniques non régénératives, dont les sous-produits tels que le gypse peuvent néanmoins être valorisés.

Les procédés régénératifs mettent en œuvre un réactif utilisé en solution ou en suspension dans l'eau de lavage (procédé par voie humide). Ils requièrent la mise en place d'unité de production de soufre (unité Claus) ou d'acide sulfurique en aval de la tour de lavage. Les taux de désulfuration des procédés régénératifs sont parmi les plus élevés, entre 95% et 98%. Mais ces procédés nécessitent des installations coûteuses et très encombrantes en aval des équipements de combustion qui limitent leur application à des chaudières de puissance importante (> 300 MW).

Les procédés non régénératifs mettent en œuvre les principaux réactifs suivants : chaux, calcaire, soude ou ammoniac. Ces procédés peuvent avoir lieu par voie sèche (injection de réactif sous forme pulvérulente dans les gaz à traiter : chaux, calcaire ou bicarbonate de sodium) ou par voie semi-humide (injection de réactif sous forme de bouillie : lait de chaux ou de calcaire ou solution de carbonate de sodium). Le rendement de désulfuration de ces seconds types de procédés est meilleur que celui des premiers : 80% pour les procédés par voie semi-humide vs 20 à 50% pour les procédés par voie sèche. Des procédés non régénératifs par voie humide existent également (lavage des gaz de sortie) et fournissent les meilleurs rendements.

Qu'elles soient régénératives ou non, les techniques de réduction des émissions de SO₂ requièrent un système de dépoussiérage efficace (filtres à manches ou électrofiltres) et un système de collecte et de stockage des résidus. Certains procédés nécessitent, en plus, des unités de traitement des effluents liquides.

4.3.3 Dépoussiérage

La principale mesure de réduction primaire de particules et de composés imbrûlés est l'amélioration de la combustion comme par exemple le respect de la règle des 4T : température, teneur en oxygène, turbulence et temps de séjour.

Il existe quatre grandes familles de dépoussiéreurs qui constituent les mesures secondaires de réduction :

- Les dépoussiéreurs mécaniques (séparateurs, cyclones et multi-cyclones) ;
- Les dépoussiéreurs humides (laveurs) ;
- Les dépoussiéreurs électrostatiques (électrofiltres) ;
- Les dépoussiéreurs à couches filtrantes (filtres à manches).

Dans les installations de combustion, les principales techniques utilisées sont :

- Les cyclones et multi-cyclones : pour des faibles puissances (inférieures à 5 MW) ;
- Les électrofiltres et les filtres à manches : pour des puissances plus élevées (supérieures à 5 MW).

Plusieurs traitements peuvent être mis en cascade sur les installations de grande puissance avec par exemple l'association d'un multi-cyclone et d'un électrofiltre ou d'un multi-cyclone et d'un filtre à manches : le multi-cyclone en amont permettant de limiter la vitesse d'encrassement de l'électrofiltre ou du filtre à manches et de séparer les plus grosses particules. Les électrofiltres et filtres à manches sont décrits.

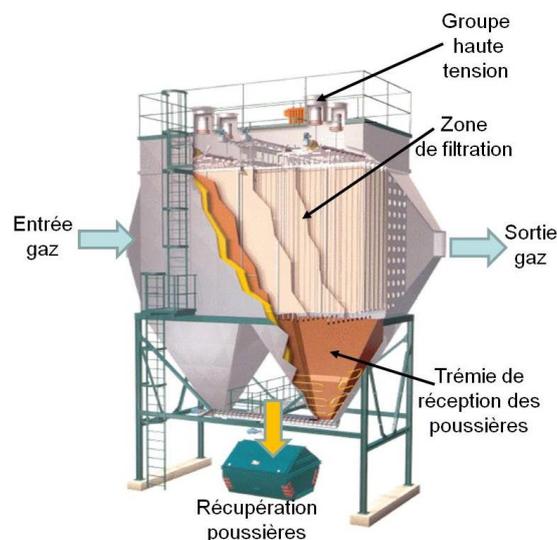
Électrofiltre

Un électrofiltre est un dispositif constitué de plaques (électrodes réceptrices) disposées verticalement entre lesquelles se trouvent des fils tendus verticalement (électrodes émissives) alimentés électriquement. Une tension négative appliquée aux électrodes émissives engendre la formation d'électrons au voisinage de celles-ci, qui ionisent les molécules de gaz. Ces ions sont attirés par les plaques réceptrices et chargent les poussières (effet couronne) sur leurs parcours. Ces poussières sont alors attirées par les plaques réceptrices et y adhèrent. Des marteaux frappent régulièrement ces plaques et permettent de décrocher les particules par intervalle régulier. Les poussières sont ainsi collectées dans une trémie pour être évacuées. Pour éviter que le frappeage ne remette en suspension les poussières, certains électrofiltres (appelés « électrofiltres humides ») disposent d'un écoulement de liquide le long des plaques collectrices. Cette technique nécessite le traitement du liquide en aval. La pulvérisation d'une solution spécifique permet en plus de capter certains composés tels que : HCl, HF, SO₂, SO₃, H₂S, NH₃, etc. La présence de liquide limite néanmoins la température de fonctionnement des électrofiltres humides à 100°C maximum au lieu de 350°C pour des électrofiltres secs.

Les électrofiltres disposent d'un ou plusieurs champs de captation pour mieux maîtriser le champ électrique tout au long de l'électrofiltre et au fur et à mesure de l'avancement du dépeussierage (généralement au minimum deux et jusqu'à cinq ou six pour obtenir des niveaux de concentrations inférieurs à 10 mg/Nm^3). Chaque champ est constitué de plusieurs électrodes émettrices et de plaques réceptrices. Dans la configuration la plus courante, les gaz poussiéreux circulent horizontalement, et à basse vitesse (environ 1 m/s) entre les plaques distantes de 200 à 500 mm .

Les principaux paramètres influençant sur le fonctionnement de l'électrofiltre sont la résistivité des poussières (dans la pratique comprise entre 10^6 et $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$) et la vitesse de passage des gaz. L'injection préalable de SO_3 permet de réduire la résistivité des particules.

Il existe un grand nombre de configurations qui permettent d'atteindre des efficacités de plus de 99% pour les particules de taille inférieure à $1 \mu\text{m}$ (avec notamment la mise en œuvre de 3 à 5 champs). Une bonne configuration peut permettre d'atteindre des performances proches de ce qui peut être obtenu à la sortie de filtres à manches.



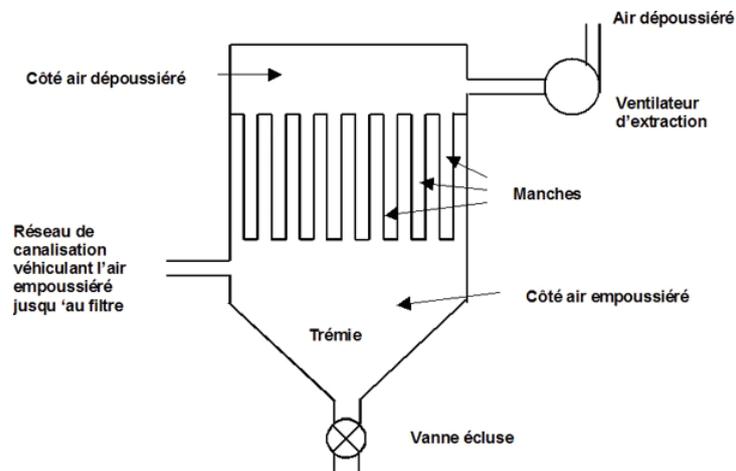
Filtre à manches

Le filtre à manches est constitué d'un caisson fermé à sa base par une trémie, dans lequel sont suspendues des manches filtrantes ouvertes à une extrémité. Les gaz chargés de poussières pénètrent dans la partie basse du caisson et rencontrent dans un premier temps un déflecteur qui permet de séparer les grosses particules de poussières des gaz à traiter. Ceux-ci passent ensuite à travers les manches de l'extérieur vers l'intérieur pour être évacués sur la partie haute du filtre. Les poussières qui sont retenues sur l'extérieur du filtre forment une couche appelée gâteau de filtration. Ce gâteau de filtration permet de former un filtre supplémentaire qui augmente la quantité de poussières captées mais augmente également la perte de charge. Il est donc nécessaire de décolmater les manches régulièrement. Les dispositions des appareils sont très nombreuses, ainsi que les techniques de décolmatage. La disposition la plus fréquente est le filtre à manches supportées intérieurement par un panier grillagé et nettoyées individuellement par un jet périodique d'air comprimé. Les vitesses de filtration sont comprises entre $0,6$ et 6 cm/s , selon le gaz à traiter et le type de filtre.

Les filtres sont de différents types : tissus, feutres aiguilletés, composites, membranaires. Les fibres peuvent être en polyester, acrylique, téflon, inox, etc. Le choix de la nature du filtre dépend des caractéristiques du gaz à traiter.

L'injection de réactif en amont du filtre peut permettre également de capter d'autres polluants gazeux comme le mercure, les dioxine-furanes, les gaz acides, etc. En effet, les réactifs injectés en amont du filtre vont se retrouver piégés avec les poussières dans le gâteau de filtration. Le contact entre les gaz à traiter traversant le gâteau de filtration et les réactifs présents dans le gâteau s'en retrouve alors facilité.

Ce dispositif a des performances très élevées et permet d'obtenir un seuil de rejet constant. Il peut atteindre une efficacité de plus de 99% même sur les particules de faibles diamètres (1 μm ou moins). Il est néanmoins très coûteux pour sa mise en place et son entretien. En effet, les manches doivent être remplacés régulièrement et les fortes pertes de charges engendrent d'importantes consommations d'électricité. De plus, dans certaines applications, il peut exister un risque d'incendie lié à la présence dans les fumées de particules incandescentes qui peuvent enflammer les manches. Il est donc nécessaire de disposer d'un équipement de détection et d'extinction.



ANNEXE 2 – ACCIDENTOLOGIE DES INSTALLATIONS DE CHAUFFERIE

Cette annexe détaille, sur la base d'une analyse de l'accidentologie des chaudières industrielles, la répartition des phénomènes dangereux par équipement. La répartition par type de phénomènes dangereux et une synthèse de l'accidentologie sont présentées dans le guide.

L'analyse de l'accidentologie est basée en partie sur une analyse du BARPI concernant 121 événements survenus entre juin 1972 et février 2007 sur des chaudières alimentées au gaz naturel ou dont le retour d'expérience est transposable aux installations fonctionnant au gaz. 37 accidents étrangers du même type, survenus entre février 1973 et juillet 2007, ont aussi été pris en compte dans l'étude du BARPI².

L'INERIS a procédé à un complément de cette analyse pour la période de février 2007 à juin 2014 (identification de 17 événements supplémentaires en France).

Une étude concernant les chaufferies alimentées au fioul a également été réalisée sur la période juin 1974 à juin 2014. 87 événements ont été recensés en France pour cette période.

Remarques :

- Le complément d'analyse pour les chaudières à gaz entre 2007 et 2014 suit une logique différente de l'analyse réalisée par le BARPI entre 1974 et 2007. Dans l'analyse du BARPI, le fait qu'un accident puisse donner lieu à plusieurs phénomènes dangereux est pris en compte, alors que dans le complément, ceci n'est pas pris en compte i.e. il est considéré qu'un accident donne lieu à un phénomène dangereux. Cela est en partie dû à la précision limitée des descriptifs d'accidents reportés dans la base ARIA.
- Les accidents ayant eu lieu à l'étranger ont également été étudiés mais ceux-ci n'apportent pas de scénarios complémentaires par rapport à l'étude française. Ils ne sont pas présentés dans le guide mais les plus remarquables sont détaillés dans cette annexe.

1. CHAUDIÈRES ALIMENTÉES AU GAZ

Un détail de la répartition des phénomènes dangereux générés dans le cas de chaudières alimentées au gaz par équipement est illustré dans l'histogramme ci-dessous.

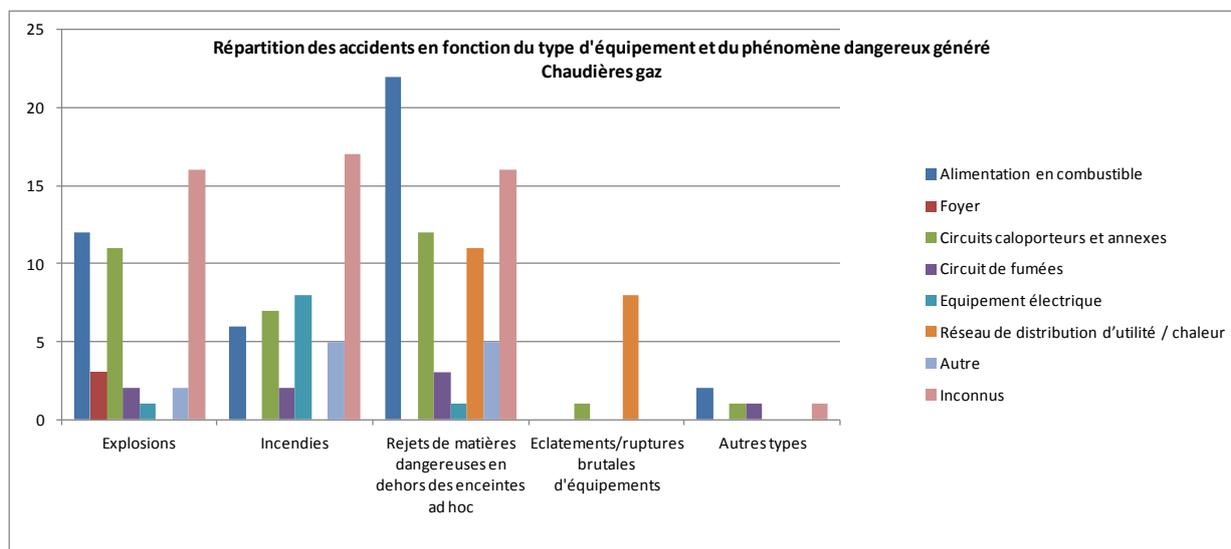


Figure 4: Répartition des phénomènes dangereux parmi les cas impliquant des chaudières gaz - Détail par équipement

² L'étude est disponible sur internet à l'adresse suivante : http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/1373988006chaufferies_web_sept08.pdf

Les équipements les plus régulièrement impliqués sont les circuits d'alimentation des chaudières en combustible (21%) ainsi que les circuits de fluide caloporteur (18%).

2. CHAUDIÈRES ALIMENTÉES AU FIOUL

Un détail de la répartition des accidents en fonction du type d'équipement et de la phase de fonctionnement de l'installation dans le cas de chaudières alimentées au fioul est illustré dans l'histogramme ci-dessous.

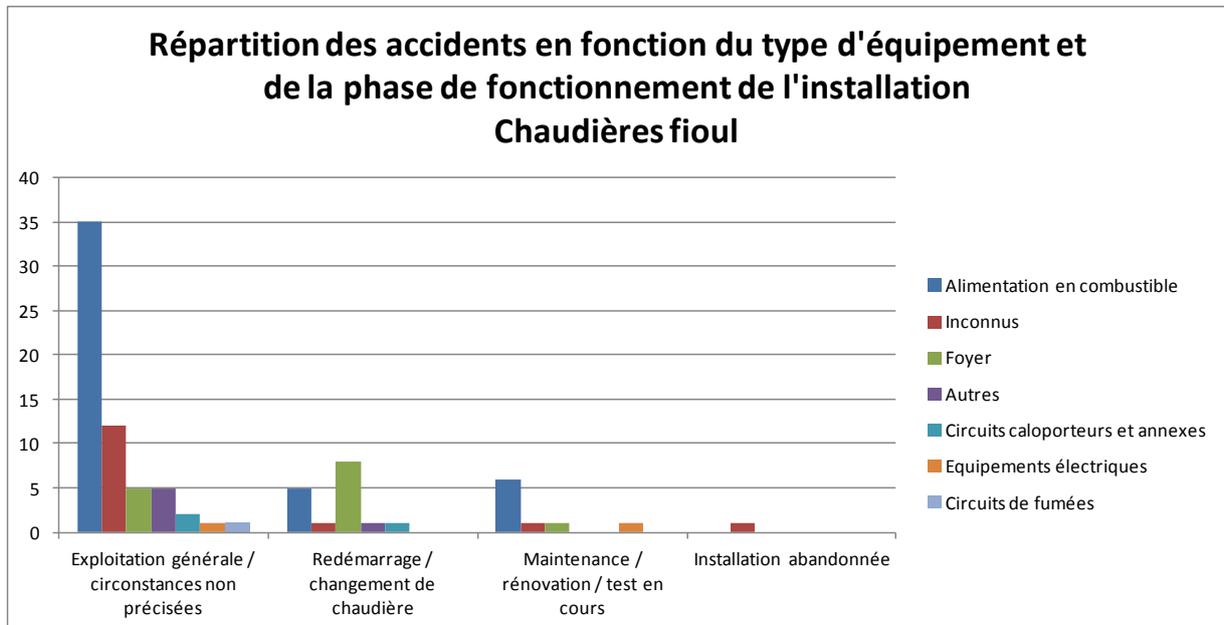


Figure 5: Répartition des phases de fonctionnement parmi les cas impliquant des chaudières fioul –
Détail par équipement

Un détail de la répartition des phénomènes dangereux générés dans le cas de chaudières alimentées au fioul par équipement est illustré dans l'histogramme ci-dessous.

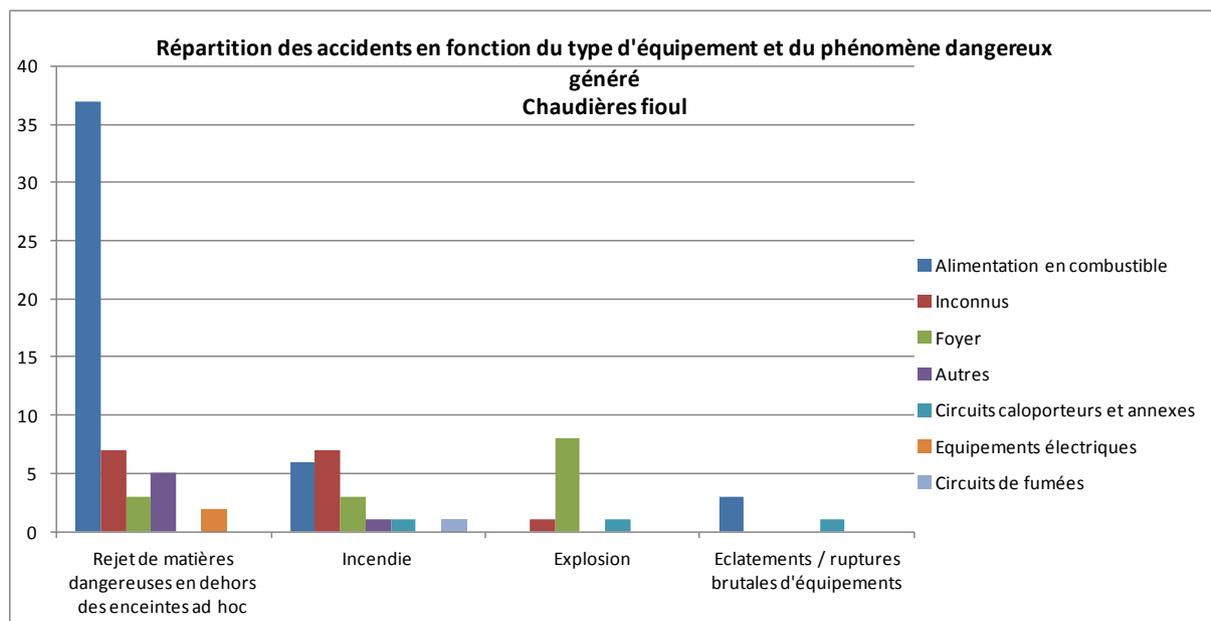


Figure 6: Répartition des phénomènes dangereux parmi les cas impliquant des chaudières fioul –
Détail par équipement

Les équipements les plus régulièrement impliqués sont les circuits d'alimentation des chaudières en combustible (53%) ainsi que les foyers des chaudières (15%).

3. ACCIDENTS MORTELS

Les cas d'accidents mortels en France sont les suivants :

N°25754 - 28/11/1984 - FRANCE - 76 - LE HAVRE

D35.11 - Production d'électricité

Une explosion se produit sur une chaudière neuve dans une centrale thermique (10 t de vapeur/h). Cette chaudière auxiliaire était destinée à compléter la fourniture de vapeur nécessaire au réchauffage du fioul lourd des stockages et au refroidissement des brûleurs de la tranche 3. C'est une chaudière à tube foyer ondulé et à 3 parcours de fumées. Les gaz de combustion sont dirigés vers l'arrière de la chaudière puis ramenés vers l'avant par les tubes de fumée inférieurs avant d'être renvoyés vers la cheminée située à l'arrière par l'intermédiaire des tubes supérieurs.

Elle devait fonctionner au tampon sur le réseau, en parallèle avec une autre chaudière de même type (arrêtée le jour de l'accident) et avec des transformateurs de vapeur fabriquant de la vapeur de soutirage des turboalternateurs.

L'accident se produit à la fin des essais de mise en route de la chaudière qui était surveillée par un technicien de la société de fabrication du produit et de 2 techniciens de la chaufferie. Lors de l'accident, une extrémité du tube foyer s'est séparée de la plaque tubulaire en créant une brèche sur la face arrière de la chaudière. L'eau contenue dans la chaudière, sous l'action de la vaporisation instantanée de la vapeur sous pression (13 bar), s'est échappée par cette brèche, propulsant par réaction la chaudière une dizaine de mètres en arrière et provoquant son encastrement dans le dégraisseur d'une chaudière de 250 MW. La vapeur s'échappant de la chaudière a traversé la travée de manutention, soufflé le mur de l'atelier mécanique et en se vaporisant partiellement à la pression atmosphérique, a occupé un volume beaucoup plus important, provoquant des brûlures au personnel occupant cet atelier. Le bilan de l'explosion est de 1 mort et de 17 blessés ; tous se trouvaient dans l'atelier de mécanique. Bien que pour certains codes de calcul, les caractéristiques de la chaudière ne soient pas acceptables, cette dernière était néanmoins conforme aux règles du code ISO et de la norme française NFE 32 104.

Des hydrocarbures plus lourds que l'eau à la température de fonctionnement de la chaudière étaient présents dans l'eau d'alimentation. Ils se déposent sur le tube foyer ce qui provoquerait le passage à la vaporisation en film et donc une élévation de la température du métal qui devient supérieur à la température maximale de garantie des caractéristiques de l'acier employé. Il existe en effet des possibilités de pollution du circuit vapeur par du fioul ou cours de son réchauffage : lors de la récupération des condensats de vapeur, il peut être admis dans les bâches qui servent à l'alimentation de la chaudière. Les conditions réelles de fonctionnement au moment de l'explosion n'étant pas connues avec certitude, la conjugaison de la présence de fioul dans l'eau d'alimentation et des caractéristiques limites de calcul fait que l'accident a eu lieu.

N°5132 - 30/03/1994 - FRANCE - 92 - COURBEVOIE

D35.30 - Production et distribution de vapeur et d'air conditionné

Une explosion se produit à 1h30 dans une chaufferie urbaine (500 MW, 6 000 m²), l'énergie dissipée dans le sol est estimée à l'équivalent d'une charge de 50 kg de TNT. Mise en service en 1987, cette chaufferie comporte 5 chaudières (2 au charbon, 2 mixtes charbon/gaz et 1 au gaz). Au cours du poste précédent, plusieurs tentatives de démarrage d'une chaudière mixte échouent. Ne parvenant toujours pas à la redémarrer et les manomètres d'arrivée de gaz indiquant une pression nulle, le chef de quart de l'équipe de nuit donne l'instruction d'ouvrir les 2 vannes quart de tour de sectionnement de l'arrivée de gaz sur le circuit principal. La pression indiquée restant nulle, il demande alors au conducteur de chaudière d'ouvrir un obturateur guillotine puis une vanne papillon pour permettre l'alimentation de la chaudière mixte en gaz. Cette opération entraîne une fuite importante de gaz. Une chaudière au gaz est arrêtée d'urgence et 2 opérateurs sortent pour couper l'alimentation générale au poste de détente, à 110 m du bâtiment, lorsque l'explosion survient.

L'un des 5 employés est tué. Une fillette de 10 ans habitant à 40 m de l'usine décèdera 4 jours plus tard des suites de ses blessures ; 59 autres riverains sont blessés. L'installation est ravagée. Les quartiers voisins subissent d'importants dommages, 600 personnes sont en chômage technique et 250 riverains sont à reloger. En attendant leur connexion sur des réseaux voisins 140 000 usagers et 2,2 Mm² de bureaux sont privés de chauffage et d'eau chaude. Le fonctionnement de grands réseaux informatiques climatisés par la centrale est perturbé. Les dommages sont évalués à 544 MF (83 M.euro). Selon les résultats de l'enquête, 3750 Nm³ de gaz auraient été relâchés jusqu'à ce que le service du gaz coupe l'alimentation 30 min après l'explosion.

Les manomètres défailants auraient pu avoir été endommagés par une surpression antérieure à l'accident. Les interventions du chef de quart ne devaient être réalisées que par le service de maintenance ; en cas d'urgence, les opérateurs de la centrale devaient demander l'intervention du service du gaz. L'obturateur n'était pas conçu pour être manipulé sous pression et la vanne papillon en amont de l'obturateur guillotine aurait été manipulée par le conducteur de chaudière alors que l'obturateur était resté en position intermédiaire, position dans laquelle il n'est plus étanche car les brides sont légèrement écartées. Le nuage de gaz s'est alors enflammé au contact de la chaudière à charbon en service au moment du sinistre. Par ailleurs, aucun scénario de fuite et d'explosion de gaz n'était évoqué dans l'étude de dangers du site. Les risques liés aux poussières de charbon n'y étaient pas non plus abordés. Le comportement des poussières a probablement contribué à la violence de l'explosion. Le 5 mai 2004, le juge d'instruction de la Cour d'appel de Versailles conclut à un non-lieu.



N°6082 - 08/12/1994 - FRANCE - 44 - BASSE-GOULAIN

C10.13 - Préparation de produits à base de viande

Dans une charcuterie industrielle, une chaudière à tubes de fumées de 1 t/h de vapeur explose. Elle a une capacité de 2 790 l, une surface de chauffe de 27 m² et brûle du fioul domestique. Installée en 1979 pour alimenter 5 autocuiseurs, elle était timbrée à 10 bar. Un sifflement est entendu au niveau des soupapes juste avant l'explosion qui souffle le bâtiment de 200 m². Trois employés sont tués (un corps est retrouvé à 250 m avec la face avant de la chaudière), 3 autres sont blessés dont l'un est gravement atteint. Le corps de la chaudière (3 t) a été projeté à 150 m au nord, le tube foyer et un ballon d'eau chaude à 200 m au sud. La chaudière, arrêtée et vidangée pour entretien (soupape, vanne de vidange) 3 jours auparavant, avait redémarré le matin. Une cause possible de cet accident serait une intervention inadaptée par remplissage intempestif en eau froide du corps de chauffe, ayant déclenché une vaporisation brutale contre le tube de chauffe déjà porté à haute température. Un rapport d'expertise datant de 1995 indique qu'un dénoyage partiel du tube foyer peut conduire aux dommages constatés d'un point de vue énergétique. Ce rapport ne permet toutefois pas d'affirmer que le dénoyage soit la cause effective.

À l'étranger les cas mortels les plus récents sont détaillés ci-dessous :

SPENCER (OKLAHOMA, USA) - le 19/01/82

Le dysfonctionnement d'une chaudière est survenu lors du déjeuner dans une école élémentaire située à Spencer dans l'Oklahoma le 19 janvier 1982.

Un coin de la cafétéria a complètement été détruit par l'explosion et des morceaux de béton ont été éjectés jusqu'à la salle du restaurant.

Bilan de l'accident : 7 morts (dont 6 enfants et 1 professeur) et 33 blessés.

L'explosion de la chaudière est due une défaillance dans le système d'urgence pour réduire la température dans la chaudière suite à la surchauffe de l'eau dans le réservoir. En effet, lorsque que la température de l'eau a atteint une température de 195°C, le thermostat aurait dû « éteindre » la chaudière. De plus, une soupape de libération de la vapeur aurait dû s'ouvrir pour mettre en sécurité la chaudière quand celle-ci atteint une température de 212°C. Il s'avère que les deux sécurités placées sur la chaudière ont toutes les deux dysfonctionné. Le chauffage des ballons est assuré par des thermoplongeurs électriques.



N°102 - 01/08/1988 - JAPON - 00 - AMAGASAKI

35.1 -

À la suite de son encrassement par un brouillard de fuel, le catalyseur d'une chaudière d'une centrale thermique fond et par contact entraîne la fusion de la paroi du réchauffeur d'air. L'eau utilisée pour refroidir extérieurement l'unité entre par le trou formé et se vaporise violemment. Une explosion se produit 3 h après le début des opérations de refroidissement et tue 2 employés (occupés à étudier expérimentalement in situ les conditions de formation du brouillard de fioul observé) et blesse 13 autres personnes.

N°36300 - 09/06/2009 - ETATS-UNIS - 00 - GARNER

C10.13 - Préparation de produits à base de viande

Dans une usine agroalimentaire de préparations à base de viande où travaillent 300 de ses 900 salariés, une explosion à 11h25 provoque un incendie et la chute de 100 m² de toiture ; 4 employés sont tués, 67 personnes sont blessées dont 4 grièvement brûlées. Une partie du bâtiment s'effondre et les voitures garées à proximité sont écrasées par des pans de mur en béton pesant plusieurs tonnes ; 9 300 m² de bâtiments seront finalement endommagés. Les secours établissent un périmètre de sécurité, éteignent l'incendie, déblaient les lieux et recherchent des personnes disparues. Ils détectent une fuite d'ammoniac (NH₃) causée par effet domino sur les installations de réfrigération ; près de 8,2 t d'NH₃ relâchées contaminent gravement une rivière et la végétation sur plusieurs kilomètres. Trois pompiers exposés au rejet toxique lors de l'intervention sont hospitalisés. Les dommages s'élèvent à plusieurs centaines de milliers de dollars. Une chaudière industrielle au gaz naturel était en cours d'installation dans le local des utilités implanté dans un bâtiment de production. Pour approvisionner la chaudière, une canalisation a été installée 5 jours auparavant entre la conduite principale de gaz naturel située sur le toit et la chaufferie. La mise en service de la canalisation et de la chaudière comprenait la purge de la canalisation avec du gaz naturel pour la vider de l'air qu'elle contenait. Selon les pratiques courantes de l'entreprise et de la profession, le sous-traitant a enlevé des raccords filetés de la canalisation pour y créer des ouvertures et la purger dans la chaufferie. Il utilisait une vanne quart de tour pour contrôler la purge du gaz en se fiant uniquement à l'apparition d'une odeur de gaz. La salle des utilités dispose d'un ventilateur aspirant, mais l'adéquation de la ventilation et de la quantité de gaz relâché n'a pas été vérifiée. Ayant des difficultés à démarrer la chaudière, le personnel pensait que la canalisation de gaz contenait encore de l'air et l'opération de purge a été répétée durant plus de 2h30.

Une atmosphère explosive s'est alors accumulée dans la salle et a été enflammée par l'une des nombreuses sources d'inflammation présentes dans ou à proximité du local : équipements électriques... Aucun détecteur de gaz n'avait été installé, certains employés ont senti l'odeur de gaz en dehors de la salle des utilités, mais ils ne se sont pas inquiétés en pensant qu'il s'agissait d'une situation normale au démarrage de la chaudière. Par ailleurs de nombreux employés non impliqués dans cette phase de démarrage n'étaient pas avertis et n'avaient pas eu de consigne pour quitter le bâtiment pendant la purge : plus de 200 personnes étaient ainsi dans les locaux lors de l'explosion. À la suite de cet accident, l'exploitant modifie les procédures pour la purge de la canalisation de gaz : les gaz purgés devront dorénavant être évacués à l'extérieur par un conduit dans un lieu sans source d'ignition et non fréquenté par le personnel, des détecteurs mesurent en continu la concentration en gaz combustible et toutes les personnes non indispensables pour les opérations sont évacuées. L'exploitant transfère ses productions dans d'autres usines et fermera le site quelques mois plus tard.

N°26252 - 19/01/2004 - ALGERIE - 00 - SKIKDA

C19.20 - Raffinage du pétrole

Une explosion se produit vers 18h40 dans un complexe pétrochimique portuaire, situé sur la côte et comprenant 6 unités de traitement de gaz et d'hydrocarbures ; 12 000 personnes travaillent sur ce site qui est en partie alimenté par du gaz et du pétrole en provenance du Sahara. L'accident se produit dans l'unité traitant du gaz naturel (GNL), à la suite de l'explosion d'une chaudière à haute pression fabriquant de la vapeur. Sous la violence de l'explosion, des réservoirs de substances inflammables à proximité sont endommagés à leur tour : les fuites qui en résultent provoquent l'extension de l'incendie en différents foyers et de nouvelles explosions (effet domino). Le souffle de l'explosion, entendue à 10 km à la ronde, brise les vitres d'immeubles et commerces du voisinage. Une cellule de crise est mise en place par l'exploitant et le ministère de l'intérieur, le préfet local (" wali ") déclenche l'équivalent du PPI. Les secours doivent lutter 8 h pour maîtriser l'incendie. Le bilan final est très lourd : 27 victimes parmi les employés dont 9 gardiens ou agents de sécurité situés dans un poste proche et 74 blessés (dont 43 sortiront le lendemain après examens). La plupart des décès est liée aux effets de surpression ou de projection et effondrements de structures. L'estimation des dégâts matériels se monte à 800 M de dollars. 3 des 6 unités de liquéfaction sont détruites. Des débris sont projetés jusqu'à 250 m du point de l'explosion mais les dégâts restent limités au site. Selon un des témoins, des bruits anormaux correspondant à des vibrations ou à des fuites sur soupapes auraient été entendus avant l'explosion violente. L'unité ("train 40") où s'est produite l'explosion, semblait présenter des anomalies de fonctionnement régulières. Suite à une fuite importante signalée par un agent de maintenance qui décèdera dans l'explosion, un mélange d'air et d'hydrocarbures gazeux aurait été aspiré par l'entrée d'air de la chaudière du train n°40 provoquant une première explosion à l'intérieur de cette dernière, suivie d'une seconde déflagration à l'extérieur puis d'un incendie détruisant les "trains" n°20 et 30 voisins espacés de 60 m les uns des autres.

4. QUELQUES CAS D'ACCIDENTS ILLUSTRATIFS

N°6539 - 22/10/1974 - FRANCE - 76 - GONFREVILLE-L'ORCHER

C19.20 - Raffinage du pétrole

Au démarrage de nouvelles installations, la première chaudière (76 bars, 120 t/h, 150 m³) est allumée avec du fioul léger en absence de gaz à PCI constant. Elle est dotée de 2 brûleurs alignés verticalement et fournit sa propre vapeur d'atomisation. Après 10 jours d'essai, l'unité est arrêtée sur alarme haute de niveau d'eau (défaut électrique ?). Après un ré-allumage difficile, avec balayage de 5 min (vantelles à 80%), l'alarme se déclenche après 10 min. Au 2ème allumage, une explosion survient dans la chambre qui se déforme dans toutes les directions (flèche de 600 mm sur tubes verticaux de 7 m, déchirure du casing). Le fioul, mal pulvérisé par manque de vapeur, se répand sur la sole et se distille entre les 2 allumages. L'installation est arrêtée 4 mois.

N°8239 - 03/09/1996 - FRANCE - 14 - BLAINVILLE-SUR-ORNE

F43.11 - Travaux de démolition

Une explosion suivie d'un incendie se produit dans une centrale d'enrobage. L'incident résulte vraisemblablement d'une augmentation de la pression de vapeur dans le compartiment huile de la chaudière et d'un dysfonctionnement de la soupape. La virole se rompt et l'huile s'enflamme au contact du brûleur. Le feu se propage au stockage de bitume et de fioul lourd. Les pompiers maîtrisent rapidement le sinistre. Pour prévenir cet incident, un pressostat est installé sur le circuit d'huile.

Explosion du théâtre de l'Empire à Paris, le 13 février 2005

Rupture de ballons contenant de l'eau surchauffée (ballons de 5 m³ et de 50 m³) ou un mélange d'eau surchauffée et de vapeur.

Fonctionnement : mélange eau / vapeur : 180°C – 10 bar abs



N°35339 - 10/10/2008 - FRANCE - 04 - CHATEAU-ARNOUX-SAINT-AUBAN

C20.14 - Fabrication d'autres produits chimiques organiques de base

À 14 h, un camion dépose, par erreur, 25 t des résidus chlorés lourds dans un bac de stockage contenant 500 t de fioul lourd (FOL) alimentant la chaufferie d'une usine chimique. L'incident est constaté vers 15h30. L'exploitant décide d'arrêter la chaudière à 16 h, puis de mettre le site à l'arrêt par manque de vapeur. Les procédures de démarrage d'une autre chaudière alimentée au gaz naturel et celles de remise en fonctionnement normal du site sont mises en place.

N°36183 - 11/05/2009 - FRANCE - 02 - BOUE

C10.39 - Autre transformation et conservation de fruits et légumes

Une explosion et un départ de feu se produisent vers 15h15 au niveau de la chaudière au gaz naturel de la station d'épuration d'une usine de transformation et de conservation de fruits. Le gardien du poste de surveillance de l'entreprise voisine avertit l'exploitant dont le personnel éteint le feu avec un extincteur à mousse et coupe l'alimentation en gaz et électricité. Les pompiers et les gendarmes se rendent sur place. Les employés ne sont pas en chômage technique.

Cet incident est dû à la perte d'étanchéité d'une électrovanne de la rampe gaz du brûleur de la chaudière. La chaudière est remise en état, le brûleur ainsi que la rampe gaz sont retournés chez le fabricant, la canalisation gaz est testée ainsi que l'ensemble des sécurités de la chaudière.

N°38023 - 13/03/2010 - FRANCE - 76 - GONFREVILLE-L'ORCHER

C19.20 - Raffinage du pétrole

À 4h15 du matin, un ballon de dégazage d'eau de chaudière se rompt brutalement dans une unité de distillation atmosphérique d'une raffinerie en "arrêt chaud" depuis août 2009. L'éclatement du ballon à moitié plein, de 8m³ implanté à 6 m du sol sur un rack, provoque un bruit sourd perceptible à l'extérieur du site et des dégâts matériels sur les équipements proches : l'interne du ballon impacte un four de surchauffe à 6 m de haut et provoque une fuite de gazole sur les vannes d'isolement d'une pompe de charge brut. Une moitié du ballon est restée sur le rack mais l'autre moitié se trouve au pied de l'unité en deux fragments (fond et virole) L'exploitant isole les équipements endommagés, arrose préventivement la pompe endommagée avec une lance et prévient l'inspection des installations classées vers 8h40. Les explosimètres n'ont rien détecté et l'absence de trace noire (suie, produits gras) dans le ballon ne laisse pas penser à une explosion d'hydrocarbure. Des simulations donnent une pression d'éclatement entre 5 et 7 bar (présence de vitres intactes à 40 m de l'unité). Deux jours après l'accident, il procède au dégazage complet de l'unité, celle-ci était maintenue en température en vue d'un éventuel redémarrage et avait été vidangée des hydrocarbures habituellement traités 5 mois avant, en début de période hivernale.

Le ballon permet d'éliminer les gaz inertes éventuellement dissous dans l'eau de chaudière avant sa transformation en vapeur. L'exploitant étudie plusieurs hypothèses, celle d'une explosion due à un flash interne provoqué par l'accumulation de produit inflammable (résidu d'hydrocarbure, hydrogène) issus des circuits de condensats et d'une source chaude est écartée. Des prélèvements d'eau et test de pression montrent l'absence de pollution hydrocarbure du réseau eau/vapeur. Les sources d'ignition potentielles dans le ballon étaient à 200 °C, inférieure à la température d'auto inflammation des deux produits suspectés (HC à 230 °C et H₂ à 560 °C). L'hypothèse retenue est une montée progressive en pression liée à une fragilité de la robe du ballon, l'exploitant ayant découvert que :

- la robe du ballon s'est déchirée au niveau de la cornière de support du calorifuge, en raison d'une corrosion externe due à l'accumulation d'eau sur ce support horizontal,
- de la vapeur à 12 bar entrant dans le réseau des condensats, puis dans le ballon en raison de la défaillance de certains purgeurs (bypass ouvert ou décollé, monté à l'envers donc débitant en permanence). Les entrées de condensats sont devenues supérieures aux sorties dans le ballon. Situation aggravée par la non-application complète d'une procédure hors gel qui prévoit l'aspiration permanente du ballon, et la limitation des exutoires du ballon car une vanne entre le ballon et sa garde hydraulique a été retrouvée fortement bridée.

L'exploitant effectue une campagne de contrôle et de remplacement des purgeurs du réseau vapeur. À titre de retour d'expérience, il vérifie la configuration et renforce le contrôle des gardes hydrauliques et des supports de calorifuges.

N° 48676 - 10/10/2016 - FRANCE - 13 - FOS-SUR-MER

C24.10 – Sidérurgie

Explosion d'une chaudière dans une usine sidérurgique

Dans une usine sidérurgique, une explosion se produit à 23h13 dans une chaudière à gaz lors d'une phase de test de redémarrage. Les pompiers du site sécurisent l'installation. La chaudière est fortement endommagée mais la production n'est pas impactée.

La chaudière sortait d'un arrêt de maintenance prolongé suite aux événements de 2016 (ARIA 47992 et 48395). Depuis plusieurs semaines, la marche de l'usine est fragilisée et ne repose que sur une seule des 4 chaudières du site.

Durant l'après-midi, le chef de poste tente en vain à 3 reprises d'allumer le 1er brûleur de la chaudière. Le chef de poste de nuit tente à son tour 9 fois sans succès. Après chaque essai, la séquence d'allumage est reprise du début. La 10ème fois, il décide de shunter au niveau de l'automate la détection de flamme du 1er brûleur puis du 2ème et lance le 3ème afin de s'affranchir des phases de pré-ventilation si non détection. Le débit d'injection de gaz sur les 2 premiers brûleurs conduit alors à la présence d'un volume estimé à 90 m³ de propane au moment de l'allumage du 3ème brûleur créant ainsi une zone ATEX à l'origine de l'explosion. L'exploitant identifie plusieurs causes profondes à cet accident :

- le chef de poste était seul lors de sa prise de décision : poste de nuit, adjoint en formation ;
- un stress important dû à la marche dégradée des installations des dernières semaines ;
- une sous-évaluation du risque : les nouvelles consignes de sécurité interdisent la présence de l'opérateur en charge de la surveillance de la flamme pilote et de l'allumage de la flamme principale ;
- le shunt des sécurités de flamme n'était pas assez sécurisé, seule la procédure l'interdisait sachant qu'une autre procédure autorisait la shunt de cette sécurité pour les flammes pilotes.

Afin d'éviter ce type d'accident, l'exploitant :

- modifie les procédures de test des allumeurs ;
- installe des caméras de flamme sur les chaudières ;
- sécurise l'accès à la clé permettant le shunt des détections de flamme au niveau des brûleurs
- réfléchit à la sécurisation des automates ;
- rappelle aux employés l'interdiction des shunts sur flamme principale du 1er brûleur ;
- organise le recyclage annuel des formations sécurité des opérateurs de chaudières.

**ANNEXE 3 – MODE D'EXPLOITATION DES CHAUFFERIES :
PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES DE SÉCURITÉ
(NORME NF EN 32-020-1)**

La norme NF EN 32-020 fixe les règles de sécurité en exploitation des générateurs de vapeur d'eau ou d'eau surchauffée avec ou sans présence humaine.

La norme NF EN 32-020-1 donne une définition de quatre modes d'exploitation des ensembles de production de vapeur d'eau ou d'eau surchauffée ainsi que les termes les plus couramment utilisés dans ce domaine, et fixe les prescriptions générales de sécurité pour chacun de ces modes. Ces définitions et prescriptions concernent la surveillance, la conduite et les équipements de ces ensembles de production.

Cette norme s'applique aux ensembles de production de vapeur d'eau de pression supérieure à 0,5 bar ou de production d'eau surchauffée de température supérieure à 110°C, fonctionnant aux combustibles solides, liquides, gazeux et/ou électricité, ainsi qu'aux générateurs par échange de fluide caloporteur, aux générateurs instantanés à circulation forcée, et aux générateurs de récupération sur flux gazeux de procédés thermiques, dont la capacité des générateurs est supérieure à 25 litres, et selon la puissance utile.

Cette annexe présente plus en détails les prescriptions générales à mettre en place pour les chaudières vapeur selon leur mode d'exploitation (exploitation de la norme NF EN 32-020-1 complétée par la norme NFE 32-106 : Sécurité eau et pression).

NF E 32020.1 - MODE D'EXPLOITATION DES CHAUFFERIES - PRESCRIPTIONS GENERALES
NF E 32.106 - SECURITE EAU ET PRESSION (pour robinetterie, pompes... : cf texte)
CONTROLE DE CHAUFFE pour P>8000 th/h - comb. gaz (pour autres cdts : cf texte)
CAS DES GENERATEURS VAPEUR

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
puissance unitaire	pas de limitation	0,3 MW à 20 MW	0,3 MW à 80 MW	0,3 MW à 80 MW
principes	surveillance : - dans local dans usine (chaufferie ou local mitoyen ou local déporté) intervention : - immédiate - arrêts d'urgence (par générateur et général ext. chaufferie) possible depuis salle de contrôle	surveillance : - dans local dans usine intervention : - en moins de 10 minutes	surveillance : - dans centre de surveillance éventuellement hors usine intervention : - en moins de 30 minutes - arrêt d'urgence à distance	surveillance : - aucune - en cas de défaut la chaufferie alerte automatiquement personnel d'astreinte intervention : - en moins de 30 minutes
vérifications	toutes les 2 heures et ap. mise en service : - vérifier visuellement bon fonctionnement des installations - vérifier que distribution d'énergie correcte, pas odeur gaz... toutes les 24 heures : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... tous les ans (en présence personne	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 4 heures (ou 8 heures) et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 24 heures et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence	à la 1ère mise en service (par personne « officielle ») : - vérifier conformité à norme toutes les 24 heures et ap. mise en service : - vérifier bon fonctionnement des dispositifs de sécurité (provoquer le défaut ou le simuler - annulation du défaut : maxi 5 min - ou 30 s si test des 2 dispo simultanément) toutes les semaines : - vérifier fonctionnement du registre par mise en sécurité effective tous les 6 mois : - vérifier les autres dispositifs de sécurité et dispositifs signalant dérives toutes les semaines : - effectuer les purges des divers équipements de sécurité... une fois par semestre (en présence

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	« officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut	personne « officiel le » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - contrôle du délai d'intervention	personne « officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - fiabilité des liaisons de transmission - contrôle du délai d'intervention	personne « officielle » : - contrôle des dispositifs de sécurité en provoquant le défaut - fiabilité des liaisons de transmission - contrôle du délai d'intervention
indicateurs minimum à prévoir (NF E 32.106)	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre	générateur vapeur : - indicateurs de niveau indép. l'un de l'autre et indép. de toute régulation; 1 au moins doit être à paroi transparente - 1 manomètre
contrôle de chauffe (pour P>8000 th/h et comb. gaz nat.)	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2	- indicateur de la temp. des gaz de combustion sortie chaudière - indicateur et enregistreur pression vapezur sur collecteur départ - indicateur de temp. de surchauffe sur collecteur départ - indicateur (ou totalisateur) du débit de combustible - analyseur automatique des fumées donnant teneur en CO2 ou O2
informations sur pupitre	1/ appareils de contrôle équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement registres : - position de dérivation	dégazeur : - niveau bâche alimentaire - niveau équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement - paramètres de fonctionnement - indic. spéc. au fonctionnement des dispo de régulation registres : - position de dérivation - temp. fumées en entrée	équip. chauffe : - indic. mise en service et fonctionnement registres : - position de dérivation - temp. fumées en entrée	

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) - temp. vapeur surchauffée <p>visualisation défauts des équipements</p> <p><u>2/ appareils de commande</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - arrêt d'urgence par générateur - arrêt d'urgence général agissant sur organe de coupure extérieur à chaufferie <p><u>Nota</u> :1/ info de mesures peuvent être reprises sur signaux de sortie des régulateurs</p> <p>2/ ce sont les prescriptions pour local voisin. Si local mitoyen ou en chaufferie una alarme regroupée est suffisante.</p>	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) 	<p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pression vapeur - niveau(x) - temp. vapeur surchauffée 	
anomalies ⇒ alarme simple		<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas 	<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>soupapes de générateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - temp. élevée à échappement (pour détection fuites) 	<p>dégazeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>bâche alimentaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>générateur vapeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - niveau bas <p>soupapes de générateur :</p> <ul style="list-style-type: none"> - temp. élevée à échappement (pour détection fuites)

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités	registre (vérins double-effet) : - pression basse capacités
anomalies → arrêt et alarme	générateur vapeur : (-pas d'excès de pression : si excès pression mise aux soupapes) - niveau très bas	générateur vapeur : - excès de pression (en SI4 seulement - en SI8 est détecté par 2 dispositifs) - excès temp. surchauffe	dégazeur : - niveau très bas (*) bâche alimentaire : - niveau très bas (*) générateur vapeur : - excès temp. surchauffe - niveau très haut (*) ne fait qu'arrêter les pompes	dégazeur : - niveau très bas (*) bâche alimentaire : - niveau très bas (*) générateur vapeur : - excès temp. surchauffe - niveau très haut (*) ne fait qu'arrêter les pompes
1 seul dispo de sécurité				
anomalies → arrêt et alarme 2 dispo de sécurité ou dispo autoc.		générateur vapeur : - excès de pression (en SI8 seulement - en SI4 est détecté par un seul dispo) - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau	générateur vapeur : - excès de pression - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau	générateur vapeur : - excès de pression - niveau très bas. Cette anomalie arrête en plus alim. en eau
remarques	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de régulation ou sécurité alors arrêt installation (avec temporisation éventuelle) 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore • alarme lumineuse	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore générale • alarme lumineuse de chaque défaut	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé 4/ en cas de fonctionnement d'un dispositif de sécurité : - en chaufferie : • alarme sonore générale • alarme lumineuse de chaque défaut	1/ les dispositifs de sécurité doivent être indépendants et distincts des appareils de réglage et de conduite (sauf pour registres) 2/ si défaut d'énergie sur dispositif de sécurité alors arrêt installation 3/ le 1er défaut doit être visualisé

mode	PRESENCE PERMANENTE	PRESENCE INTERMITTENTE	TELECONTROLE	AUTOCONTROLE
	<p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation)</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité</p>	<p>- déporté : <ul style="list-style-type: none"> • alarme sonore informant personnel d'intervention </p> <p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation)</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité</p>	<p>- au centre de surveillance : <ul style="list-style-type: none"> • alarme sonore • alarme lumineuse de chaque défaut </p> <p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation) 6/ les dérives et anomalies de fonctionnement sont enregistrées automatiquement</p> <p>8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité 9/ les capteurs d'anomalie peuvent assurer la fonction de capteurs de dérive</p>	<p>5/ les registres sont équipés de contrôle de position de dérivation. Si la dérivation n'est pas notée alors arrêt de la TAG (avec temporisation) 6/ les dérives et anomalies de fonctionnement sont enregistrées automatiquement 7/ - lorsque un seul dispositif est prévu il doit agir sur deux chaînes à la fois par intermédiaires de contacts élec distincts - chaque chaîne agit sur un organe distinct de coupure énergie 8/ un dispositif de sécurité autocontrôlé peut remplacer 2 dispositifs de sécurité, sauf pour les sondes de niveau autocontrôlées dans cdts particulières qui ne sont équivalentes qu'à un seul dispositif de sécurité 9/ les capteurs d'anomalie peuvent assurer la fonction de capteurs de dérive</p>
<p>nota : tout dispositif de la présence permanente doit exister dans les autres modes (passage en présence permanente lors d'intervention du personnel)</p>				

ANNEXE 4 – ÉLÉMENTS POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

1. INTRODUCTION

L'objet de cette annexe est de présenter des éléments d'évaluation de la performance des barrières de sécurité identifiées sur les scénarios d'accidents retenus dans le guide. Seules les barrières situées en aval d'événements dont la quantification en fréquence d'occurrence est directement obtenue de l'exploitation de bases de données publiques (voir Annexe 7) sont traitées dans cette annexe.

Si l'approche de quantification retenue ne permet pas d'aboutir à une situation acceptable (en termes de couple probabilité / gravité), alors l'exploitant peut décider de valoriser les éventuelles barrières de sécurité en amont des événements « génériques » afin de décroître la fréquence d'occurrence de ces événements.

Il est rappelé au lecteur que les éléments présentés dans cette annexe sont à compléter et à adapter par l'exploitant. La liste des éléments à vérifier et des points de vigilance n'a pas vocation à être exhaustive.

2. EXIGENCES RÉGLEMENTAIRES

Les barrières de sécurité valorisées sur un scénario d'accident (alors appelées mesures de maîtrise des risques) doivent répondre à des exigences réglementaires.

L'arrêté 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 » fixe des exigences générales d'évaluation de performances.

- Article 4 :

« Pour être prises en compte dans l'évaluation de la probabilité, les mesures de maîtrise des risques doivent être efficaces, avoir une cinétique de mise en œuvre en adéquation avec celle des événements à maîtriser, être testées et maintenues de façon à garantir la pérennité du positionnement précité. »

- Article 5 :

« L'adéquation entre la cinétique de mise en œuvre des mesures de sécurité mises en place ou prévues et la cinétique de chaque scénario pouvant mener à un accident doit être justifiée. Cette adéquation est vérifiée périodiquement, notamment à travers des tests d'équipements, des procédures et des exercices des plans d'urgence internes. »

L'arrêté du 29 septembre 2005 requiert donc la vérification des quatre critères d'efficacité, de temps de réponse adapté, de testabilité et de maintenabilité.

L'identification des barrières de sécurité intervenant en prévention ou en protection des scénarios d'accidents présentés dans le rapport s'est appuyée sur des référentiels réglementaires, normatifs ou de bonnes pratiques. Ces documents de référence sont listés ci-dessous :

- La directive 97/23/CE « Équipement sous pression », traitant le risque d'explosion d'origine physique inhérent au système sous pression.

La conformité aux normes harmonisées **NF EN 12952** (chaudières à tubes d'eau et installations auxiliaires, et **NF EN 12953** (chaudières à tubes de fumée) vaut présomption de conformité par rapport aux exigences essentielles de cette directive. En France, la série de norme **NF EN 32-020** (équipements de chaufferie à caractère industriel. Sécurité d'exploitation des générateurs de vapeur ou d'eau surchauffée avec ou sans présence humaine permanente) fixe les règles de sécurité en exploitation ;

- La directive 98/37/CE ou « Directive Machines », traitant le risque inhérent à la machine constituée par la chaudière.

La conformité à la norme harmonisée **NF EN 746** (équipements thermiques industriels) vaut présomption de conformité par rapport aux exigences essentielles de cette directive ;

- Les arrêtés de la rubrique ICPE n°2910 relative aux installations de combustion, traitant le risque d'explosion dans la chaufferie engendrant des effets majeurs pour l'environnement industriel.

L'**arrêté du 26 août 2013** modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux ICPE soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion) s'applique.

L'**arrêté du 26 août 2013** relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931 s'applique.

Ces textes recommandent des analyses de risques, en particulier des risques d'explosion, et spécifient des règles de conception, d'installation, d'entretien et de maintenance, qui évitent la formation d'atmosphères explosives. Les arrêtés spécifient des prescriptions techniques relatives à la ventilation, aux installations électriques, à l'alimentation en combustible, au contrôle de la combustion, à la détection gaz et incendie et aux emplacements présentant des risques d'explosion.

Les exigences fixées par ces différents textes sont explicitées dans les tableaux présentés dans cette annexe, relatifs aux différentes barrières de sécurité.

3. MÉTHODES D'ÉVALUATION DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

Les barrières de sécurité pourront être évaluées en suivant la méthodologie :

- Oméga 10 pour les barrières techniques de sécurité ;
- Oméga 20 pour les barrières humaines de sécurité ou fiche n°7 de la circulaire du 10 mai 2010.

Ces méthodes sont accessibles sur le site internet de l'INERIS.

L'évaluation s'appuie sur les évaluations individuelles de chaque élément de la barrière (détection, traitement, action) mais c'est l'évaluation de la barrière globale qui est retenue dans les évaluations de probabilité des événements.

Les critères d'évaluation (communs aux barrières techniques et humaines) sont :

- **L'indépendance** : faculté d'une barrière, de par sa conception, son exploitation et son environnement, à ne pas dépendre du fonctionnement d'autres éléments et notamment d'une part d'autres barrières, et d'autre part, du système de conduite de l'installation, afin d'éviter les modes communs de défaillance ou de limiter leur fréquence d'occurrence.
- **L'efficacité** : Capacité à remplir la mission/fonction de sécurité qui lui est confiée pendant une durée donnée et dans son contexte d'utilisation.
- **Le temps de réponse** : Ce temps de réponse est inclus dans la cinétique de mise en œuvre d'une fonction de sécurité, cette dernière devant être en adéquation [significativement plus courte] avec la cinétique du phénomène qu'elle doit maîtriser.
- **Le niveau de confiance** : il traduit la fiabilité de la barrière.
- **Le maintien des performances** des barrières (testabilité, maintenabilité).
- **Le mode commun de défaillance** : il doit être pris en compte dans les évaluations des probabilités des phénomènes dangereux et accidents.

4. TABLEAUX DE SYNTHÈSE D'ÉVALUATION DES BARRIÈRES DE SÉCURITÉ

4.1 MODÈLES UTILISÉS

Les tableaux ci-dessous recensent l'ensemble des critères à vérifier par la barrière de sécurité pour qu'elle soit valorisée en tant que mesure de maîtrise des risques sur un scénario d'accident et qu'elle se voie attribuer un niveau de confiance.

Les lignes encadrées en gras ne seront pas répétées dans la suite de l'Annexe, ces éléments étant à vérifier ou à préciser par l'exploitant selon la barrière considérée. Ces critères ne doivent pas être occultés lors de l'évaluation de la performance de la barrière étudiée.

4.1.1 Barrière humaine

Libellé de la barrière	
Installation & système	
Scénario	
Nature des éléments constitutifs de la barrière	
Type de mesure	<input type="checkbox"/> Pré-dérive <input type="checkbox"/> Rattrapage de dérive
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	
Résistance aux contraintes spécifiques	
Temps de réponse	
Temps de réponse	Vérifier qu'il est en adéquation avec la cinétique du scénario
Niveau de confiance (NC)	
NC initial maximal (NC_{initial})	NC2
Sous-fonction détection	
Type de détection (active ou passive)	À préciser
Facilité d'obtention des informations	À préciser
Disponibilité de l'opérateur	À préciser
Synthèse sous-fonction détection	Décote du NC : À préciser
Sous-fonction diagnostic et choix de l'action	

Difficulté dans le traitement de l'information	À préciser
Contrainte temporelle par rapport au scénario	À préciser
Difficulté dans le choix de l'action	À préciser
Synthèse sous-fonction diagnostic et choix de l'action	Décote du NC : À préciser
Sous-fonction action de sécurité	
Pression temporelle temps d'intervention par rapport à la cinétique	À préciser
Difficulté de la tâche à effectuer	À préciser
Difficulté dans le choix de l'action	À préciser
Synthèse sous-fonction action de sécurité	Décote du NC : À préciser
Décote totale	Décote du NC :
NC possible	$NC_{initial} - ndécote =$
Exigences complémentaires	
Formation, recyclage	À préciser
Entraînement, exercice	À préciser
Coopération entre les personnes (si tâche implique plusieurs acteurs)	À préciser

4.1.2 Dispositif technique passif

Libellé de la barrière	
Installation & système	
Scénario	
Nature des éléments constitutifs de la barrière	
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	À préciser
Résistance aux contraintes spécifiques	À vérifier
Niveau de confiance (NC) - Niveau de confiance par défaut $NC_{défaut} = 2$	

Perte de la fonction par défaillance d'un élément annexe	À préciser
Perte de la fonction après un certain délai	À préciser
Mesures mises en place permettant d'augmenter le NC	À préciser
Gestion de l'indisponibilité	À préciser. Ex : opération interdite
Test / Maintenance	Politique à préciser
Gestion des modifications	À préciser

4.1.3 Dispositif technique actif / Système Instrumenté de Sécurité (SIS)

Libellé de la barrière	
Installation & système	
Scénario	
Nature des éléments constitutifs de la barrière	
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	
Résistance aux contraintes spécifiques	À vérifier
Temps de réponse	
Temps de réponse	Si SIS : à préciser pour l'ensemble de la chaîne détection – traitement – action
Niveau de confiance (NC)	
Niveau de confiance maximal (Système simple ou complexe - Tolérance aux anomalies matérielles)	<p>Si SIS :</p> <p>Système complexe ou relayage</p> <p>Attention : dispositif de traitement de l'action (automate) à étudier : utilisation de l'automate pour des fonctions de régulation, priorité de l'action de sécurité par rapport aux autres actions, etc.</p> <p>Voir la note de doctrine du 02/10/2013 du MEDDE : http://www.ufip.fr/uploads/documents/guide_associe_à_note_de_doctrine_MMRi_v04-09-13_vf.pdf</p> <p>Redondance des différents éléments à préciser (capteurs, cartes etc., vannes)</p>

Concept éprouvé, REX	À préciser
Sécurité positive	À préciser
Type de câblage	À préciser
Gestion de l'indisponibilité	À préciser. Ex : opération interdite
Test / Maintenance	Politique à préciser
Gestion des modifications	À préciser
Références	
Si SIS : chaîne complète à étudier : détection – traitement – action	

4.2 DÉPOTAGE DE COMBUSTIBLE LIQUIDE

Libellé de la barrière	Dép4 : Détecter la présence d'hydrocarbures et limiter la quantité de combustible liquide rejetée
Installation & système	Aire de dépotage de combustible liquide
Scénario	Épandage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de dépotage de combustible liquide
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Fermeture de la vanne de fond de la citerne / arrêt pompe sur détection humaine de perte de confinement → Barrière humaine (Possibilité de système instrumenté de sécurité si fermeture vanne ou arrêt pompe asservi à une détection HC ou possibilité de système à action manuelle de sécurité si fermeture vanne ou arrêt pompe par opérateur suite à une détection HC)
Type de mesure	<input type="checkbox"/> Pré-dérive <input checked="" type="checkbox"/> Rattrapage de dérive
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non En cas de détection humaine, vérifier l'indépendance avec Dép5 : Détecter l'incendie et refroidir la citerne Si les deux barrières font intervenir la même personne (en détection et/ou action), alors seul un niveau de confiance NC1 pourra être valorisé pour l'ensemble des deux barrières.
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Barrière efficace uniquement pour les EI relatifs à la perte de confinement en aval de la citerne S'assurer qu'un opérateur est présent en permanence sur l'aire de dépotage lorsque l'opération est en cours.
Résistance aux contraintes spécifiques	S'assurer du port d'EPI adaptés

Libellé de la barrière	Dép5 : Détecter l'incendie et refroidir la citerne
Installation & système	Aire de dépotage de combustible liquide
Scénario	Épandage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de dépotage de combustible liquide Explosion du ciel gazeux de la citerne
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Déluge sur la zone de dépotage suite à détection incendie ou détection humaine → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non En cas de détection humaine, vérifier l'indépendance avec Dép4 : Détecter la présence d'hydrocarbures et limiter la quantité de combustible liquide rejetée Si les deux barrières font intervenir la même personne (en détection et/ou action), alors seul un niveau de confiance NC1 pourra être valorisé pour l'ensemble des deux barrières.
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Éléments à vérifier (liste non exhaustive) : <ul style="list-style-type: none"> • Détecteurs adaptés à la détection incendie • Détecteurs positionnés de façon adéquate • Déluge adapté pour refroidir efficacement la citerne (produit, débits, autonomie, etc.) • Positionnement des vannes et buses d'aspersion
Résistance aux contraintes spécifiques	Conditions météorologiques (ex : gel, bouchage de buses, etc.) Fonctionnement des détecteurs en zone ATEX
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/substances_combustibles_en_entrepots/Entrepots_detection_gaz_inflammable_V2.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_eau_V2.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_mousse_V2.pdf	

4.3 STOCKAGE DE COMBUSTIBLE LIQUIDE

Libellé de la barrière	Stock4 : Détecter la présence d'hydrocarbures et limiter la
-------------------------------	---

	quantité de combustible liquide rejetée
Installation & système	Aire de stockage de combustible liquide
Scénario	Épandage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de stockage de combustible liquide
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Fermeture de la vanne de fond du bac / vannes d'isolement / arrêt pompe sur détection humaine de perte de confinement → Barrière humaine (Possibilité de système instrumenté de sécurité si fermeture vanne ou arrêt pompe asservi à une détection HC ou possibilité de système à action manuelle de sécurité si fermeture vanne ou arrêt pompe par opérateur suite à une détection HC)
Type de mesure	<input type="checkbox"/> Pré-dérive <input checked="" type="checkbox"/> Rattrapage de dérive
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Barrière efficace uniquement pour les EI relatifs à la perte de confinement en aval du bac + EI « surremplissage lors du dépotage » S'assurer qu'un opérateur est présent en permanence sur l'aire de stockage lorsqu'un dépotage est en cours. S'assurer qu'une détection humaine de perte de confinement sur l'aire de stockage de combustible liquide est possible (présence humaine permanente du fait de la localisation géographique, vidéo surveillance, etc.)
Résistance aux contraintes spécifiques	S'assurer du port d'EPI adaptés

Libellé de la barrière	Stock5 : Détecter l'incendie et refroidir le bac
Installation & système	Aire de stockage de combustible liquide
Scénario	Épandage suite à perte de confinement du bac de combustible liquide Explosion du ciel gazeux du bac
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Couronne de refroidissement sur le bac de stockage suite à détection incendie ou détection humaine → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	

Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Éléments à vérifier (liste non exhaustive) : <ul style="list-style-type: none"> • Détecteurs adaptés à la détection incendie • Détecteurs positionnés de façon adéquate • Refroidissement adapté (produit, débits, autonomie, etc.) • Positionnement des couronnes
Résistance aux contraintes spécifiques	Conditions météorologiques (ex : gel, bouchage de buses, etc.) Fonctionnement des détecteurs en zone ATEX
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_decteur_flamme_V1.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_eau_V2.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_mousse_V2.pdf	

Libellé de la barrière	Stock6 : Arrêter la chauffe du FL sur détection de température haute
Installation & système	Aire de stockage de combustible liquide
Scénario	Explosion du ciel gazeux du bac
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de la chauffe du FL sur température haute → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« Tout appareil de réchauffage d'un combustible liquide comporte un dispositif limiteur de la température, indépendant de sa régulation, protégeant contre toute surchauffe anormale du combustible. Une alarme alerte les opérateurs en cas de dérive » Art. 63. IV</p> <p>Préciser les seuils de température définis</p>

Résistance aux contraintes spécifiques	Préciser la technologie des capteurs de température et vérifier qu'ils sont adaptés à leur contexte d'utilisation
---	---

Libellé de la barrière	Stock7 : Assurer un dégazage efficace du bac avant travaux
Installation & système	Aire de stockage de combustible liquide
Scénario	Explosion du ciel gazeux du bac
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Actions de vidange, d'aération et de consignation du bac et vérification par explosimètre identifiées dans la procédure de travaux par points chauds → Barrière humaine
Type de mesure	<input checked="" type="checkbox"/> Pré-dérive <input type="checkbox"/> Rattrapage de dérive
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Identification claire des actions de vidange, d'aération et de consignation du bac et vérification par explosimètre dans la procédure de travaux par points chauds Délivrance d'un permis feu adéquat
Résistance aux contraintes spécifiques	Être vigilant à la protection des acteurs lors des actions de vidange et d'aération (port des EPI adaptés, exposition du personnel par rapport aux positionnements des éléments techniques, etc.)

4.4 TRANSFERT DE COMBUSTIBLE LIQUIDE

Libellé de la barrière	TuyCombLiq4 : Fermer la vanne d'alimentation sur détection de pression basse
Installation & système	Tuyauteries de combustible liquide
Scénario	Perte de confinement de la tuyauterie de combustible liquide
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection pression basse → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	

<p>Dimensionnement adapté et positionnement</p>	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« Un dispositif de coupure (manuelle pour les établissements A), indépendant de tout équipement de régulation de débit, placé à l'extérieur des bâtiments s'il y en a, permet d'interrompre l'alimentation en combustible liquide ou gazeux des appareils de combustion. Ce dispositif, clairement repéré et indiqué dans des consignes d'exploitation, est placé :</p> <ul style="list-style-type: none"> – dans un endroit accessible rapidement et en toutes circonstances ; – à l'extérieur et en aval du poste de livraison et/ou du stockage du combustible. <p>Il est parfaitement signalé et maintenu en bon état de fonctionnement et comporte une indication du sens de la manœuvre ainsi que le repérage des positions ouverte et fermée. » Art. 63. II</p> <p>La <u>norme NF EN 32 020-3</u> définit des prescriptions particulières relatives aux installations fonctionnant aux combustibles liquides.</p> <p>« Une pression basse dans le circuit d'alimentation génère une coupure d'alimentation en combustible par une ou plusieurs vannes motorisées ou l'arrêt des pompes de gavage ».</p> <p><u>Normes NF EN 12952-8 et NF EN 12593-7 :</u></p> <p>Ces normes définissent les exigences applicables aux équipements de chauffe, respectivement des chaudières à tubes d'eau et tubes de fumées, produisant de la vapeur ou de l'eau surchauffée et fonctionnant aux combustibles liquides ou gazeux.</p> <p><u>Commun TE/TF :</u> « La tuyauterie d'alimentation en combustible doit être munie d'un dispositif fiable de sectionnement à manœuvre rapide (sécurité principale de combustible) placé en lieu sûr. Ce dispositif doit couper, de manière fiable, l'alimentation en combustible de la chaufferie ou aux abords de la chaudière et doit pouvoir être actionné manuellement ou par commande à distance ou par un interrupteur d'urgence. »</p> <p><u>TE :</u> « La tuyauterie d'alimentation en combustible doit être équipée de deux dispositifs de sectionnement de sécurité disposés en série immédiatement en amont de chaque brûleur ou groupe de brûleur.</p> <p>Un dispositif de sectionnement d'urgence à commande manuelle doit être installé immédiatement en amont du brûleur, ou en amont de chaque groupe de brûleurs. »</p> <p><u>Point de vigilance :</u></p> <p>Cette barrière n'est pas efficace dans le cas de petites fuites.</p>
<p>Résistance aux contraintes spécifiques</p>	<p>Valider le fonctionnement des détecteurs de pression dans leur contexte d'utilisation</p>
<p>Références</p>	
<p>http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/pulverulents/pulverulent_captur_pression_V1.pdf</p> <p>http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_vanne_V2.pdf</p>	

4.5 TUYAUTERIES DE GAZ

Libellé de la barrière	TuyGaz3 : Fermer la vanne d'alimentation sur détection de pression basse
Installation & système	Tuyauteries de gaz extérieur / intérieur chaufferie
Scénario	Perte de confinement de la tuyauterie de gaz à l'extérieur/l'intérieur de la chaufferie
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection de pression basse → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer que la vanne d'alimentation du gaz valorisée ici est bien différente de celle valorisée dans la barrière TuyGaz4 : Fermer la 2e vanne d'alimentation sur détection gaz.
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« Dans les installations alimentées en combustible gazeux, la coupure de l'alimentation en gaz sera assurée par deux vannes automatiques redondantes, placées en série sur la conduite d'alimentation en gaz à l'extérieur des bâtiments, s'il y en a.</p> <p>Ces vannes sont asservies chacune à [...] un dispositif de baisse de pression³. Ces vannes assurent la fermeture de l'alimentation en combustible gazeux lorsqu'une fuite de gaz est détectée.</p> <p>La position ouverte ou fermée de ces organes est clairement identifiable par le personnel d'exploitation. » Art. 63. II</p> <p>+ Idem TuyCombLiq4</p> <p>La <u>norme NF EN 32 020-4</u> définit des prescriptions particulières relatives aux installations fonctionnant aux combustibles gazeux commerciaux.</p> <p>« Une pression basse dans le circuit d'alimentation génère une coupure d'alimentation en combustible par une ou plusieurs vannes motorisées ».</p> <p><u>Normes NF EN 12952-8 et NF EN 12593-7 :</u></p> <p>Idem TuyCombLiq4</p> <p>+ Pour les combustibles gazeux, un régulateur de pression doit être prévu dans la tuyauterie d'alimentation de chaque équipement de chauffe, sauf si cette fonction est assurée par le poste de livraison. La fiabilité du régulateur de pression de gaz et son dispositif de sécurité associé doit être prouvée par des essais de composant ou par un essai individuel dans le cadre de réception du système. »</p>

³ « Ce dispositif permet de détecter une chute de pression dans la tuyauterie. Son seuil est aussi élevé que possible, compte tenu des contraintes d'exploitation » (Arrêté du 26/08/2013 (A / D))

	<p>La norme NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) indique de façon claire les principales mesures de sécurité inhérentes aux chaudières à gaz, et cite entre autres les 2 vannes de sécurité à fermeture rapide en série, chacune avec un contrôleur de fermeture, sur la canalisation de gaz en amont de la chaudière.</p> <p>Point de vigilance :</p> <p>Cette barrière n'est pas efficace dans le cas de petites fuites.</p>
Résistance aux contraintes spécifiques	Valider le fonctionnement des détecteurs de pression dans leur contexte d'utilisation
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/pulverulents/pulverulent_capteur_pression_V1.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_vanne_V2.pdf	

Libellé de la barrière	TuyGaz4 : Fermer la 2e vanne d'alimentation sur détection gaz
Installation & système	Tuyauteries de gaz extérieur / intérieur chaufferie
Scénario	Perte de confinement de la tuyauterie de gaz à l'extérieur/l'intérieur de la chaufferie
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection gaz → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer que la vanne d'alimentation du gaz valorisée ici est bien différente de celle valorisée dans la barrière TuyGaz3 : Fermer la vanne d'alimentation sur détection de pression basse.
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</p> <p>« Dans les installations alimentées en combustible gazeux, la coupure de l'alimentation en gaz sera assurée par deux vannes automatiques redondantes, placées en série sur la conduite d'alimentation en gaz à l'extérieur des bâtiments, s'il y en a.</p> <p>Ces vannes sont asservies chacune à des capteurs de détection de gaz [...]. Ces vannes assurent la fermeture de l'alimentation en combustible gazeux lorsqu'une fuite de gaz est détectée.</p> <p>[...]</p> <p>Un dispositif de détection de gaz déclenchant, selon une procédure préétablie, une alarme en cas de dépassement des seuils de danger est mise en place dans les installations utilisant un combustible gazeux afin de prévenir l'apparition d'une atmosphère explosive.</p>

	<p><i>Ce dispositif coupe l'arrivée du combustible et interrompt l'alimentation électrique, à l'exception de l'alimentation des matériels et des équipements destinés à fonctionner en atmosphère explosive, de l'alimentation en très basse tension et de l'éclairage de secours, sans que cette manœuvre puisse provoquer d'arc ou d'étincelle pouvant déclencher une explosion. Un dispositif de détection d'incendie équipe les installations implantées en sous-sol.</i></p> <p><i>L'emplacement des détecteurs de gaz est déterminé par l'exploitant en fonction des risques de fuite et d'incendie. Leur situation est repérée sur un plan.</i></p> <p><i>Toute détection de gaz dans l'atmosphère du local, au-delà de 30 % (établissements A) / 60% (établissements D) de la limite inférieure d'explosivité, conduit à la mise en sécurité de tout ou partie de l'installation susceptible d'être en contact avec l'atmosphère explosive ou de conduire à une explosion, sauf les matériels et équipements dont le fonctionnement pourrait être maintenu conformément aux dispositions prévues à l'article 60 du présent arrêté. Cette mise en sécurité est prévue dans les consignes d'exploitation. » Art. 63. II / III</i></p> <p><i>+ Idem TuyCombLiq4</i></p> <p><u>Normes NF EN 12952-8 et NF EN 12593-7 :</u></p> <p><i>Idem TuyCombLiq4</i></p> <p><u>Norme NFPA 85</u></p> <p><i>Idem TuyGaz3</i></p> <p>Différentes configurations de chaîne de sécurité gaz à mettre en place en fonction de la puissance de la chaudière</p>
Résistance aux contraintes spécifiques	Valider le fonctionnement des détecteurs de gaz dans leur contexte d'utilisation
Niveau de confiance (NC)	
Niveau de confiance maximal (Système simple ou complexe - Tolérance aux anomalies matérielles)	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« une redondance est assurée par la présence d'au moins deux capteurs » Art. 63. II</p>
Test / Maintenance	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« Les détecteurs de gaz sont contrôlés régulièrement et les résultats de ces contrôles sont consignés par écrit. La fiabilité des détecteurs est adaptée aux exigences de l'article 60 de l'arrêté du 26/08/2013. Des étalonnages sont régulièrement effectués. » Art. 63. III</p> <p>« L'exploitant veille au bon entretien des dispositifs de réglage, de contrôle, de signalisation et de sécurité. Ces vérifications et leurs résultats sont consignés par écrit. » Art. 62. I</p>
Références	
<p>http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/pulverulents/pulverulent_capteur_pression_V1.pdf</p> <p>http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_vanne_V2.pdf</p>	

4.6 STOCKAGE ET TRANSFERT DE PROPANE

Libellé de la barrière	Prop3 : Détecter l'incendie et refroidir la bouteille
Installation & système	Stockage et circuit propane
Scénario	Surpression dans une bouteille de propane
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Déluge sur la zone de stockage de propane suite à détection incendie ou détection humaine → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Éléments à vérifier (liste non exhaustive) : <ul style="list-style-type: none"> • Détecteurs adaptés à la détection incendie • Détecteurs positionnés de façon adéquate • Moyens mobiles adaptés (produit, débits, autonomie, etc.)
Résistance aux contraintes spécifiques	Conditions météorologiques (ex : gel, etc.) Fonctionnement des détecteurs en zone ATEX
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_detecteur_flamme_V1.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_eau_V2.pdf http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_arrosage_mousse_V2.pdf	

4.7 FONCTIONNEMENT DE LA CHAUDIÈRE

4.7.1 Prescriptions générales

L'arrêté du 26/08/2013 relatif aux installations de combustion (soumises à autorisation ou à déclaration) définit des prescriptions générales relatives à la sécurité des installations de chaudières. Elles sont rappelées ci-dessous.

Art.58 de l'arrêté du 26/08/2013 (A / D) :

« Art. 58. – I. – Les installations sont exploitées sous la surveillance permanente d'un personnel qualifié. **Il vérifie périodiquement le bon fonctionnement des dispositifs de sécurité** et s'assure de la bonne alimentation en combustible des appareils de combustion.

Par dérogation aux dispositions ci-dessus, l'exploitation sans surveillance humaine permanente est admise lorsque l'installation répond aux dispositions réglementaires applicables, notamment celles relatives aux équipements sous pression.

II. – L'ensemble des opérateurs reçoit une **formation initiale adaptée**. Une **formation complémentaire annuelle à la sécurité** d'une durée minimale d'une journée leur est dispensée par un organisme ou un service compétent. Cette formation portera en particulier sur la conduite des installations, les opérations de maintenance, les moyens d'alerte et de secours, la lecture et la mise à jour des consignes d'exploitation. L'exploitant tient à la disposition de l'inspection des installations classées un document attestant de cette formation : contenu, date et durée de la formation, liste d'émargement.

III. – L'exploitant consigne par écrit les **procédures de reconnaissance et de gestion des anomalies de fonctionnement** ainsi que celles relatives aux interventions du personnel et aux vérifications périodiques du bon fonctionnement de l'installation et des dispositifs assurant sa mise en sécurité. Ces procédures précisent la fréquence et la nature des vérifications à effectuer pendant et en dehors de la période de fonctionnement de l'installation. »

Art.61 de l'arrêté du 26/08/2013 (A / D) :

« Art. 61. – I. – La conduite des installations (démarrage et arrêt, fonctionnement normal, entretien...) fait l'objet de **consignes d'exploitation et de sécurité écrites** qui sont rendues disponibles pour le personnel. Ces consignes prévoient notamment :

- les modes opératoires ;
- la **fréquence de contrôle des dispositifs de sécurité** et de traitement des pollutions et nuisances générées par l'installation ;
- les **instructions de maintenance** et de nettoyage, la **périodicité de ces opérations** et les consignations nécessaires avant de réaliser ces travaux ;
- les conditions de délivrance des « permis d'intervention » prévus à l'article 62 du présent arrêté ;
- les **modalités d'entretien**, de contrôle et d'utilisation des équipements de régulation et des dispositifs de sécurité ;
- la conduite à tenir en cas d'indisponibilité d'un dispositif de réduction des émissions, tel que prévu à l'article 16 du présent arrêté.

Ces consignes sont régulièrement mises à jour.

II. – Sans préjudice des dispositions du code du travail, des **procédures d'urgence** sont établies et rendues disponibles dans les lieux de travail. Ces procédures indiquent notamment :

- les mesures à prendre en cas de fuite sur un récipient ou une canalisation contenant des substances dangereuses ou inflammables ainsi que les conditions de rejet prévues au titre IV du présent arrêté ;
- les moyens d'extinction à utiliser en cas d'incendie ;
- la conduite à tenir pour procéder à l'arrêt d'urgence et à la mise en sécurité de l'installation ;

– la procédure d'alerte avec les numéros de téléphone du responsable d'intervention de l'établissement, des services d'incendie et de secours, etc. (affichage obligatoire).

Ces procédures sont régulièrement mises à jour. »

4.7.2 Barrières identifiées sur les nœuds papillon

Libellé de la barrière	Chaud1 : Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur la pression de combustible en entrée de la chambre de combustion → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer de l'indépendance avec les barrières suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Chaud2 : Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O₂) anormal dans la chambre de combustion • Chaud3 : Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion • Chaud4 : Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion Notamment l'indépendance des moyens de traitement de l'information (automate) et d'action (vannes de sectionnement)
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	La norme NF EN 746-2 fixe les prescriptions de sécurité concernant la combustion et la manutention des combustibles. Elle identifie entre autres : <ul style="list-style-type: none"> - un régulateur de pression de gaz pour contrôler la pression et le débit de gaz, - des détecteurs de débit et de pression d'air (pour éviter un défaut d'air) comme éléments de sécurité obligatoires.

Libellé de la barrière	Chaud2 : Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O ₂) anormal dans la chambre de combustion
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur le rapport air/gaz dans la chambre de combustion → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer de l'indépendance avec les barrières suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Chaud1 : Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion • Chaud3 : Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion • Chaud4 : Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion Notamment l'indépendance des moyens de traitement de l'information (automate) et d'action (vannes de sectionnement)
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	La <u>norme NF EN 746-2</u> fixe les prescriptions de sécurité concernant la combustion et la manutention des combustibles. Elle identifie entre autres : <ul style="list-style-type: none"> - un régulateur de pression de gaz pour contrôler la pression et le débit de gaz, - des détecteurs de débit et de pression d'air (pour éviter un défaut d'air) comme éléments de sécurité obligatoires. <p><u>Norme NF EN 12952-8 :</u></p> <i>Cette norme définit les exigences applicables aux équipements de chauffe des chaudières à tubes d'eau produisant de la vapeur ou de l'eau surchauffée et fonctionnant aux combustibles liquides ou gazeux de la chaudière.</i> <p>« Le rapport air/combustible doit être commandé dans des limites admissibles et qu'en cas d'écarts inadmissibles, par rapport à la valeur déterminée par le fabricant de l'équipement de chauffe et devant être spécifiée dans les instructions d'exploitation, l'alimentation en combustible doit être coupée. Le circuit de contrôle du rapport air/combustible doit être indépendant du circuit de régulation. »</p>

	<p><u>Norme NF EN 12953-7 :</u></p> <p><i>Cette norme définit les exigences applicables aux équipements de chauffe des chaudières à tubes de fumées produisant de la vapeur ou de l'eau surchauffée et fonctionnant aux combustibles liquides ou gazeux de la chaudière.</i></p> <p><i>« Une alimentation non limitée en air de la chaudière et de la chaufferie doit être assurée. »</i></p> <p><i>La norme NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) indique de façon claire les principales mesures de sécurité inhérentes aux chaudières à gaz, et cite entre autres le système de contrôle de combustion régulant les débits de gaz et d'air pour assurer une combustion continue et une flamme stabilisée quelque soient les conditions opératoires.</i></p> <p><i>Le taux de débit d'air de combustion optimal est fourni par la NFPA 31 (Standard for the installation of oil burning equipment) et la NFPA 54 (National fuel gas code).</i></p>
--	---

Libellé de la barrière	Chaud3 : Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur la présence de la flamme dans la chambre de combustion → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer de l'indépendance avec les barrières suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Chaud1 : Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion • Chaud2 : Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O₂) anormal dans la chambre de combustion • Chaud4 : Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion Notamment l'indépendance des moyens de traitement de l'information (automate) et d'action (vannes de sectionnement)
Efficacité	

Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u></p> <p>« Les appareils de combustion comportent un dispositif de contrôle de la flamme [...]. Le défaut de son fonctionnement entraîne la mise en sécurité des appareils et l'arrêt de l'alimentation en combustible. Art. 64. II</p> <p>Un organe de coupure rapide équipe chaque appareil de combustion au plus près de celui-ci. » Art. 63. V</p> <p>La norme NF EN 32 020 indique que lors d'un défaut sur la cellule de contrôle de flamme, l'équipement de chauffe se met en sécurité.</p> <p>La norme NF EN 746-2 fixe les prescriptions de sécurité concernant la combustion et la manutention des combustibles. Elle identifie entre autres le dispositif de surveillance de flamme comme élément de sécurité obligatoire.</p> <p><u>Normes NF EN 12952-8 et NF EN 12593-7 :</u></p> <p>Ces normes définissent les exigences applicables aux équipements de chauffe, respectivement des chaudières à tubes d'eau et tubes de fumées, produisant de la vapeur ou de l'eau surchauffée et fonctionnant aux combustibles liquides ou gazeux.</p> <p>« Les dispositifs de contrôle de flamme doivent être autocontrôlés pendant l'exploitation. »</p> <p>La norme NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) indique de façon claire les principales mesures de sécurité inhérentes aux chaudières à gaz, et cite entre autres le détecteur de flamme dans la chambre de combustion.</p>
---	---

Libellé de la barrière	Chaud4 : Couper l'alimentation en combustible sur température anormale dans la chambre de combustion
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur la température dans la chambre de combustion → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non S'assurer de l'indépendance avec les barrières suivantes : <ul style="list-style-type: none"> • Chaud1 : Couper l'alimentation en combustible sur pression haute ou basse de combustible en entrée de la chambre de combustion • Chaud2 : Couper l'alimentation en combustible sur rapport air/combustible (par ex analyse de CO ou O₂) anormal dans la chambre de combustion • Chaud3 : Couper l'alimentation en combustible si absence de flamme dans la chambre de combustion

	Notamment l'indépendance des moyens de traitement de l'information (automate) et d'action (vannes de sectionnement)
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u> « Les appareils de combustion comportent [...] un contrôle de température. Le défaut de son fonctionnement entraîne la mise en sécurité des appareils et l'arrêt de l'alimentation en combustible. Art. 64. II Un organe de coupure rapide équipe chaque appareil de combustion au plus près de celui-ci. » Art. 63. V

Libellé de la barrière	Chaud5 : Prévenir les fuites sur les organes relatifs au combustible lors de l'arrêt de la chaudière
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Actions de contrôle d'étanchéité, purge, etc. identifiées dans la procédure de mise en service / d'arrêt de la chaudière → Barrière humaine
Type de mesure	<input checked="" type="checkbox"/> Pré-dérive <input type="checkbox"/> Rattrapage de dérive
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	Identification claire des actions dans la procédure de mise en service / d'arrêt de la chaudière
Résistance aux contraintes spécifiques	Être vigilant à la protection des acteurs lors des actions de purge par exemple (port des EPI adaptés, etc.)

Libellé de la barrière	Chaud6 : Balayer l'air de la chambre de combustion avant ré-allumage
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant redémarrage
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Action de balayage intégrée dans la séquence de ré-allumage de la chaudière → Dispositif technique actif
Indépendance	

Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p>La norme NF EN 746-2 fixe les prescriptions de sécurité concernant la combustion et la manutention des combustibles. Elle identifie entre autres un dispositif d'air de combustion et de pré balayage de la chambre de combustion comme élément de sécurité obligatoire.</p> <p>Normes NF EN 12952-8 et NF EN 12593-7 :</p> <p>Ces normes définissent les exigences applicables aux équipements de chauffe, respectivement des chaudières à tubes d'eau et tubes de fumées, produisant de la vapeur ou de l'eau surchauffée et fonctionnant aux combustibles liquides ou gazeux.</p> <p>« Avant toute mise en marche d'un équipement de chauffe, les circuits de cheminement des gaz de combustion doivent être balayés de manière efficace. »</p> <p>La norme NFPA 85 (Boiler and combustion systems hazards code) indique de façon claire les principales mesures de sécurité inhérentes aux chaudières à gaz, et cite entre autres la procédure de démarrage et de ventilation.</p>

Libellé de la barrière	Chaud7 : Détecter la présence de flammes et refroidir la capacité d'eau
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE ou calandre pour TF)
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Déluge dans la chaufferie sur détection incendie → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</p> <p>« L'installation est dotée de moyens de lutte contre l'incendie appropriés aux risques et conformes aux normes en vigueur. » Art. 59. III</p> <p>Norme NF EN 746-1 :</p> <p>§ 5.8.3 : « L'équipement doit être doté de moyens appropriés</p>

	<p>permettant de prévenir ou minimiser les risques incendie et/ou d'explosion. Ces moyens doivent inclure le cas échéant :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des pare-flammes ; - des dispositifs de coupure d'alimentation du combustible et des dispositifs de verrouillage ; - des moyens de refroidissement de l'équipement ou des pièces à traiter ; - des détecteurs d'incendie ; - des détecteurs de gaz. » <p>§ 5.11.2 : secours des énergies et fluides auxiliaires (air comprimé, etc.)</p> <p>Éléments à vérifier :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Détecteurs adaptés à la détection incendie • Détecteurs positionnés de façon adéquate • Déluge adapté (produit, débits, autonomie, etc.) • Positionnement des vannes et buses d'aspersion
Résistance aux contraintes spécifiques	Conditions météorologiques (ex : gel, bouchage de buses, etc.) Fonctionnement des détecteurs en zone ATEX
Niveau de confiance (NC)	
Test / Maintenance	Arrêté du 26/08/2013 (A / D) : « ces matériels sont maintenus en bon état et vérifiés au moins une fois par an » Art. 59. III
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_decteur_flamme_V1.pdf	

Libellé de la barrière	Chaud8 : Couper l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE ou calandre pour TF)
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en combustible sur détection de pression haute dans la chaudière → Système instrumenté de sécurité ou système à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et	Les normes NF EN 12952-7 et NF EN 12953-6 définissent les exigences pour l'équipement relatif à la sécurité,

positionnement	<p>respectivement des chaudières à tubes d'eau et à tubes de fumées.</p> <p>Elles prescrivent entre autres les spécifications générales suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Protections contre les excès de pression - Dispositifs limiteurs et circuits de sécurité <p>Elles prescrivent entre autres les spécifications particulières suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dispositifs de mesurage de la pression et de la température - Indication de la pression et de la température de la vapeur, - Dispositifs limiteurs (niveau bas, pression, température)
-----------------------	---

Libellé de la barrière	Chaud9 : Évacuer la surpression générée dans la capacité d'eau
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau / tubes de fumées
Scénario	<p>Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE ou calandre pour TF)</p> <p>Remise en eau sur les tubes de fumées surchauffés et éclatement de la calandre</p>
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Soupape de sécurité de la chaudière → Dispositif technique actif
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Normes NF EN 12952-10 et NF EN 12953-8 :</u></p> <p><i>Ces normes spécifient les exigences relatives à la protection vis-à-vis des excès de pression des chaudières, respectivement à tubes d'eau et à tubes de fumées.</i></p> <p><u>Commun :</u> « Il ne doit pas y avoir de dispositif de sectionnement entre la chaudière et ses dispositifs de sécurité de protection ou entre les dispositifs de sécurité et leurs points de décharge. »</p> <p><u>TE :</u> « chaque générateur de vapeur et chaque compartiment chauffé isolable (resurchauffeur, surchauffeur, économiseur) doit être équipé d'au moins un dispositif de sécurité approprié qui doit protéger contre les pressions excessives.</p> <p><i>La capacité de décharge totale certifiée de tous les dispositifs de sécurité installés sur la chaudière doit être au moins égale au débit maximal continu de la chaudière. »</i></p> <p><u>TF :</u> « les chaudières doivent être équipées d'au moins un dispositif de sécurité dimensionné pour le débit nominal de la chaudière qui doit prévenir d'une pression excessive.</p> <p><i>Le dispositif de sécurité doit être réglé pour s'ouvrir à une pression qui ne doit pas être supérieure à la pression maximale admissible de l'installation à laquelle il est raccordé. »</i></p> <p>La soupape de sécurité de la chaudière doit a minima être</p>

	dimensionnée sur les scénarios de montée en pression suivants : <ul style="list-style-type: none"> • cas feu • cas défaut de régulation de pression • cas de vaporisation brutale d'eau si arrivée d'eau sur tubes de fumées surchauffés (scénario de dénoyage des tubes de fumées)
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_soupape_securite_V2_1.pdf	

Libellé de la barrière	TF1 : Couper l'alimentation en eau sur niveau bas d'eau dans la calandre
Installation & système	Chaudière à tubes de fumées
Scénario	Remise en eau sur les tubes de fumées surchauffés et éclatement de la calandre
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Asservissement de l'alimentation en eau sur détection de niveau bas d'eau dans la chaudière → Mesure de maîtrise des risques instrumentée : automatique ou à action manuelle de sécurité
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Arrêté du 26/08/2013 (A / D) :</u> « En cas d'anomalies provoquant l'arrêt de l'installation, celle-ci est protégée contre tout déverrouillage intempestif. Toute remise en route automatique est alors interdite. Le réarmement ne peut se faire qu'après élimination des défauts par du personnel d'exploitation, au besoin après intervention sur le site. » Art. 58. III</p> <p><u>Norme NF EN 12953-6 :</u> Cette norme définit les exigences pour l'équipement relatif à la sécurité des chaudières à tubes de fumées. Elle prescrit entre autres les spécifications particulières suivantes : <ul style="list-style-type: none"> - Indication du niveau d'eau, - Alimentation en eau, régulation de l'eau d'alimentation, - Dispositifs limiteurs (niveau bas, pression, température) </p> <p><u>Norme NF EN 12953-9 :</u> Cette norme spécifie les exigences de conception et l'examen des fonctionnalités des limiteurs (ou dispositifs de limitation) intégrés dans les systèmes de sécurité des chaudières à tubes de fumées. « Un limiteur comprend un capteur et des éléments de contrôle permettant d'obtenir le niveau de fiabilité requis. Afin d'assurer la fonction de sécurité requise, par exemple pour couper l'alimentation en chaleur de la chaudière en cas de niveau bas</p>

	<i>d'eau, le limiteur est raccordé à d'autres éléments dans le système de sécurité tels que des actionneurs et des circuits logiques de sécurité. »</i>
--	---

Libellé de la barrière	TE1 : Évacuer la surpression générée dans le surchauffeur
Installation & système	Chaudière à tubes d'eau
Scénario	Surpression dans le surchauffeur
Nature des éléments constitutifs de la barrière	Soupape de sécurité du surchauffeur → Dispositif technique actif
Indépendance	
Le scénario entraîne-t-il une défaillance de la barrière ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Une défaillance de la barrière est-elle à l'origine du scénario ?	<input type="checkbox"/> Oui / <input checked="" type="checkbox"/> Non
Indépendance avec d'autres barrières sur le scénario	<input checked="" type="checkbox"/> Oui / <input type="checkbox"/> Non
Efficacité	
Dimensionnement adapté et positionnement	<p><u>Normes NF EN 12952-10 :</u> <i>Cette norme spécifie les exigences relatives à la protection vis-à-vis des excès de pression des chaudières à tubes d'eau. « Chaque générateur de vapeur et chaque compartiment chauffé isolable (resurchauffeur, surchauffeur, économiseur) doit être équipé d'au moins un dispositif de sécurité approprié qui doit protéger contre les pressions excessives. Il ne doit pas y avoir de dispositif de sectionnement entre la chaudière et ses dispositifs de sécurité de protection ou entre les dispositifs de sécurité et leurs points de décharge. La capacité de décharge totale certifiée de tous les dispositifs de sécurité installés sur la chaudière doit être au moins égale au débit maximal continu de la chaudière. »</i></p>
Références	
http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/GIL/GIL_soupape_securite_V2_1.pdf	

ANNEXE 5 – CARACTÉRISATION DE L'INTENSITÉ

1. RAPPEL DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX MODÉLISÉS

Pour rappel, les phénomènes dangereux modélisés à la suite des APR sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Système étudié	Sous-système	Evénements redoutés centraux	Phénomènes dangereux	Remarques (modélisation)
Installations liées au combustible liquide	Bacs de stockage de combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement au niveau de l'aire de stockage de combustible liquide	StockCombLiq_PhD1: Feu de cuvette StockCombLiq_PhD2: Pressurisation lente de bac	Fonction du diamètre de la cuvette Fonction du volume du bac, pour plusieurs pressions de rupture
		ATEX dans le ciel gazeux du bac de combustible liquide	StockCombLiq_PhD3: Explosion du ciel gazeux du bac StockCombLiq_PhD4: Feu de bac StockCombLiq_PhD4a: Boilover classique (FL / biodiesel à définir) StockCombLiq_PhD4b: Boilover couche mince (FOD / biodiesel à définir)	Fonction du volume du bac Fonction du diamètre du bac Fonction du volume de liquide dans le bac et de la hauteur du bac
	Tuyauteries combustible liquide	Epanchage suite à perte de confinement de la tuyauterie de combustible liquide à l'extérieur / intérieur de la chaufferie	TuyCombLiq_PhD1: Feu de nappe	Fonction du diamètre du feu de nappe
Installations liées au combustible gazeux	Tuyauteries gaz	Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'extérieur de la chaufferie	TuyGaz_PhD1: Feu torche TuyGaz_PhD2: UVCE / flash fire	Fonction du diamètre de fuite, pour plusieurs pressions d'alimentation Rejet vertical pour tuyauterie enterrée ¹ Rejet horizontal pour tuyauterie aérienne ²
		Perte de confinement des tuyauteries de gaz naturel à l'intérieur de la chaufferie	TuyGaz_PhD1: Feu torche TuyGaz_PhD3: VCE (explosion de la chaufferie)	Fonction du diamètre de fuite, pour plusieurs pressions d'alimentation Rejet vertical pour tuyauterie enterrée ¹ Rejet horizontal pour tuyauterie aérienne ² Fonction du volume de la chaufferie et des surfaces d'ouverture
		Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant re-démarrage	Chaud_PhD1a/b: Explosion de la chambre de combustion	Fonction du volume de la chambre de combustion
Chaudières tubes d'eau (TE) / tubes de fumées (TF)	Brûleur / chambre de combustion	Accumulation de gaz ou de vapeurs inflammables dans la chambre de combustion avant re-démarrage	Chaud_PhD1a/b: Explosion de la chambre de combustion	Fonction du volume de la chambre de combustion
	Capacité d'eau (ballon d'eau pour TE / calandre pour TF)	Surpression dans la capacité d'eau (ballon d'eau pour TE, calandre pour TF)	Chaud_PhD2: BLEVE de la capacité d'eau	Fonction du volume de la capacité d'eau et de la pression de rupture

¹ Pour une tuyauterie enterrée, l'usage est de prendre un rejet vertical (sauf cas particulier). Cet usage est en accord avec les recommandations du guide GESIP EDD sur les canalisations de transport.

² Un rejet horizontal donne des effets plus importants. Pour une tuyauterie aérienne, sur laquelle il n'y a a priori aucune contrainte d'orientation de rejet, c'est donc le rejet horizontal qui est considéré (sauf cas particulier).

Tableau 1: Synthèse des phénomènes dangereux modélisés

L'objet de cette annexe est de présenter les résultats de modélisation obtenus en termes de distances d'effets.

Point de vigilance

Les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeur permettant d'avoir un regard critique sur des distances d'effets obtenues pour une installation donnée dans le cadre d'une étude de dangers.

2. STOCKAGE DE COMBUSTIBLE LIQUIDE

2.1 STOCKCOMBLIQ_PHD1 : FEU DE CUVETTE

Pour calculer les effets du feu de cuvette, l'outil « Feu de nappe » disponible sur la plateforme Primarisk est utilisé. Cet outil est décrit en annexe de la circulaire du 31 janvier 2007 relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables. Les conditions atmosphériques, en particulier la vitesse de vent (5 m/s), sont fixées aux valeurs préconisées par le GTDLI. Le produit LI-Hydrocarbures est utilisé pour représenter le FL, le FOD et le biodiesel. Les résultats de distances aux seuils thermiques calculées en fonction du diamètre de la cuvette sont présentés Figure 7. Les distances sont données à hauteur d'homme et à partir du centre de la cuvette.

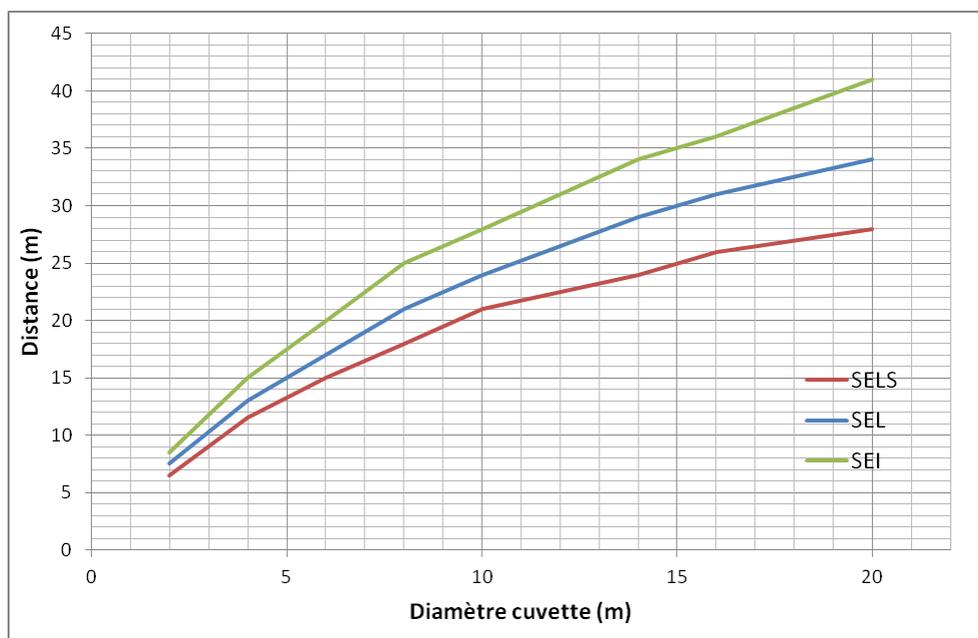


Figure 7 : Feu de cuvette - Distances aux seuils d'effets thermiques du feu de cuvette (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

2.2 STOCKCOMBLIQ_PHD2 : PRESSURISATION LENTE DE BAC

Le phénomène de pressurisation de bac peut se produire lorsque le réservoir atmosphérique est pris dans un feu enveloppant. Il se caractérise par une montée en pression relativement lente, du fait de la vaporisation du produit contenu. La pression atteinte par le gaz peut alors être importante et lorsque l'enveloppe du réservoir cède, une boule de feu liée à une vaporisation partielle instantanée et une inflammation des produits peut être générée.

Les effets de cette boule de feu sont calculés avec l'outil « Pressurisation lente de bac atmosphérique » disponible sur la plateforme Primarisk. Conformément aux instructions de l'outil, l'Isododécane est utilisé pour représenter le FL, le FOD et le biodiesel. **Rappelons que ce modèle ne s'applique que pour les bacs atmosphériques à toit fixe pour lesquels l'utilisateur a vérifié que la liaison robe/toit céderait avant la liaison robe/fond.** À défaut, conformément à la circulaire du 23 juillet 2007, les distances d'effets liées au phénomène de pressurisation de bac peuvent être évaluées par le biais des formules des distances d'effets du boil-over.

Les paramètres dimensionnants sont le volume du bac et sa pression de rupture. Les Figure 8, Figure 9 et Figure 10 présentent l'évolution en fonction du volume de bac des résultats de distances d'effet thermique respectivement au SEI, SEL et SELS pour les trois pressions de rupture suivantes : 100, 250 et 500 mbar (relatifs).

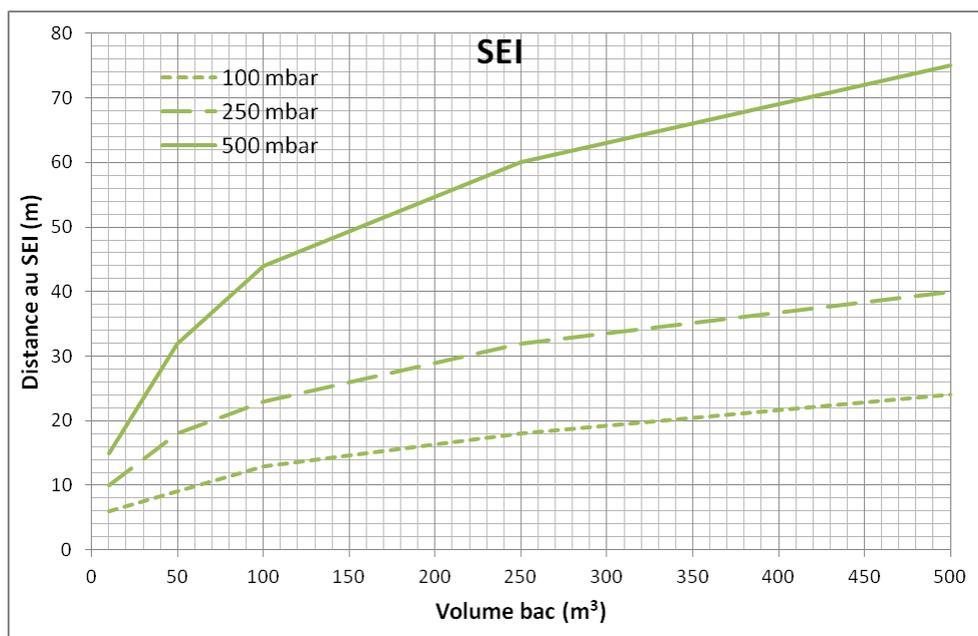


Figure 8 : Pressurisation de bac - Évolution de la distance au SEI en fonction du volume de bac pour 3 pressions de rupture : 100, 250 et 500 mbar relatifs

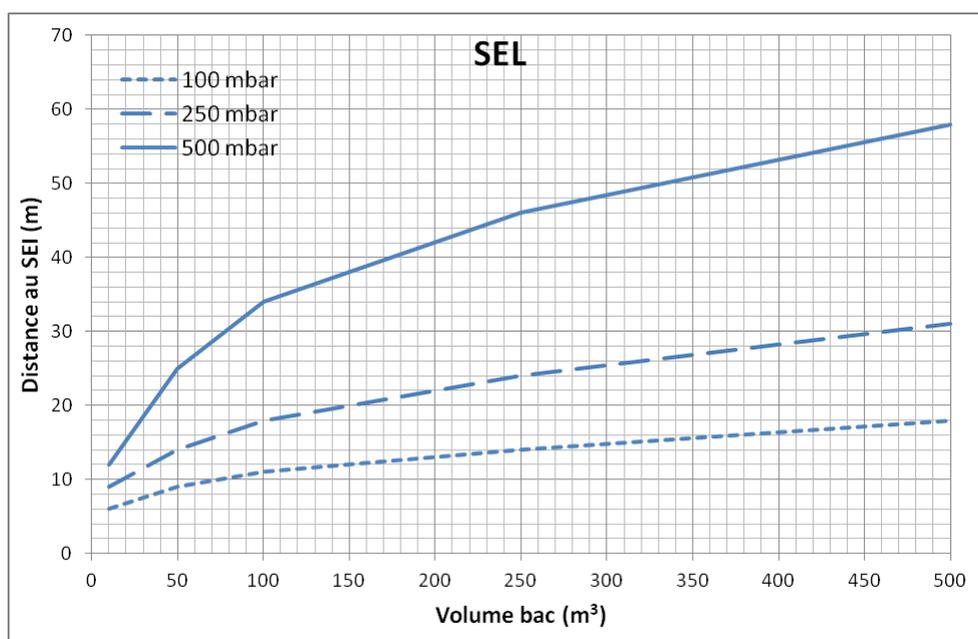


Figure 9 : Pressurisation de bac - Évolution de la distance au SEL en fonction du volume de bac pour 3 pressions de rupture : 100, 250 et 500 mbar relatifs

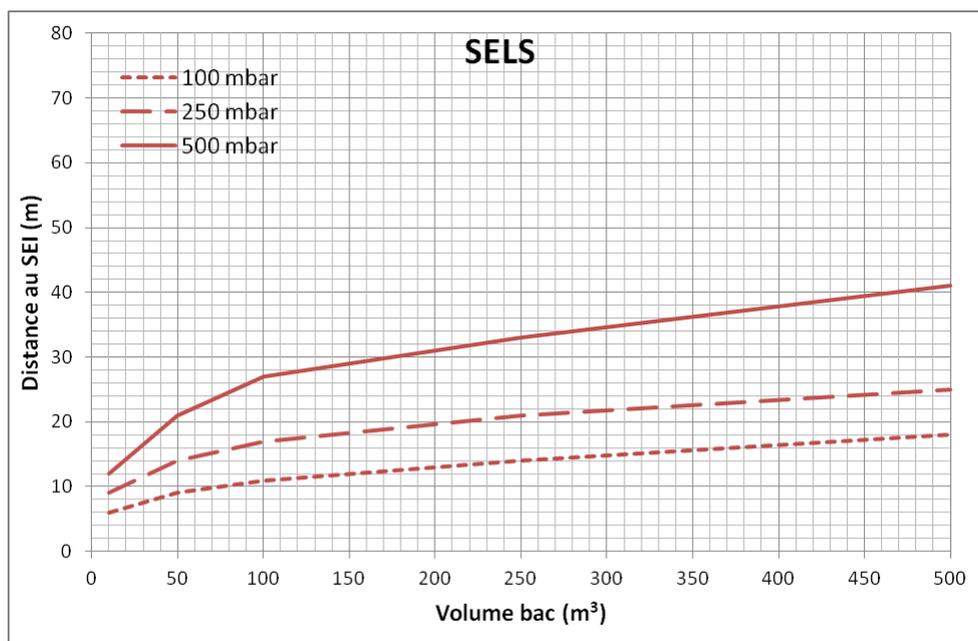


Figure 10 : Pressurisation de bac - Évolution de la distance au SELS en fonction du volume de bac pour 3 pressions de rupture : 100, 250 et 500 mbar relatifs

2.3 STOCKCOMBLIQ_PHD3 : EXPLOSION DU CIEL GAZEUX DU BAC

2.3.1 Scénarios envisagés

Le scénario retenu ici est l'explosion de bac. Les distances des effets de surpression de cette explosion seront donc calculées.

Bien que la surpression dans l'enceinte entraîne l'ouverture du toit frangible, celui-ci reste accroché au sommet du bac grâce au maintien directionnel et aucune projection de fragments n'est redoutée.

Le scénario envisagé considère le cas le plus pénalisant en termes d'effets des phénomènes dangereux. L'explosion interne intervient pour un volume de gaz maximal dans le bac en exploitation.

2.3.2 Données d'entrée

Les hypothèses de calcul de l'explosion de bac sont les suivantes :

Hauteur bac (m):	3.1	5.2	6.6	11.3
Diamètre bac (m):	2	3.5	4.4	7.5

Tableau 2 : Caractéristiques des bacs

Le calcul de l'explosion de bac a été réalisé par le biais de la feuille de calcul du GTDLI donnée dans la circulaire du 31 janvier 2007 abrogée par la circulaire du 10 mai 2010. Le rapport hauteur sur diamètre étant supérieur à 1, la pression de rupture considérée est égale à 1 bar relatif dans tous les cas étudiés.

2.3.3 Résultats

Les distances des effets de suppression d'une explosion de bac sont présentées sur le graphe suivant, les distances d'effets étant à prendre depuis le centre du bac :

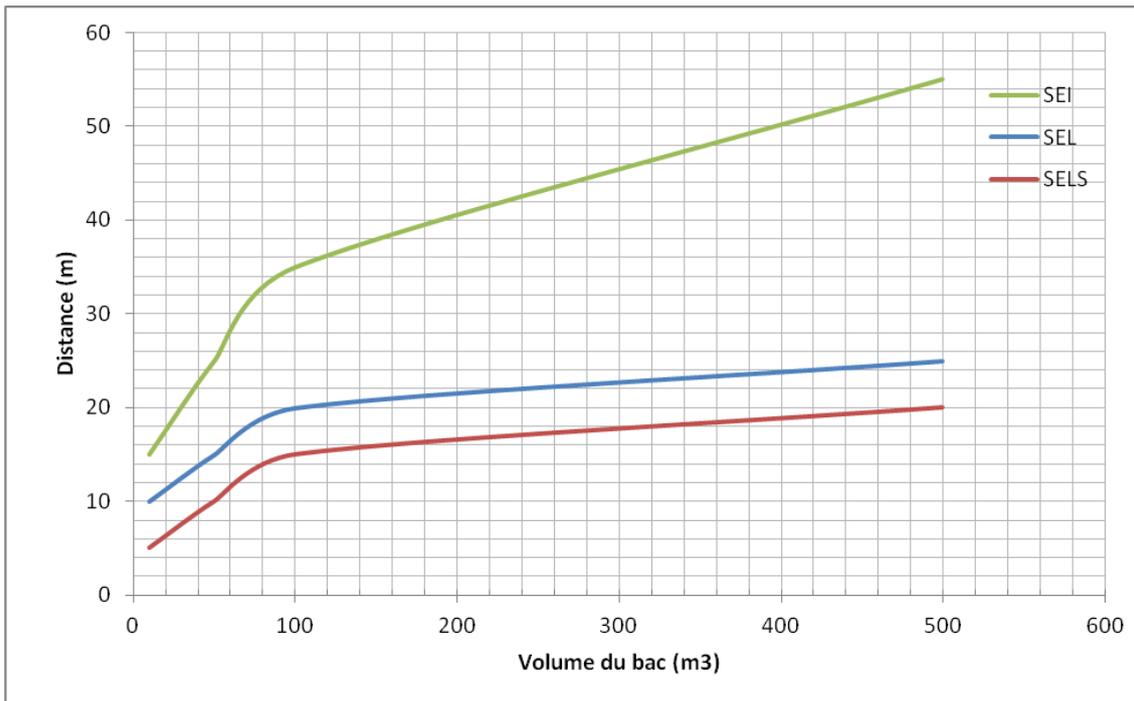


Figure 11 : Explosion de bac - Distances aux seuils d'effets de surpression

2.4 STOCKCOMBLIQ_PHD4 : FEU DE BAC

La méthodologie est la même que celle utilisée pour la modélisation du feu de cuvette (cf. paragraphe 2.1). Dans le cas présent la taille du feu de nappe est donnée par la surface du bac. Une approche paramétrique sur le diamètre du bac est suivie. La hauteur du bac est fixée à 1,5 fois le diamètre du bac.

Les distances aux seuils thermiques calculées en fonction du diamètre du bac sont présentées Figure 12. Les distances sont données à hauteur d'homme et à partir du centre du bac. Lorsque le diamètre du bac augmente, on observe deux effets antagonistes :

- la surface du feu et ses effets croissent,
- la hauteur du feu augmente éloignant sa distance avec la cible au sol.

Pour chaque seuil, cela explique l'existence d'un diamètre limite pour lequel les distances d'effets sont maximales et au-delà duquel les distances décroissent jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'effet au niveau du sol.

Attention, les effets à la hauteur du bac sont plus importants. Le lecteur intéressé pourra alors consulter le paragraphe 2.1.

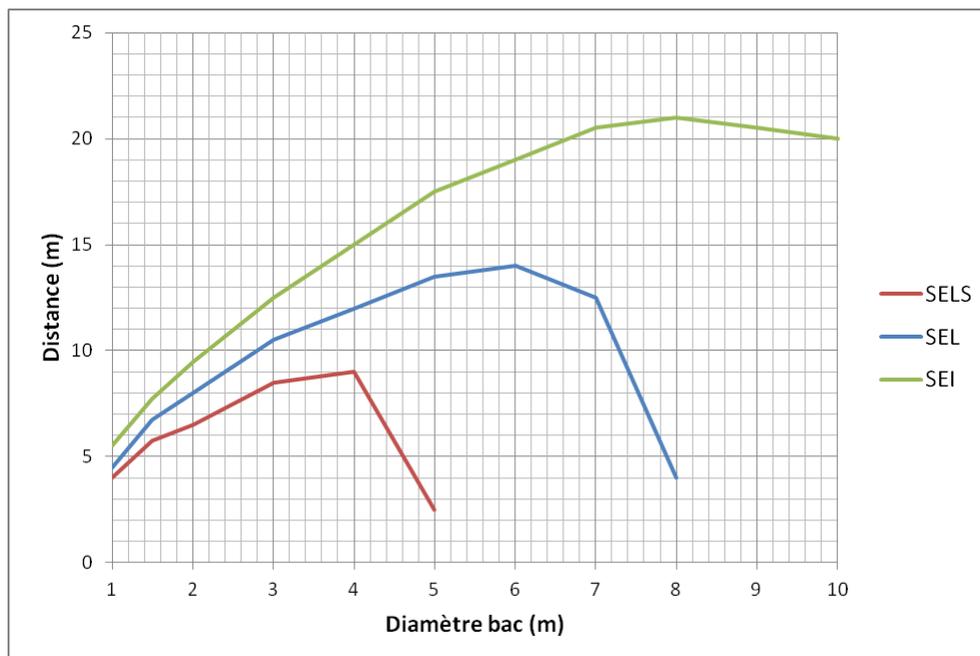


Figure 12 : Feu de bac - Distances aux seuils d'effets thermiques du feu de bac en fonction du diamètre de bac (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

2.5 STOCKCOMBLIQ_PHD4A : BOILOVER CLASSIQUE

Pour le FL, le phénomène de boil-over dit « classique » est susceptible de se produire. Pour calculer les effets du boil-over les modèles utilisés sont ceux décrits dans le rapport Oméga-13.

Les paramètres importants pour le calcul des effets du boil-over classique sont le volume du bac et le taux de remplissage. Il est considéré que la hauteur est égale à 1,5 fois le diamètre et que le bac est rempli à 80%. Les distances aux seuils thermiques calculées en fonction du volume de bac sont présentées Figure 13. Les distances sont données à hauteur d'homme.

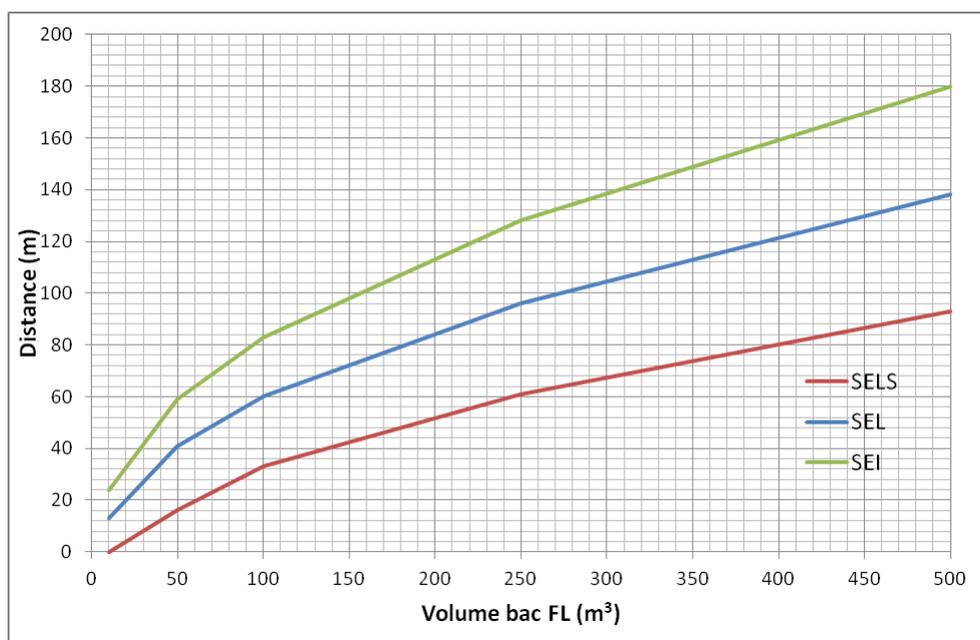


Figure 13 : Boil-over classique - Distance aux seuils d'effets thermiques en fonction du volume de bac de FL (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

2.6 STOCKCOMBLIQ_PHD4B: BOILOVER COUCHE MINCE

Pour le FOD et le biodiesel, le phénomène de boil-over classique ne peut pas se produire, il faut alors considérer le phénomène de boil-over couche mince. Pour calculer les effets du boil-over les modèles utilisés sont ceux décrits dans le rapport Oméga-13.

Les paramètres importants pour le calcul des effets du boil-over couche mince sont le diamètre du bac et le taux de remplissage. Il est considéré que la hauteur est égale à 1,5 fois le diamètre et que le bac est rempli à 80%. Les distances aux seuils thermiques calculées en fonction du diamètre de bac sont présentées Figure 14. Les distances sont données à hauteur d'homme.

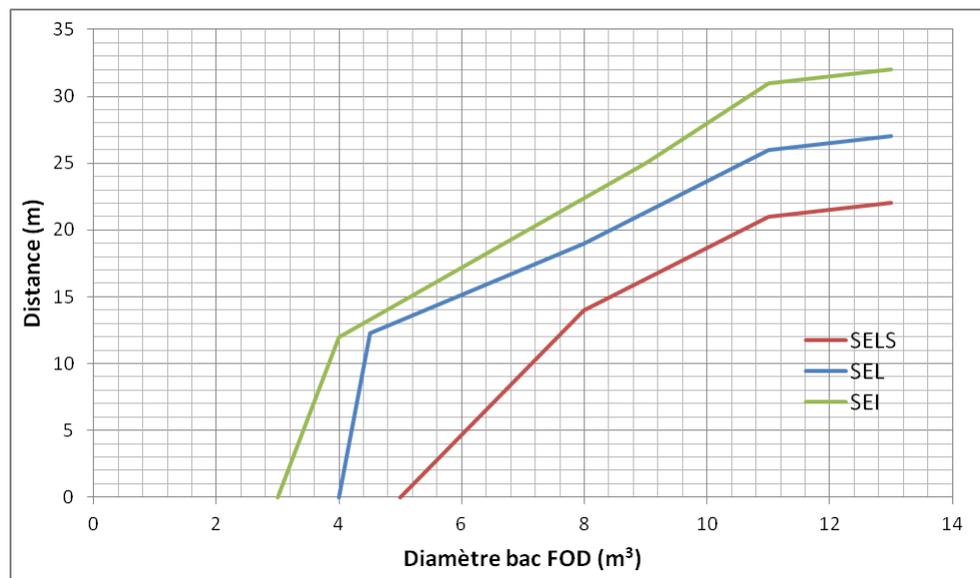


Figure 14 : Boil-over couche mince - Distance aux seuils d'effets thermiques en fonction du diamètre de bac de FOD / biodiesel (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

3. TRANSFERT DE COMBUSTIBLE LIQUIDE

3.1 TUYCOMBLIQ_PHD1 : FEU DE NAPPE

Lors d'une perte de confinement sur une tuyauterie de combustible liquide, le liquide tombe au sol et forme une nappe. En l'absence de rétention, la nappe s'étend sans limites. Deux cas de figure se présentent :

1. Si l'inflammation de la nappe est précoce, cette dernière va s'étendre jusqu'à atteindre un état d'équilibre entre le débit d'alimentation et le débit de combustion.
2. Si l'inflammation est retardée, c'est-à-dire si elle intervient lorsque la nappe a atteint son extension maximale (elle n'est donc plus alimentée), alors la taille de la nappe en feu va diminuer au fur et à mesure de la combustion.

Le paramètre dimensionnant pour le calcul des effets du feu de nappe est le diamètre de nappe :

1. Dans le cas d'une inflammation précoce, la surface de la nappe en équilibre peut être calculée par la formule suivante :

$$S = \frac{Q}{v_{comb}}$$

où :

- Q est le débit d'alimentation de la nappe donnée en kg/s ;

- v_{comb} est la vitesse de combustion massique par unité de surface donnée en kg/m²/s. Une valeur de 0,035 (resp. 0,04) peut être retenue pour le FL (resp. le FOD/biodiesel).

À partir de la surface de nappe, le diamètre est facilement obtenu.

2. Dans le cas d'une inflammation retardée, le paramètre dimensionnant les effets est le volume de combustible liquide libéré. C'est lui qui fixe la taille de nappe maximale atteignable. Ce volume est fonction du débit de fuite et de sa durée. En cas de rupture guillotine, il ne faut pas oublier de considérer la contribution de la tuyauterie avale qui se vidange. Considérer le diamètre maximal atteint pour calculer les effets du feu de nappe serait très pénalisant. En effet, lors de l'inflammation, la puissance du feu suit une cinétique de montée en puissance. Pendant ce temps la nappe régresse du fait de sa combustion de telle sorte que sa puissance théorique maximale, proportionnelle à la surface de la nappe, diminue. Par conséquent, il existe un instant pour lequel la puissance du feu atteint la puissance théorique maximale. C'est à partir de la taille de nappe à cet instant que sont calculées les distances d'effets. La Figure 15 donne le diamètre du feu de nappe ainsi calculé en fonction du volume libéré de combustible liquide. Les résultats pour le FL, le FOD et le biodiesel étant sensiblement les mêmes c'est l'enveloppe des résultats qui est présentée.

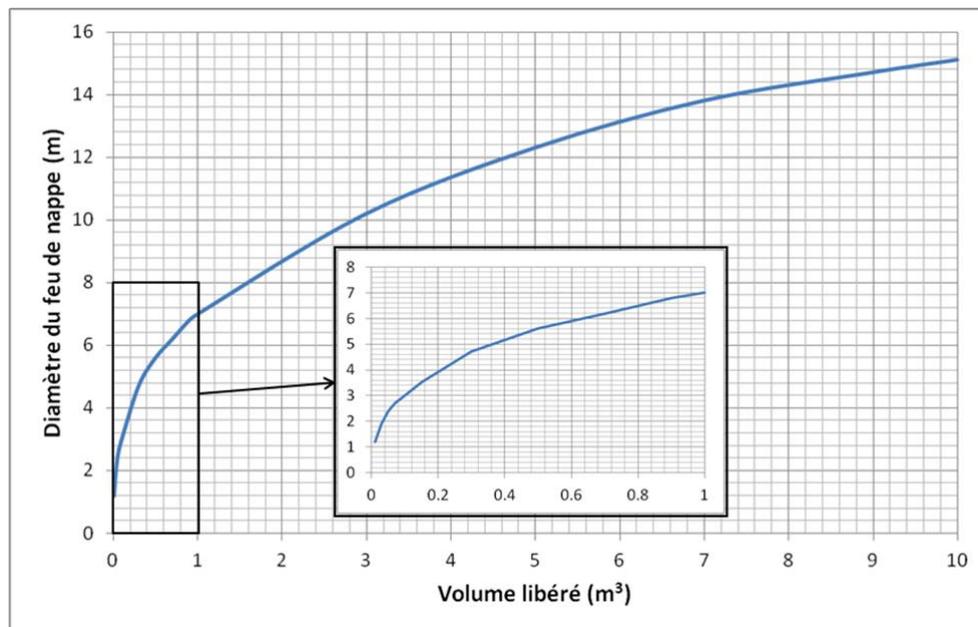


Figure 15 : Inflammation retardée - Diamètre du feu de nappe en fonction du volume de combustible liquide libéré

Le diamètre du feu de nappe peut donc être calculé en cas d'inflammation immédiate à partir du débit d'alimentation de la nappe et déterminé au moyen des abaques (Figure 15) en cas d'inflammation retardée. Pour autant, l'extension de la nappe peut être limitée par la présence d'une rétention ou des conditions de terrain. Si le diamètre obtenu est supérieur à l'extension maximale possible compte tenu des conditions particulières alors c'est cette extension maximale qui est à considérer pour le feu de nappe. Pour calculer les effets du feu de nappe, l'outil « Feu de nappe » disponible sur la plateforme Primarisk est utilisé. Les distances aux seuils thermiques calculées en fonction du diamètre du feu de nappe sont présentées Figure 16. Les distances sont données à hauteur d'homme et à partir du centre de la nappe.

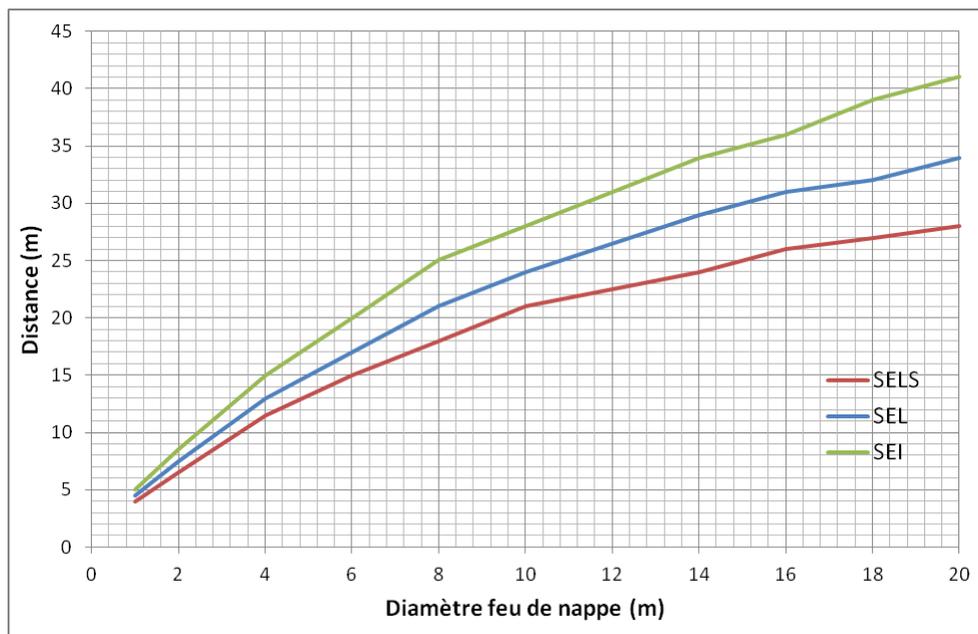


Figure 16 : Feu de nappe - Distances aux seuils d'effets thermiques du feu de nappe en fonction du diamètre du feu de nappe (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

4. TRANSFERT DE GAZ

4.1 TUYGAZ_PHD1 : FEU TORCHE

Les effets du feu torche sont calculés avec le logiciel PHAST 6.7. Le modèle de Cook et al. est utilisé. Quelque soient les scénarios (perte de confinement sur une tuyauterie, rejet par une soupape...), les paramètres régissant les effets du feu torche sont la pression et le diamètre de fuite. De façon pénalisante la pression est considérée constante au cours du rejet. Dans la suite les cas d'un rejet horizontal et d'un rejet vertical sont étudiés.

4.1.1 Rejet horizontal

Les Figure 17, Figure 18 et Figure 19 présentent l'évolution en fonction du diamètre de fuite des distances, respectivement au SEI, SEL et SELS, d'un feu torche horizontal de gaz naturel. Ces résultats sont donnés pour trois pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus. Les distances sont calculées dans l'axe du feu torche, là où elles sont les plus importantes.

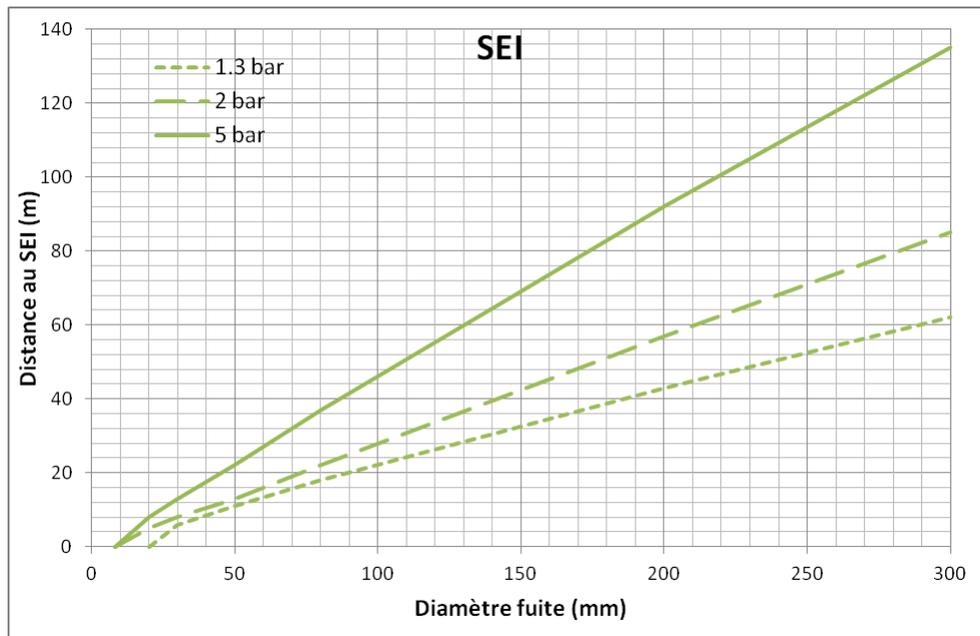


Figure 17 : Feu torche - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEI en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

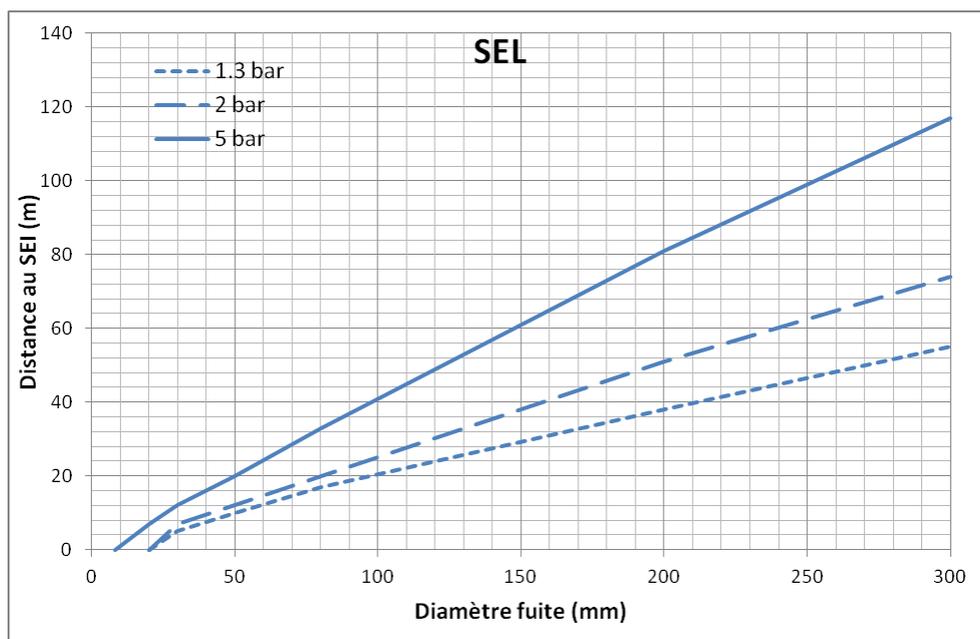


Figure 18 : Feu torche - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus



Figure 19 : Feu torche - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SELS en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

4.1.2 Rejet vertical

Les Figure 20, Figure 21 et Figure 22 présentent l'évolution en fonction du diamètre de fuite des distances, respectivement au SEI, SEL et SELS, d'un feu torche vertical de gaz naturel. Ces résultats sont donnés pour trois pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus. Les distances sont calculées à la hauteur du feu torche, là où elles sont les plus importantes.



Figure 20 : Feu torche - Rejet vertical - Évolution de la distance au SEI en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

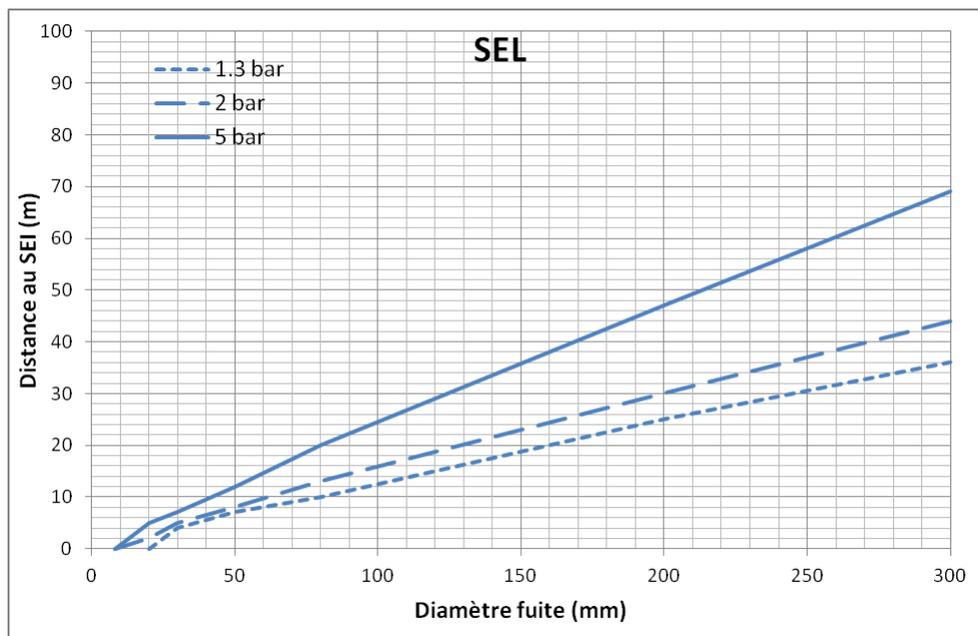


Figure 21 : Feu torche - Rejet vertical - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus



Figure 22 : Feu torche - Rejet vertical - Évolution de la distance au SELS en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

4.2 TUYGAZ_PHD2 : UVCE / FLASH FIRE

4.2.1 Scénarios envisagés

Le scénario retenu ici est l'explosion de jet libre de gaz naturel. Les distances des effets de surpression de cette explosion seront donc calculées grâce à la méthode proposée dans l'Annexe 6-1, en faisant l'hypothèse que le jet ne rencontre ni parois, ni zones encombrées.

4.2.2 Données d'entrée

Les diamètres de fuites sont de 5, 8, 20, 30, 50, 80, 200 et 300 mm, les pressions de rejets sont de 1.3, 2 et 5 bar absolus. Les rejets sont considérés constant (pas de décompression), et les éventuelles contributions avales dans le cas d'une rupture guillotine ont été négligées.

4.2.3 Surpressions

Les distances des effets de suppression d'une explosion de jet de gaz naturel sont présentées aux différents seuils d'effets sur les graphes suivants pour des rejets verticaux et horizontaux. Les résultats sont donnés pour trois pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus. Les distances d'effets sont à considérer depuis le point de rejet :

Rejets verticaux (tuyauteries enterrées)

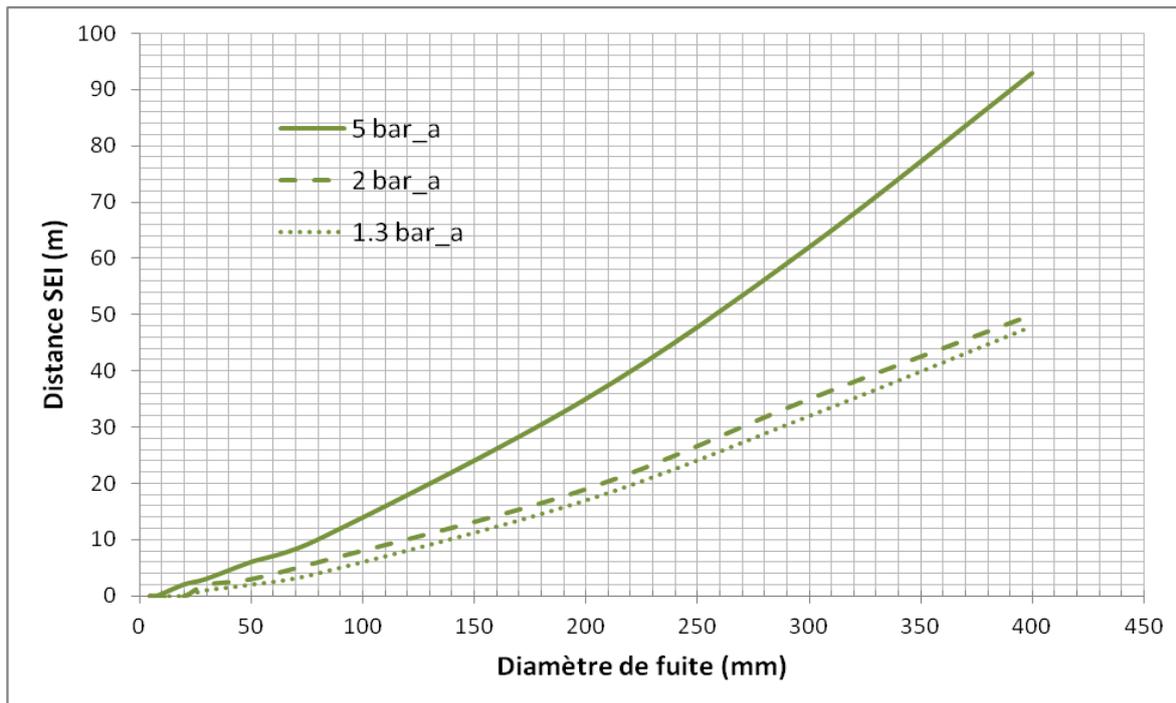


Figure 23 : Explosion de jet - Rejet vertical - Évolution de la distance au SEI en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

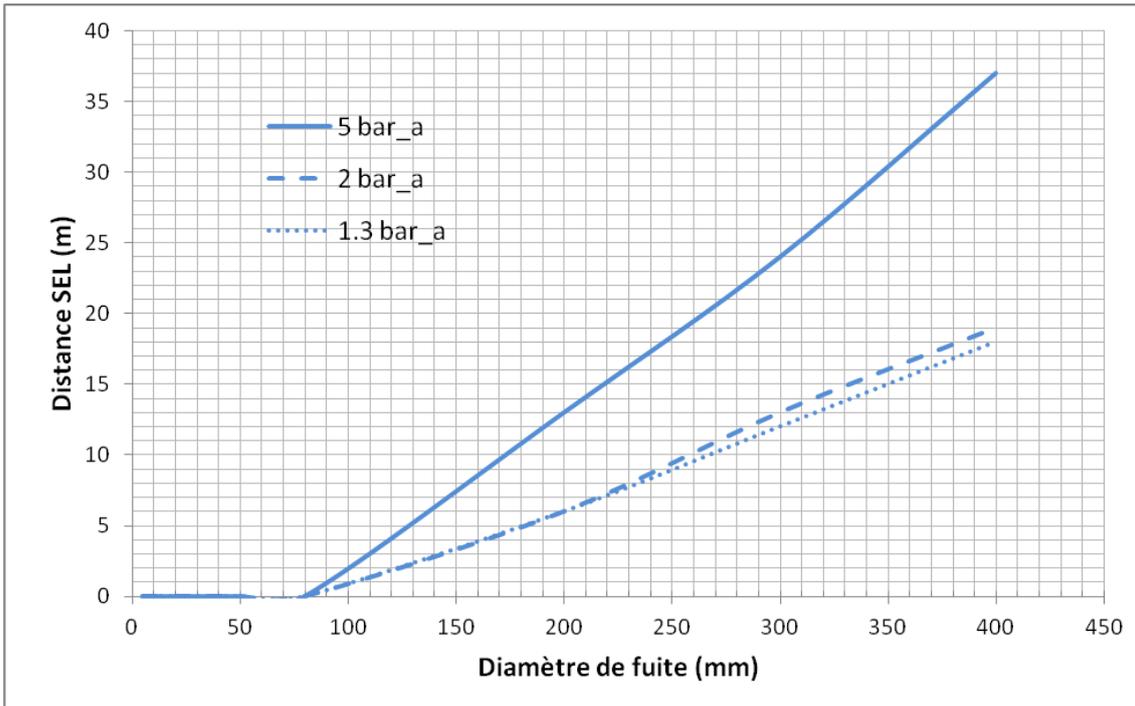


Figure 24: Explosion de jet - Rejet vertical - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

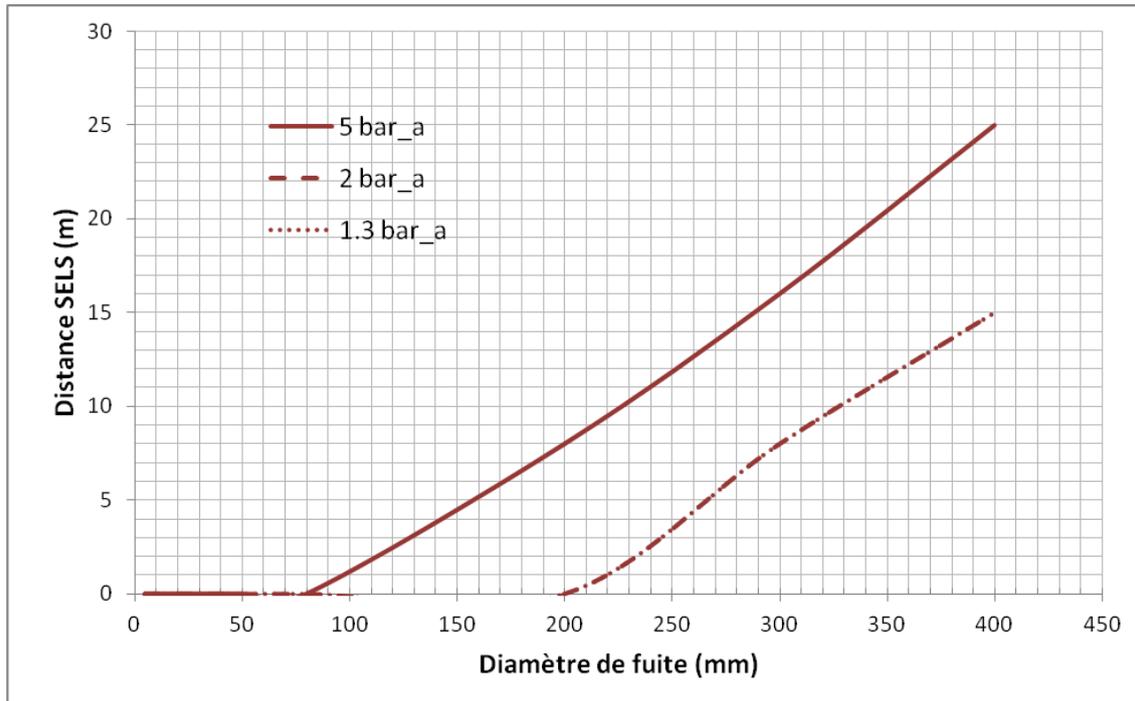


Figure 25: Explosion de jet - Rejet vertical - Évolution de la distance au SELS en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

Rejets Horizontaux (tuyauteries aériennes)

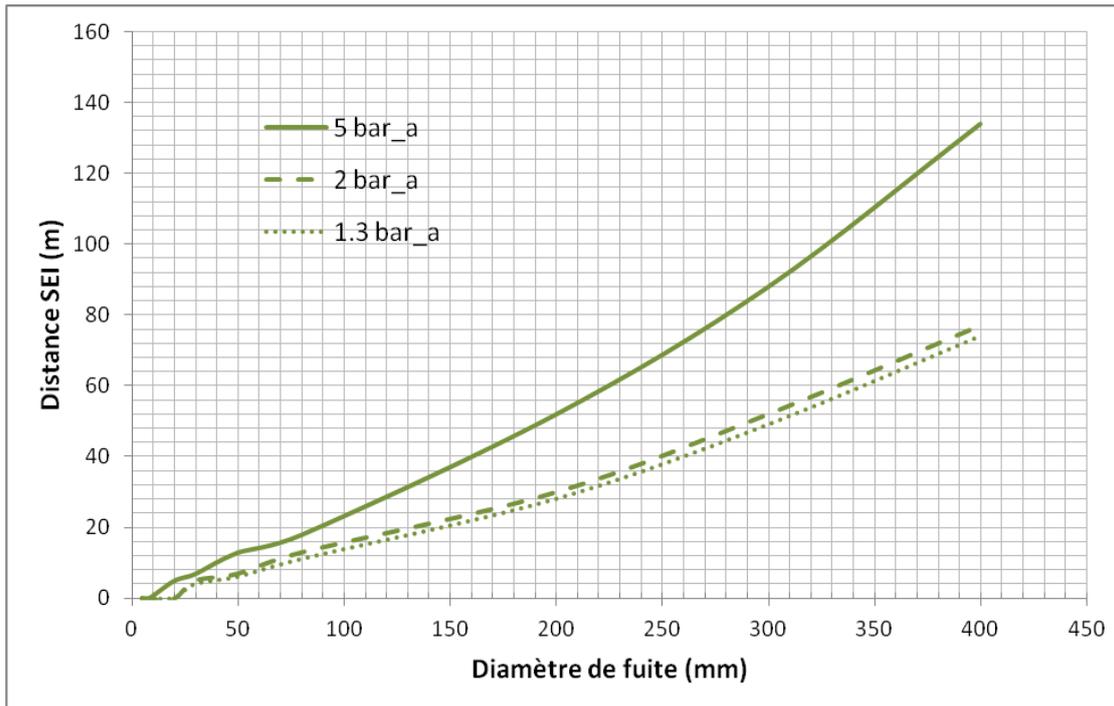


Figure 26: Explosion de jet - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

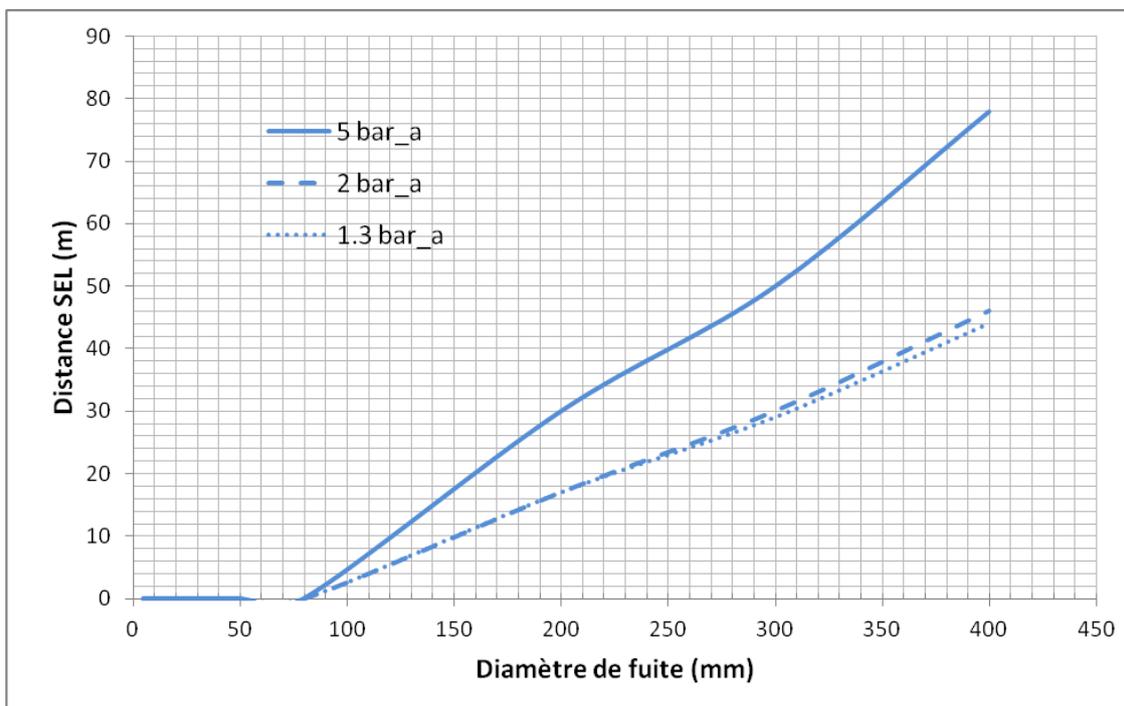


Figure 27: Explosion de jet - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

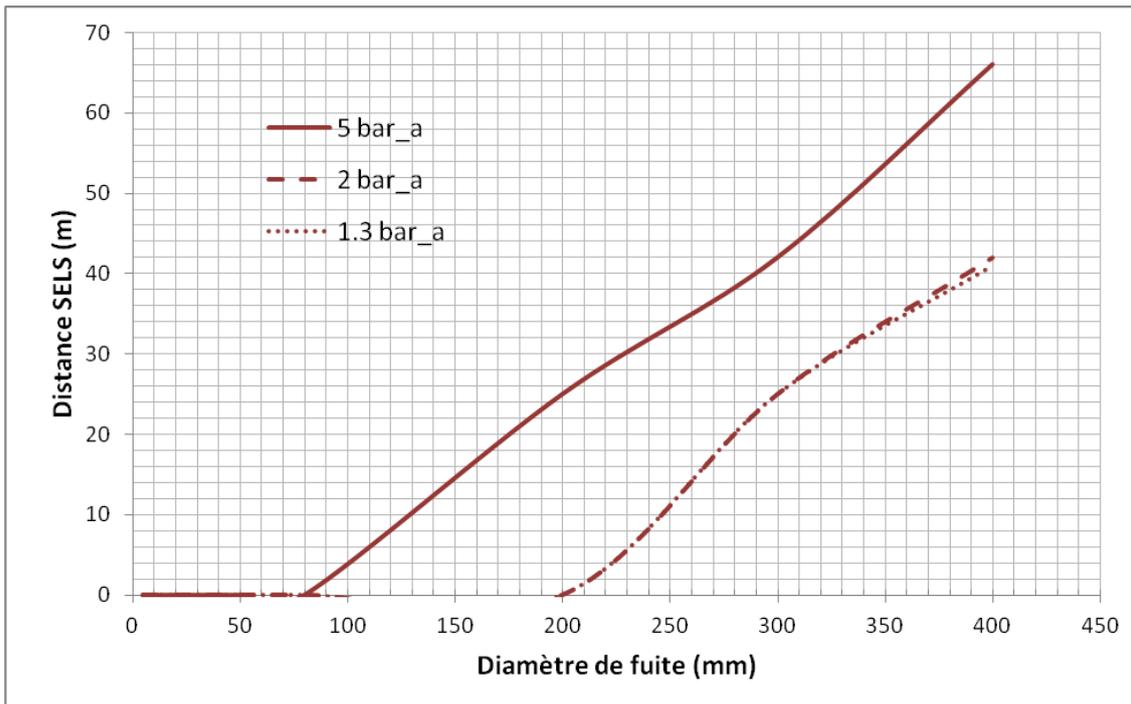


Figure 28: Explosion de jet - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SELS en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

Les abaques présentés ci-avant sont basés sur l'hypothèse d'un rejet libre. Dans le cas où le jet est impactant ou si une zone encombrée est atteinte, un calcul spécifique est nécessaire.

La présence d'un obstacle plus large que le diamètre du jet (mur, bâtiment, ...) perturbe l'écoulement, ce qui a pour conséquence une augmentation du volume inflammable par rapport au jet libre, pouvant aller jusqu'à 10 fois ce dernier lorsque l'obstacle est situé à une distance inférieure ou égale à 10% de la distance à la LIE⁴. Cet ordre de grandeur est applicable en théorie aussi bien pour les jets horizontaux rencontrant un bâtiment par exemple, que pour les jets verticaux dirigés vers le bas et rencontrant le sol.

La présence d'obstacles plus petits que le diamètre du jet perturbe l'écoulement, ajoutant de la turbulence à la turbulence déjà existante dans le jet, augmentant la violence de l'explosion.

4.2.4 Distances d'effets thermiques dus au flash fire

La distance d'effets thermiques correspond à la distance à la LIE pour les effets létaux et à 110% de la distance à la LIE pour les effets irréversibles :

^{4 4} Essais EMERGE (Extended Modelling and Experimental Research into Gas Explosions

Chaineaux J. Schumann St. (1995) *Experimental study of explosions generated from massive release of a flammable gas, as a high momentum jet, for different conditions (free or obstructed, steady or transient, jet of CH₄, C₃H₈ or H₂)*. Proceedings of the 8 th International Loss Prevention Symposium, pp 333-348, Antwerp, Belgium.

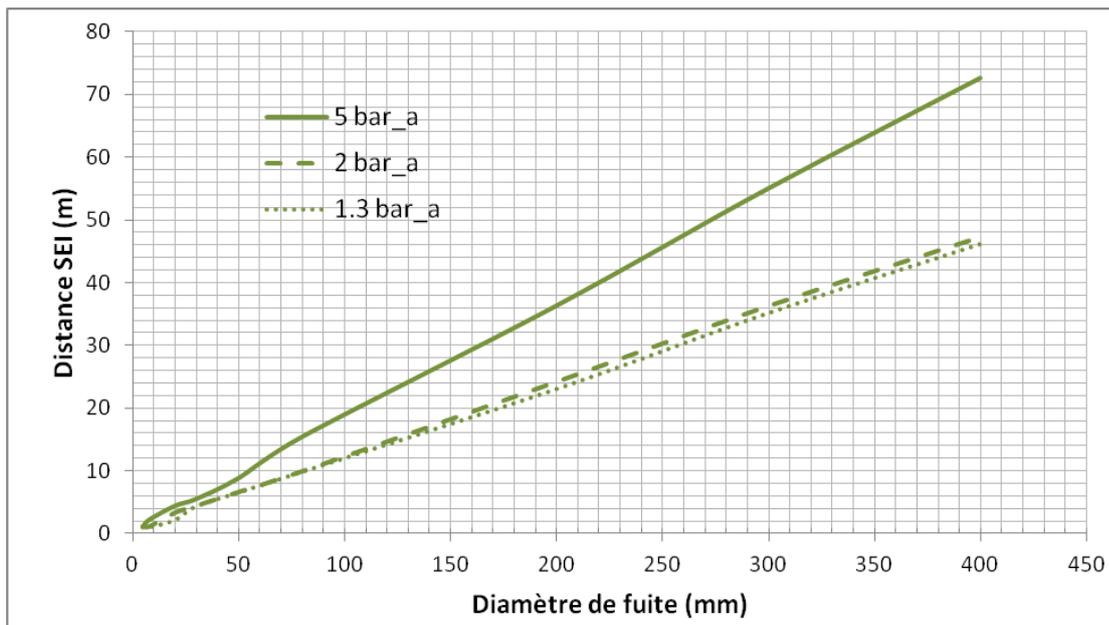


Figure 29 : Effets thermiques de l'inflammation du jet - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEI en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

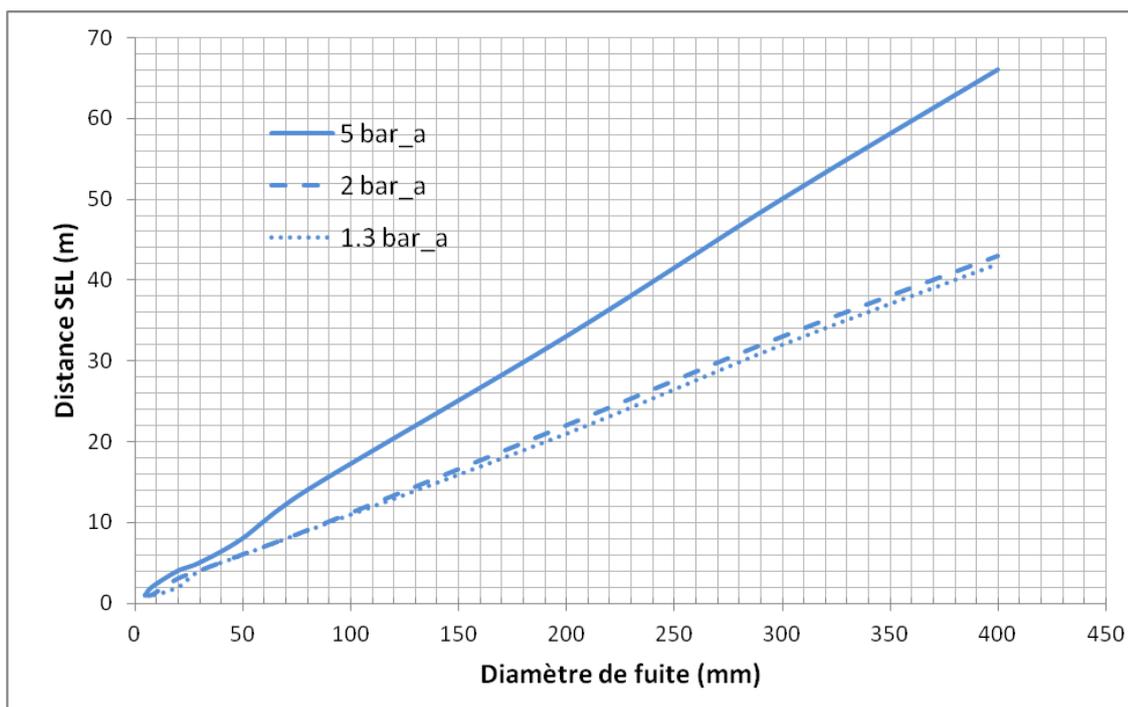


Figure 30 : Effets thermiques de l'inflammation du jet - Rejet horizontal - Évolution de la distance au SEL en fonction du diamètre de fuite pour 3 pressions : 1.3, 2 et 5 bar absolus

4.3 TUYGAZ_PHD3 : EXPLOSION DE LA CHAUFFERIE

4.3.1 Scénarios envisagés

Le scénario retenu ici est l'explosion de la chaufferie. Les distances des effets de surpression de cette explosion seront donc calculées.

4.3.2 Données d'entrée

Pour calculer la pression maximale atteinte dans le bâtiment, l'outil EFFEX dont une brève description est fournie en Annexe 6-3 a été utilisé. Les distances d'effets dues à l'explosion du bâtiment sont ensuite calculées à l'aide de la méthode multi-énergie à l'indice 10 (Annexe 6-2) comme pour l'éclatement d'une enceinte pressurisée.

Trois termes sources ont été évalués :

	Petite fuite	Fuite moyenne	Grande fuite
Diamètre	8 mm	100 mm	300 mm
Pression (rel.)	0.3 bar	4 bar	4 bar

Tableau 3 : Données d'entrée concernant la fuite

Les bâtiments sont considérés construits avec le même matériau. En cas de rupture du bâtiment, toutes les parois cèdent en même temps. Deux types de matériaux constitutifs ont été pris en compte, le béton et le bardage.

Type	Bardage	Béton
Pression de rupture (rel.)	50 mbar	200 mbar
Masse surfacique	40 kg/m ²	400 kg/m ²

Tableau 4 : Données d'entrée concernant la structure du bâtiment

Trois volumes de chaufferies correspondant à trois puissances de chaudières ont été considérés : 1000, 5000 et 25000 m³ :

Longueur	14	32	70
Largeur	7	16	35
Hauteur	10	10	10
Volume	1000	5000	25000

Tableau 5 : Dimensions des bâtiments

Il a été considéré que toutes les parois du bâtiment cédaient instantanément lors de la montée en pression dans le bâtiment, rendant l'influence des surfaces soufflables négligeable. L'influence des surfaces éventables a été étudiée dans le paragraphe 4.3.5.

Pour toutes les configurations, on suppose la chaufferie entièrement remplie à la stœchiométrie. Les ordres de grandeurs de temps de fuite nécessaires pour atteindre les conditions stœchiométriques sont présentés dans le tableau suivant pour chaque fuite et chaque volume de bâtiment :

Volume	1000	5000	25000
Petite fuite	2 h	11 h	2 jours
Fuite moyenne	13 s	1 min	5 min
Grande fuite	1 s	7 s	35 s

Le niveau de turbulence est calculé à partir des caractéristiques de la fuite et des dimensions des bâtiments. Il permet ensuite de calculer les caractéristiques de combustion :

	Petite fuite	Fuite moyenne	Grande fuite
Vitesse de flamme turbulente (m/s)	10	20	40
Taux d'expansion	6	6	6

Par ailleurs, la totalité du mélange inflammable disponible à l'intérieur du bâtiment est brûlé. Il n'y a donc pas d'explosion secondaire. Ce thème sera cependant abordé dans le cadre d'un exemple au paragraphe suivant.

4.3.3 Résultats

Les distances des effets de suppression d'une explosion de jet de gaz naturel sont présentées sur les graphes suivants, les distances d'effets étant à prendre depuis le bord des bâtiments.

Petite fuite dans un bâtiment en bardage :

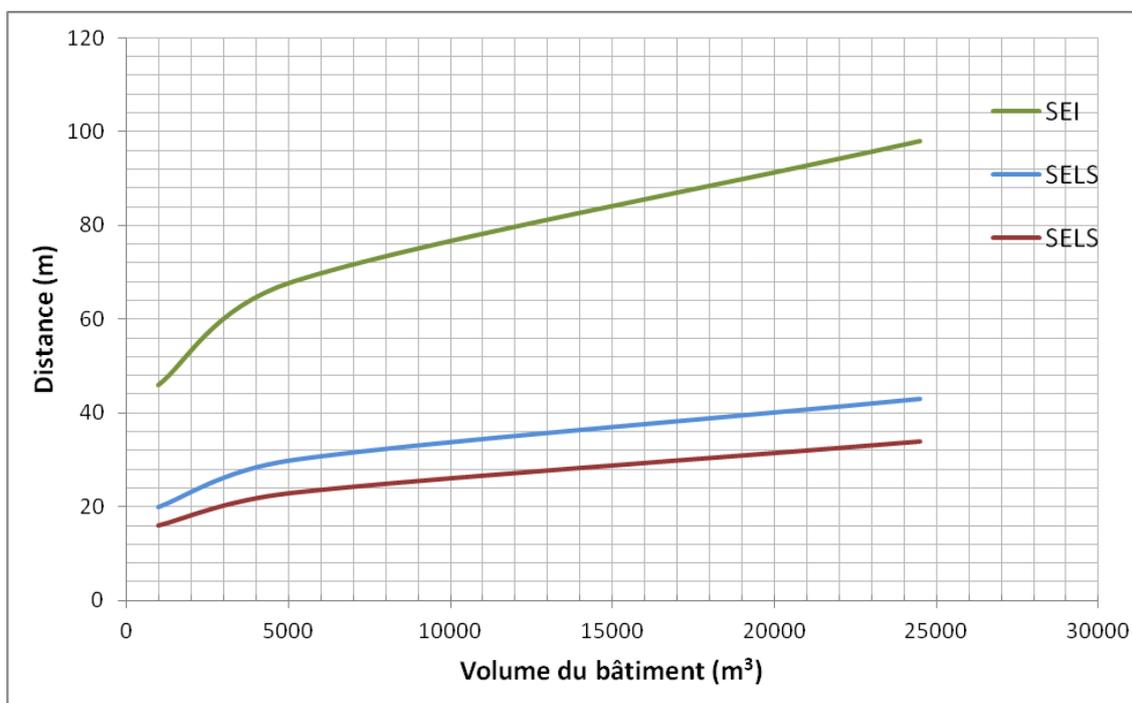


Figure 31: Explosion de chaufferie – Petite fuite – Bardage - Évolution des distances en fonction du volume.

Petite fuite dans un bâtiment en béton :

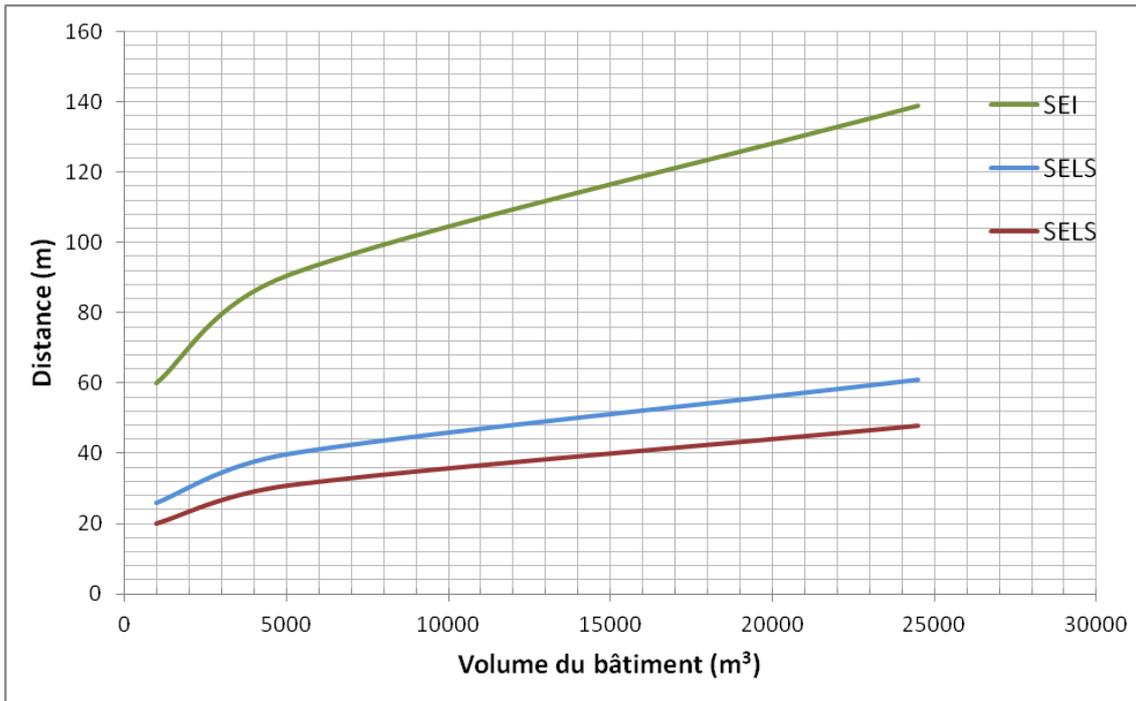


Figure 32: Explosion de chaufferie – Petite fuite – Béton - Évolution des distances en fonction du volume.

Fuite moyenne dans un bâtiment en bardage

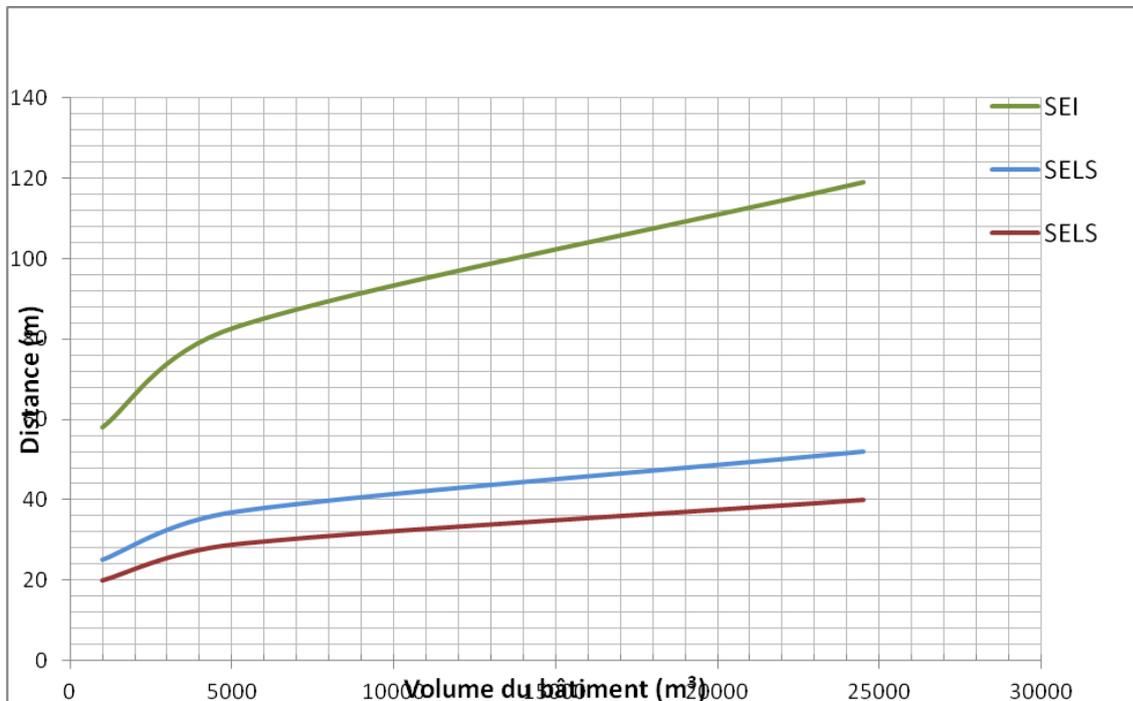


Figure 33 : Explosion de chaufferie – Fuite moyenne – Bardage - Évolution des distances en fonction du volume.

Fuite moyenne dans un bâtiment en béton

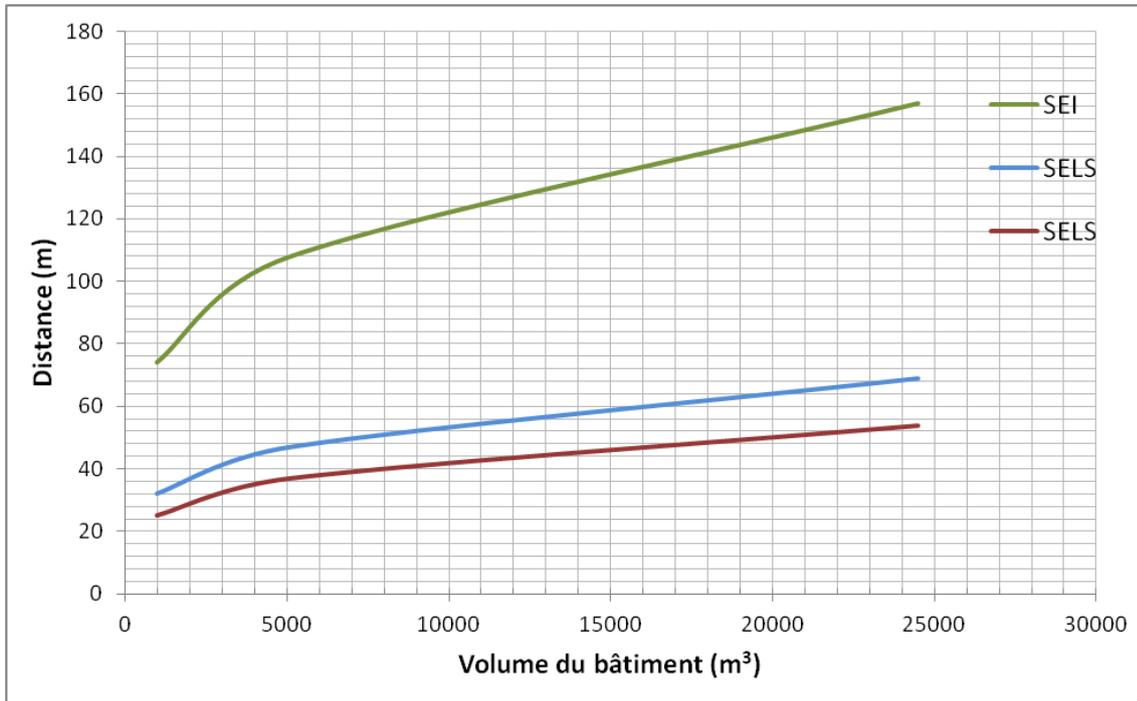


Figure 34 : Explosion de chaufferie – Fuite moyenne – Béton - Évolution des distances en fonction du volume.

Grande fuite dans un bâtiment en bardage :

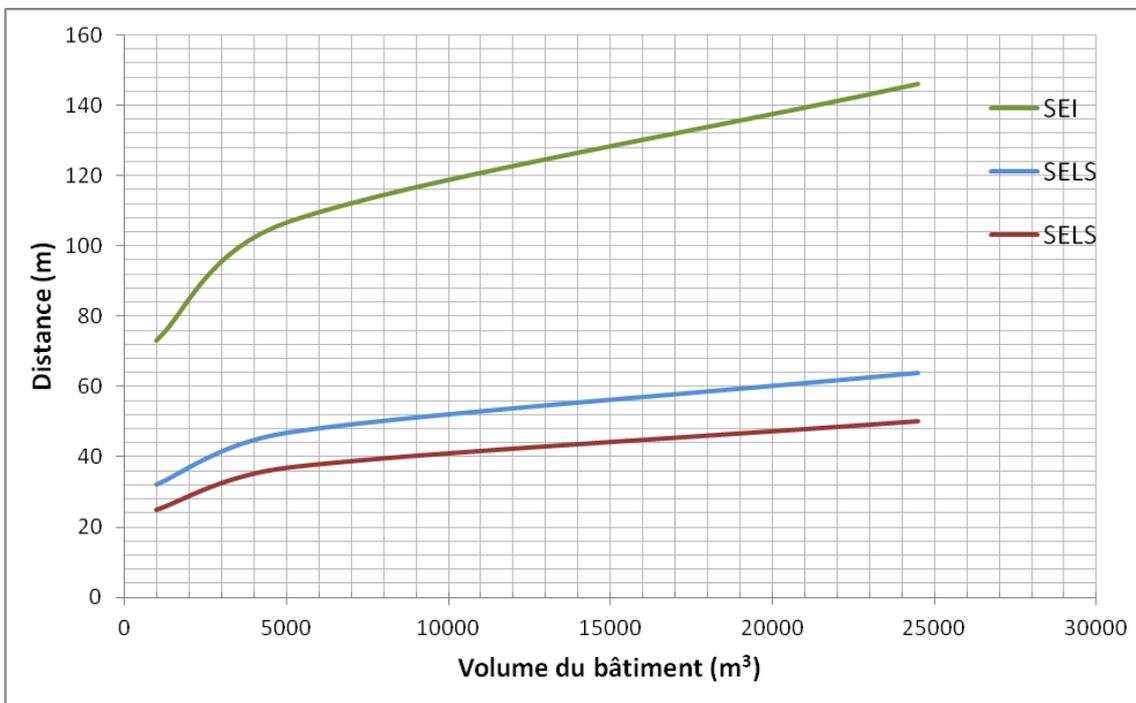


Figure 35: Explosion de chaufferie – Grande fuite – Bardage - Évolution des distances en fonction du volume.

Grande fuite dans un bâtiment en béton :

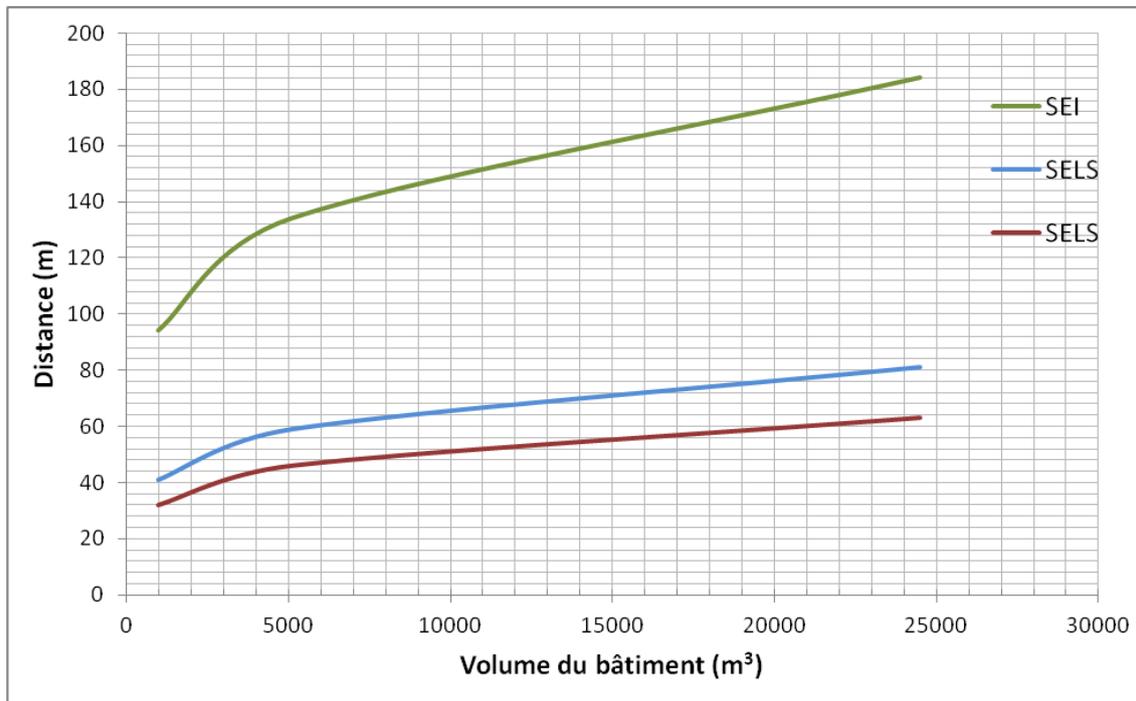


Figure 36: Explosion de chaudière – Grande fuite – Béton - Évolution des distances en fonction du volume.

4.3.4 Explosion secondaire

Pour illustrer un exemple des effets dus à l'explosion secondaire, l'exemple d'une petite fuite dans un bâtiment de 25000 m³ est considéré.

La bâtiment est ici constitué d'une structure en béton, d'un toit en bardage et d'une surface d'ouverture de 40 m². Suite à l'explosion primaire dans le bâtiment, les gaz non brûlés, soit environ 85% du volume, sont éjectés par le toit, formant une boule de feu dont les distances d'effets de surpressions sont :

- 50 m pour le seuil SELS
- 80 m pour le seuil SEL
- 220 m pour le seuil SEI
- 440 m pour le seuil SER.

4.3.5 Influence de la surface éventable

Dans les exemples précédents, il a été considéré que la totalité des parois cédaient instantanément lors de la montée en pression dans le bâtiment. Or, certains bâtiments sont équipés de surface éventables. Pour étudier l'influence de ce paramètre sur les distances d'effets, l'exemple est pris d'un bâtiment en béton de dimensions moyennes (bâtiment de 5000 m³ défini précédemment) dans lequel est envisagée la fuite moyenne, et sur lequel est installée une paroi éventable dont la surface varie de 50 à 500 m² (500 m² correspondant environ à la surface du toit). Les données d'entrée sont résumées dans le tableau suivant :

Bâtiment	
Dimensions du bâtiment (L*I*h)	32*16*10 m ³
Nature des murs	Béton
Surface éventable	
Surface d'évent	De 50 à 500 m ²
Pression de rupture (rel.)	50 mbar
Masse surfacique	40 kg/m ²
Fuite	
Nature de la fuite	Fuite moyenne
Propriétés du mélange	Stœchiométrique
Vitesse de flamme	20
Taux d'expansion	6

Figure 37 : Données d'entrée pour le scénario d'explosion de bâtiment en fonction de la dimension de la surface éventable

À partir de ces données d'entrée il est possible de calculer les distances suivantes :

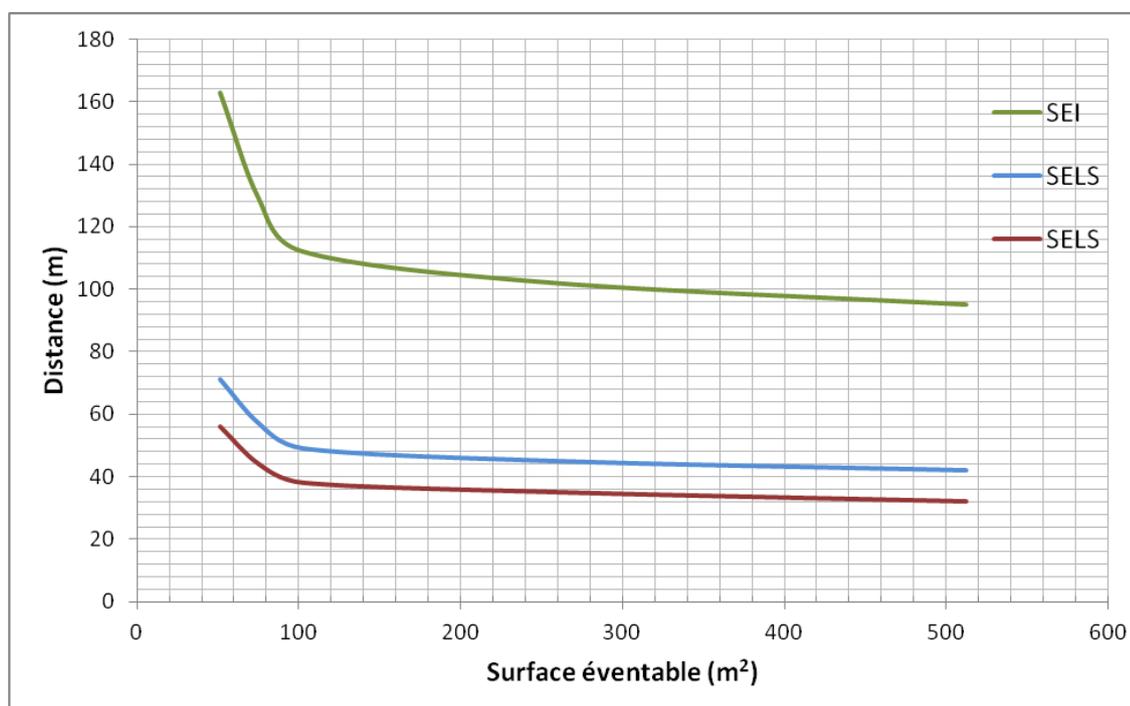


Figure 38 : Explosion de chaufferie – Fuite moyenne – Béton - Évolution des distances en fonction de la surface éventable.

Dans cette configuration, la dimension de la surface d'évent à une très grande influence jusqu'à environ 100 m², puis une influence beaucoup moins nette pour des dimensions supérieures.

5. FONCTIONNEMENT DE LA CHAUDIÈRE

5.1 CHAUD_PHD1A : EXPLOSION DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION (TE)

5.1.1 Méthode de calcul

Le scénario concerne l'explosion de la chambre de combustion. En l'absence de données d'entrée sur la pression de rupture, sur la forme et sur les matériaux composant la chambre de combustion, le calcul est effectué à partir de l'hypothèse que la pression maximale est atteinte lors de l'explosion, cette pression est égale à 7.1 bar pour le méthane. Dans le cas où la pression de rupture de la chambre de combustion serait supérieure à cette valeur, les seuils de surpression ne seraient pas atteints. Les modélisations ont été réalisées à l'aide de l'outil PROJEX. La méthode de calcul est présentée dans le document Omega 15⁵ de l'INERIS.

5.1.2 Résultats

Les distances des effets de suppression d'une explosion de chaudière sont présentées sur le graphe suivant en fonction du volume de la chambre, les distances d'effets étant à prendre depuis le bord de la chaudière.

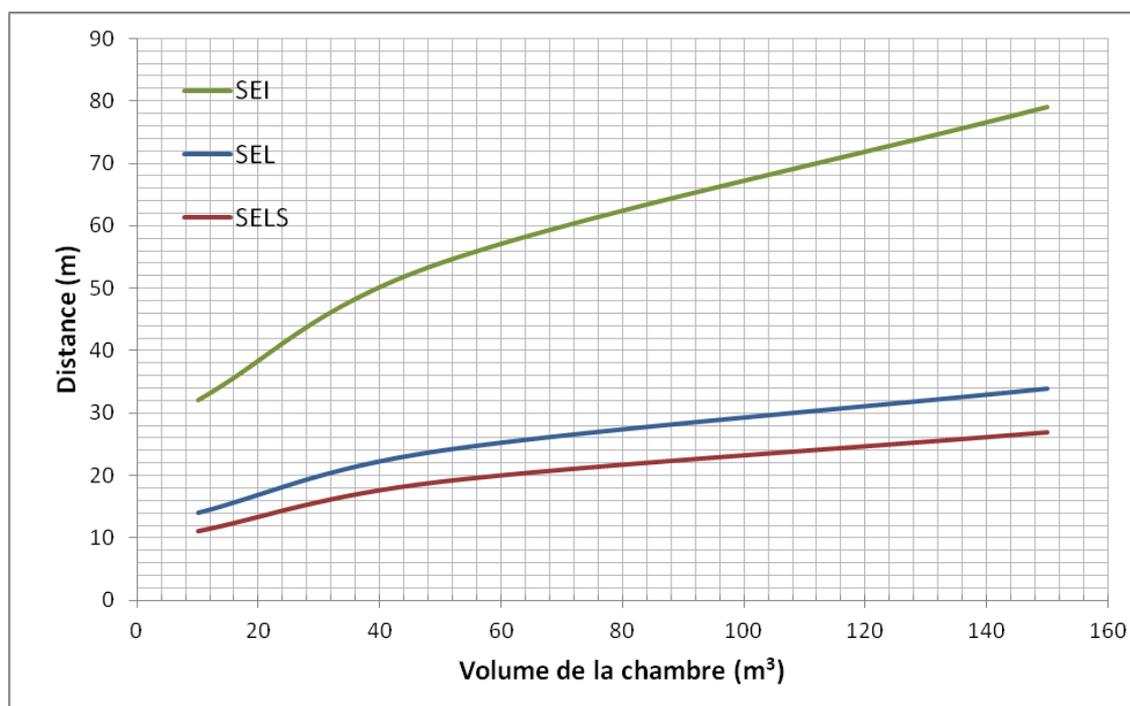


Figure 39 : Explosion de chambre de combustion (tubes d'eau) - Distances aux seuils d'effets de surpression (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

⁵ Omega 15- Les éclatements de réservoirs, Phénoménologie et modélisation des effets
référence : INERIS-DRA-2004-46055

5.2 CHAUD_PHD1B : EXPLOSION DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION (TF)

5.2.1 Données d'entrée

Le scénario concerne l'explosion de la chambre de combustion. Il est considéré ici que la chambre de combustion a une forme cylindrique. La pression de rupture correspond à celle des extrémités du cylindre et donc dépend des dimensions et de l'épaisseur d'acier de la chambre. Les données d'entrée sont présentées dans le tableau suivant :

Volume de la chambre (m ³)	5	20	40
Longueur (m)	5	8	10
Diamètre (m)	1.1	1.8	2.3
Épaisseur des extrémités (m)	0.014	0.022	0.03
Pression de rupture (bar relatif)	1	1	1

Figure 40 : Données d'entrée

Les calculs ont été réalisés à l'aide de l'outil EFFEX (Annexe 6-3).

5.2.2 Résultats

Les distances des effets de suppression d'une explosion de chaudière sont présentées sur le graphe suivant en fonction du volume de la chambre, les distances d'effets étant à prendre depuis le bord de la chaudière.

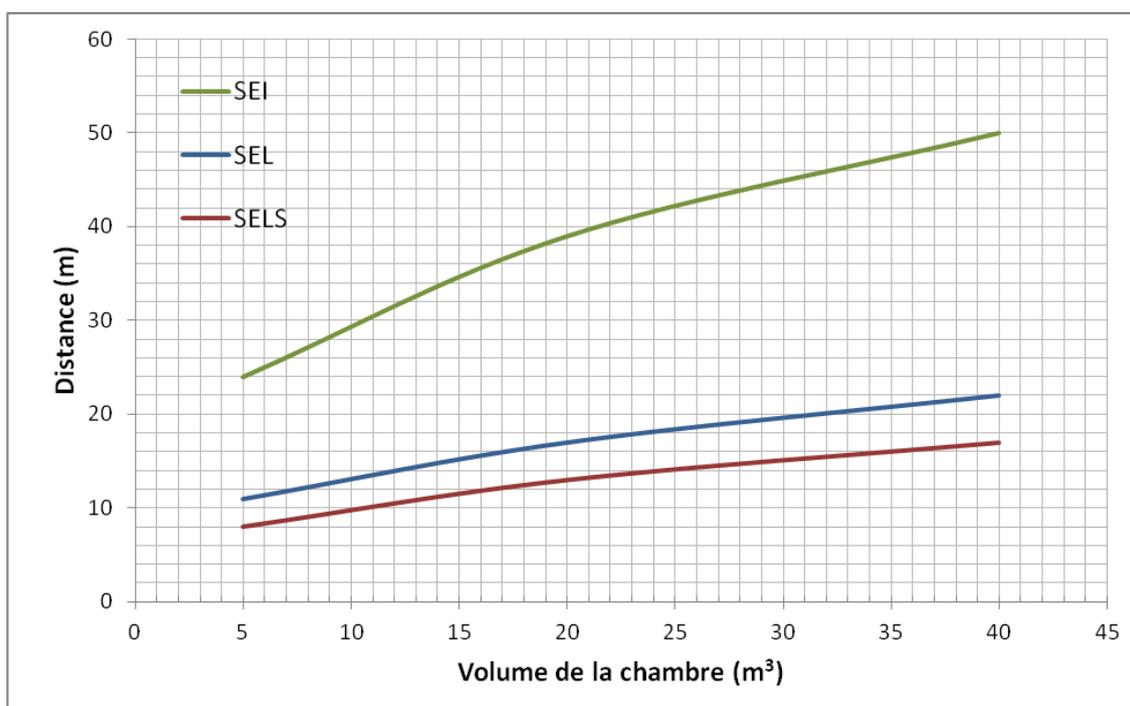


Figure 41: Explosion de chambre de combustion (tubes de fumée) - Distances aux seuils d'effets de suppression (SEI en vert, SEL en bleu et SELS en rouge)

5.3 CHAUD_PHD2 : BLEVE DE LA CAPACITÉ D'EAU

Les distances présentées dans ce paragraphe sont à considérer avec grande prudence pour les raisons suivantes :

- Elles ont été obtenues à l'aide de l'outil PROJEX dont les modèles sont en train d'être affinés. Les résultats ci-dessous ne sont pas représentatifs de la réalité physique du phénomène.
- Les résultats ci-dessous ont été obtenus pour un éclatement à l'air libre. L'effet atténuateur du local n'a pas été pris en compte.

5.3.1 Données d'entrée

Le scénario envisagé ici est le BLEVE d'un ballon d'eau. Les calculs ont été effectués en fonction du volume de la calandre pour trois pressions de rupture (10, 20 et 30 bar relatifs). Les calculs ont été réalisés à l'aide de l'outil PROJEX, la méthode est présentée dans le document oméga 15 de l'INERIS.

5.3.2 Résultats

Les distances des effets de suppression dues à un BLEVE d'un ballon d'eau sont présentées sur les graphes suivants, les distances d'effets étant à prendre depuis le bord des bâtiments.

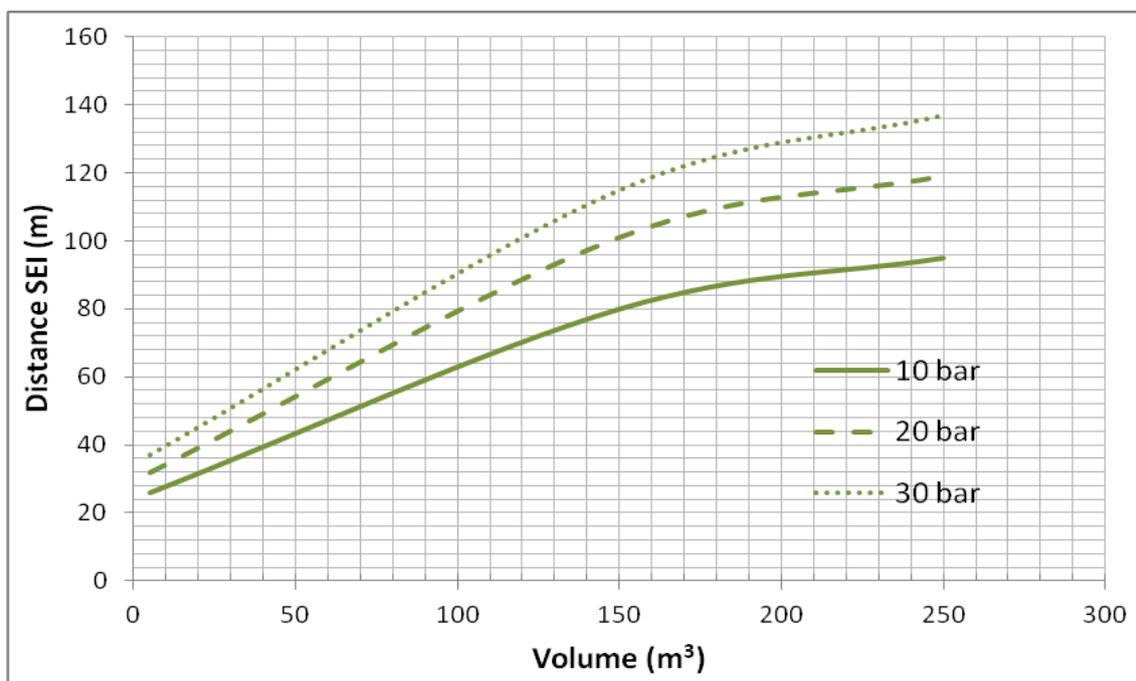


Figure 42: BLEVE – Évolution de la distance au SEI en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

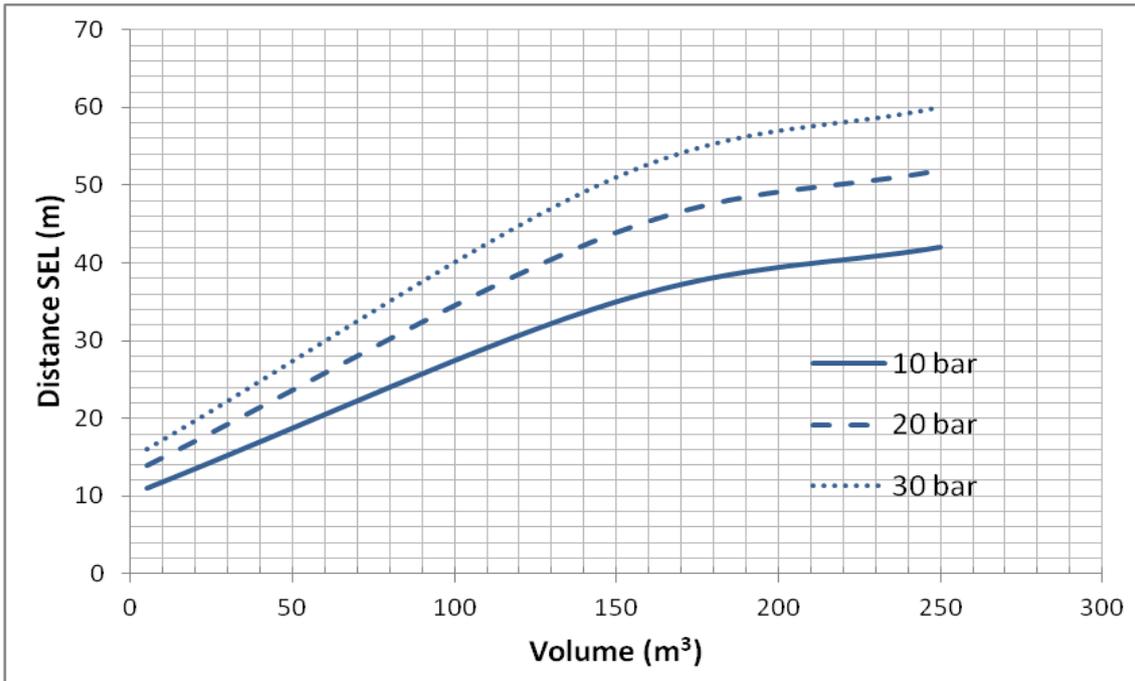


Figure 43: BLEVE – Évolution de la distance au SEL en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

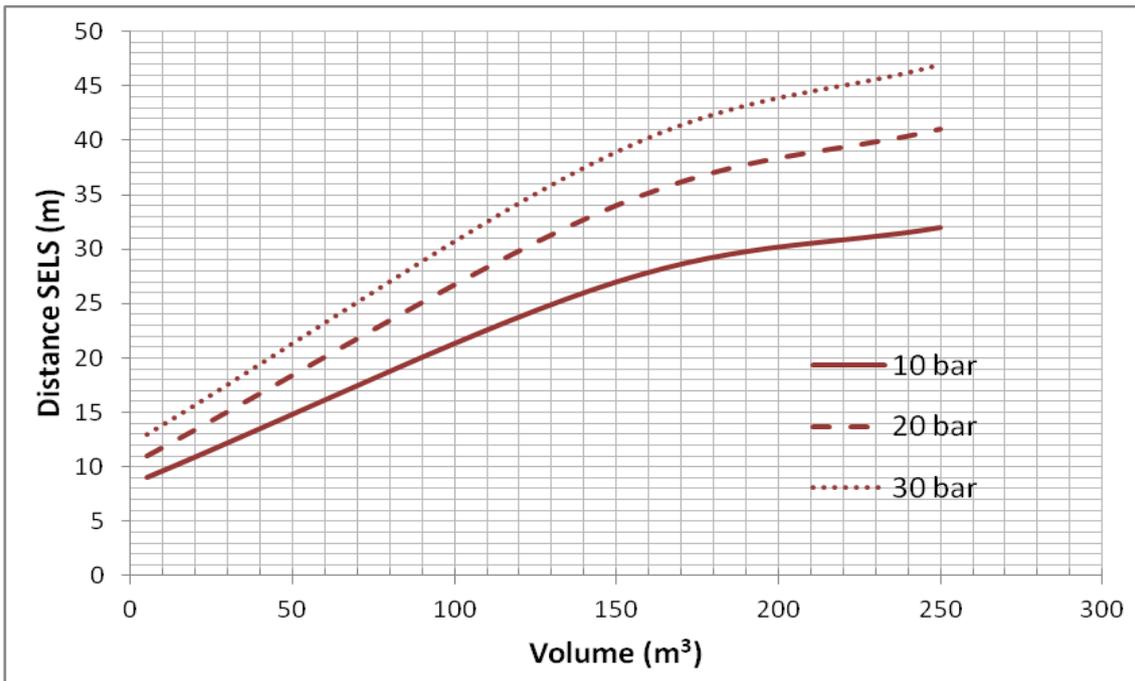


Figure 44: BLEVE – Évolution de la distance au SELS en fonction du volume pour 3 pressions de rupture : 10, 20 et 30 bar relatifs

ANNEXE 5-1

EXPLOSION DE NUAGE INFLAMMABLE (VAPOUR CLOUD EXPLOSION)

Le rejet d'un produit inflammable suite à une brèche ou à une rupture totale du contenant entraîne la formation d'un nuage inflammable susceptible d'exploser. Les niveaux de surpression produits par une telle explosion sont prédits à l'aide de la méthode Multi-energy.

La méthode vise à prendre en compte le fait qu'une explosion de gaz n'est susceptible d'engendrer de fortes surpressions que si :

- les flammes atteignent une vitesse de propagation importante (plusieurs dizaines de mètres par seconde),
- les gaz sont confinés par des parois solides.

Or, une flamme se propageant dans un mélange gazeux réactif accélère si le volume occupé par les gaz est caractérisé par la présence répétée d'obstacles et d'espaces partiellement confinés.

En définitive, si un nuage inflammable donné occupe un volume important au sein duquel se trouvent plusieurs zones encombrées⁶ séparées entre elles par des zones libres, il est admis que les surpressions importantes seront engendrées par le passage des flammes au sein des zones encombrées. A ce titre, il convient de tenir compte des nombreux paramètres qui ont une influence sur la vitesse de propagation des flammes, parmi lesquels peuvent être cités :

- la densité d'obstacles,
- le degré de confinement,
- la forme et les dimensions du nuage inflammable,
- la réactivité du combustible,
- l'énergie et la position de la source d'inflammation,
- et le niveau de turbulence du mélange réactif avant allumage.

Dans le cadre d'une application de la méthode Multi-energy, la « violence » de chaque explosion élémentaire peut être caractérisée par un indice compris entre 1 et 10. L'indice 10 correspond à une détonation, les indices intermédiaires correspondant à des déflagrations à vitesses de flammes d'autant plus rapides que l'indice est élevé.

Les niveaux maximums et les courbes d'atténuation de la surpression en fonction de la distance sont alors donnés, pour chaque indice, sur des abaques. Ces abaques ont été établis sur la base de résultats de simulations numériques d'explosions de charges hémisphériques de gaz (typiques d'un mélange hydrocarbure-air) à vitesse de flamme constante, elles sont présentées en annexe B.

Par conséquent, la méthode Multi-energy diffère des méthodes classiques de calcul des conséquences des explosions comme la méthode « d'équivalent TNT », dans la mesure où les surpressions aériennes engendrées dans l'environnement ne sont plus fonction exclusivement de la quantité d'énergie dissipée pendant l'explosion mais aussi de la « violence » de l'explosion. On pourra retenir que l'indice de « violence d'explosion » caractérise la vitesse avec laquelle l'énergie des gaz inflammables est consommée pour engendrer des surpressions aériennes.

Pour appliquer la méthode Multi-energy, il est donc nécessaire, pour un rejet se produisant à l'extérieur, d'évaluer la masse inflammable du nuage qui participe à l'explosion suivant le lieu de l'inflammation ainsi que la distance jusqu'à laquelle le nuage formé est inflammable (ou distance à la LIE) moyennant la modélisation de la dispersion du rejet. Les limites du nuage sont définies par la concentration à la LIE. On considère ici que la masse inflammable est contenue :

⁶ Dans ce contexte, le terme « zones encombrées » désigne des lieux contenant à la fois des obstacles et des espaces qui peuvent être partiellement confinés

- dans une sphère de diamètre égal à la largeur du nuage si le jet est libre (figure suivante), c'est-à-dire la sphère la plus grande qui puisse être contenue dans le nuage,

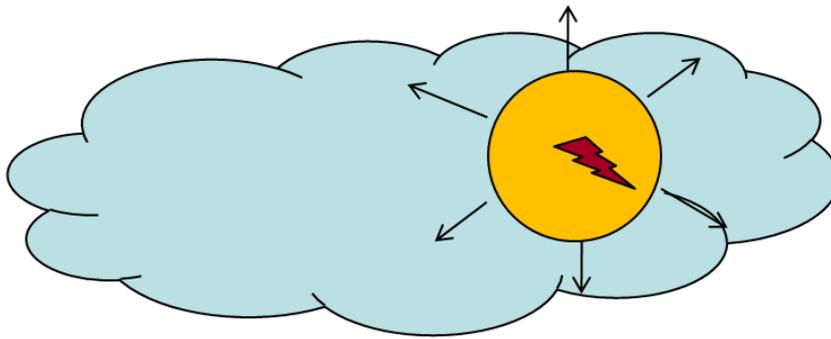


Figure 45 : Explosion sphérique dans un jet libre

- dans un hémisphère de rayon égal à la hauteur du nuage si celui est rampant (comportement de gaz lourd ou rejet près du sol illustré sur la figure suivante)

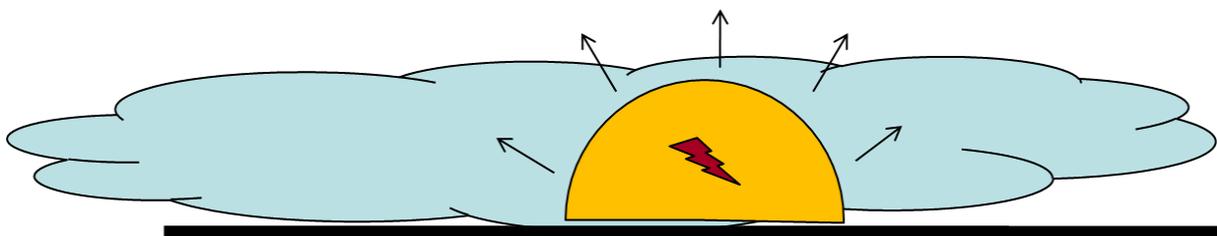


Figure 46 : Explosion hémisphérique dans un jet (ou nuage) rampant

Le choix du lieu de l'inflammation influera donc sur la quantité de gaz qui participera à l'explosion et sur le choix de l'indice Multi-energy (présence d'une zone encombrée, d'un très haut niveau de turbulence, d'une concentration proche de la stœchiométrie...).

Il est donc tenu compte dans le choix de l'indice Multi-energy :

1. du niveau de turbulence (très élevé près de la brèche jusqu'à quasi-nul au bout du nuage),
2. des zones encombrées présentes qui seraient susceptibles d'accélérer la flamme,
3. des concentrations de gaz inflammable dans l'air.

ANNEXE 5-2

MÉTHODE MULTI-ENERGY

Les effets de pression ont été déterminés classiquement à l'aide du modèle de la source acoustique à vitesse constante, qui est à la base de la méthode Multi-energy (voir abaques suivantes).

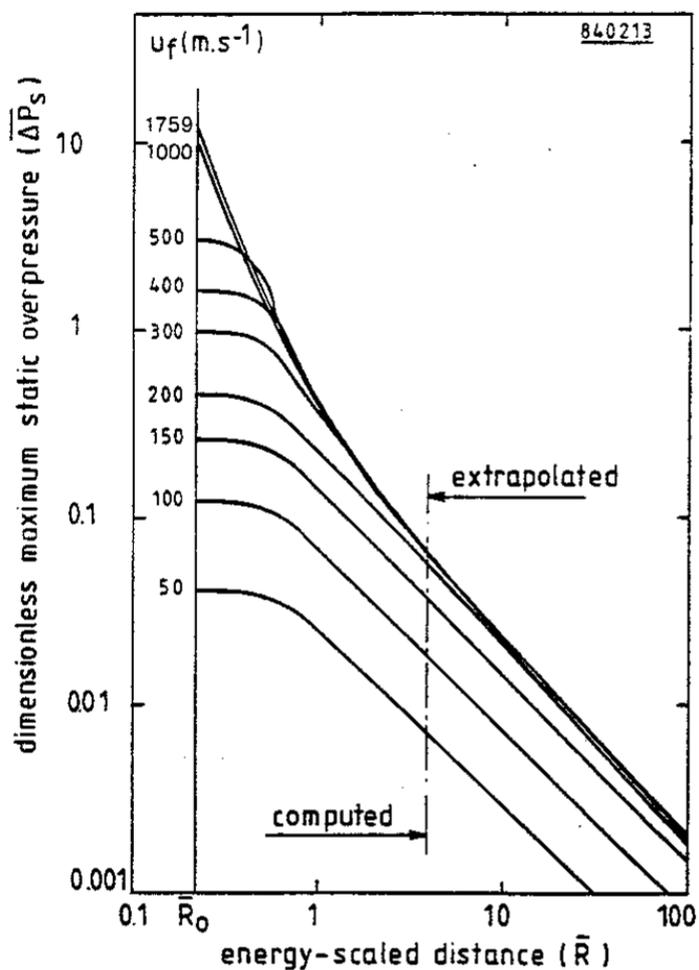


Figure A1 : Surpression maximale engendrée par une déflagration hémisphérique à vitesse constante, pour différentes vitesses de flamme

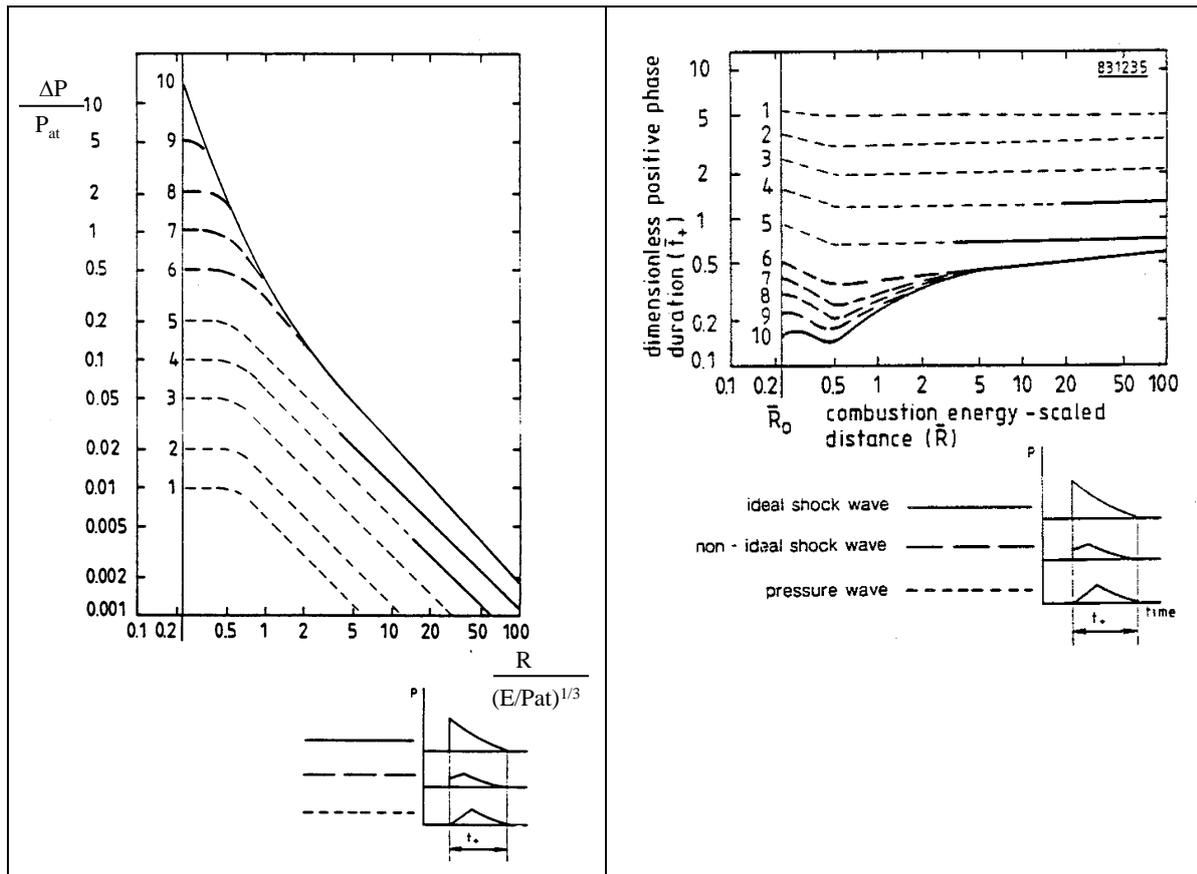


Figure A2 : Abaques de surpression et de durée de la phase positive en fonction de la distance réduite – d'après van den Berg et al.

La vitesse de propagation de la flamme est déduite des champs de concentration et de turbulence calculés par Explojet, tandis que la courbe de décroissance de la surpression aérienne en fonction de la distance est trouvée par les abaques de la méthode Multi-energy.

La corrélation retenue pour le calcul de St (vitesse de combustion turbulente) est celle proposée par Abdel-Gayed et al. [9] et reportée ci-après :

$$St = 1,5 \times u'^{0,275} \times Sl^{0,6} \times \left(\frac{Lt}{\nu}\right)^{0,15}$$

où ν est la viscosité cinématique en m^2/s des gaz,

Sl est la vitesse de combustion laminaire,

u' est la fluctuation moyenne de la composante longitudinale de la vitesse

et Lt est l'échelle des tourbillons

ANNEXE 5-3

EFFEX

Description d'EFFEX

Le logiciel EFFEX permet de simuler le développement d'une explosion à l'intérieur d'une enceinte en tenant compte :

- de la présence éventuelle d'ouvertures permanentes ;
- de l'éclatement d'une ou plusieurs parois ;
- de la projection progressive des fragments de ces parois.

Les résultats finaux sont l'évolution de la surpression interne en fonction du temps et les caractéristiques de la trajectoire des fragments.

Modélisation de l'explosion

Le mélange est caractérisé par la vitesse de combustion et le taux d'expansion des produits de combustion. La vitesse de combustion retenue est fonction du degré de turbulence et des instabilités de combustion.

La surface du front de flamme est considérée constante et correspond approximativement à l'aire de la plus grande sphère inscrite dans le volume considéré.

Les variations de la pression sont fonction de la compétition entre l'augmentation induite par la production de volume due à la combustion et la diminution provoquée par les fuites à travers les ouvertures permanentes et les brèches qui se forment dès qu'une paroi se rompt.

On considère que la pression est approximativement uniforme à l'intérieur de l'équipement.

Éclatement d'une paroi

On estime par le calcul la surpression de ruine de la paroi considérée en tenant compte, le cas échéant, de phénomènes spécifiques de chargement dynamique. On doit pour cela estimer les dimensions vraisemblables des fragments. Très souvent, cette évaluation est assez « naturelle » mais, dans certaines circonstances, un calcul numérique spécifique est nécessaire.

Dès que la surpression de ruine est atteinte, les fragments sont soumis aux forces de poussée (pression totale) de l'explosion et aux forces de freinage aérodynamique. Un coefficient de traînée permet de tenir compte de la forme des fragments.

À mesure que les fragments s'éloignent de leur position initiale, la surface des interstices entre les débris augmente, ce qui accroît d'autant la surface offerte à la décharge des produits de l'explosion.

Projection des fragments

On considère à l'heure actuelle que la « portance » des fragments est négligeable et que ces débris ne sont pas animés d'un mouvement de rotation significatif.

On tient compte de l'évolution de la force de poussée en fonction de la position des fragments par rapport au jet de produits de l'explosion.

La trajectoire des fragments et ses caractéristiques (vitesse, orientation) sont calculées à partir des équations de bilan des forces.

Méthode de résolution

Le modèle se présente sous la forme d'un ensemble d'équations différentielles (une dizaine) non linéaires.

Ces équations sont résolues simultanément par une méthode aux différences finies en suivant un schéma de résolution implicite, avec un pas de temps adaptatif qui permet de réduire fortement les erreurs de résolution et évite les oscillations numériques.

Validation du code

Les performances du code ont été testées par rapport :

- * à des essais d'explosion en laboratoire sur des enceintes munies d'évents (pas d'effet de fragmentation) ;
- * à des essais d'explosion dans un bâtiment muni de paroi fragile ;
- * aux informations obtenues à l'occasion d'enquêtes après accident.

Il apparaît que les résultats de simulation sont en bon accord avec l'expérience notamment pour ce qui concerne les surpressions maximales, les durées d'explosion et les distances de projection des fragments. La forme des signaux de pression reste cependant assez différente des observations en raison de l'hypothèse d'une surface de flamme constante.

ANNEXE 6 – ELÉMENTS DE PROBABILITÉ

1. INTRODUCTION

Cette annexe donne des éléments sur la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux pouvant être générés par des installations de chaufferie. Elle présente des données disponibles dans des sources de données publiques, ces dernières n'étant pas spécifiques aux installations de chaufferie.

Les bases de données utilisées sont :

- FRED - Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments - Juin 2012
- Handboek Faalfrequenties - Appendix to Handbook failure frequencies - 2009
- Reference manual BEVI risk assessment - Janvier 2009
- Reldat - Hazardous Materials Release and Accident Frequencies for Process Plant - Septembre 2006
- ICSI - Résumé des travaux du groupe de travail « fréquence des événements initiateurs d'accidents et disponibilité des barrières de protection et de prévention » - juillet 2006 ;
- GTDLI - Guide de maîtrise des risques Technologiques dans les Dépôts de Liquides Inflammables - Octobre 2008
- OGP - International association of Oil & Gas Producers - Storage incident frequencies - Mars 2010
- SINTEF - OREDA (Offshore Reliability Database)

Les données sont présentées par type d'équipements :

- Capacités sous pression ;
- Échangeurs tubulaires ;
Note : Les bases de données publiques ne faisant pas spécifiquement référence aux équipements types chaudières, celles-ci peuvent être assimilées à ce type d'équipements.
- Citernes routières et ferroviaires ;
- Réservoirs atmosphériques ;
- Tuyauteries ;
- Pompes ;
- Vannes, joints et brides ;
- Flexibles ;
- Soupapes ;
- Autres.

2. CAPACITÉS SOUS PRESSION

MODES DE DEFALLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Rupture catastrophique		2,00E-06 à 6,00E-06		FRED
Brèche	50 mm ϕ	5,00E-06		
	25 mm ϕ	5,00E-06		
	13 mm ϕ	1,00E-06		
	5 mm ϕ	4,00E-05		
Libération instantanée du contenant		5,00E-07		BEVI
Libération du contenant en 10 min		5,00E-07		
Brèche	10 mm ϕ	1,00E-05		Reldat
Rupture catastrophique		3,00E-06		
Brèche	10% ϕ	3,00E-05		OGP
Brèche	2 mm ϕ	2,30E-05		
	5 mm ϕ	1,20E-05		
	25 mm ϕ	7,10E-06		
	100 mm ϕ	4,30E-07		
Rupture catastrophique		4,70E-07		

Notes FRED :

Valeurs issues de l'industrie du chlore et du GPL. Pour des substances différentes, il est précisé que les valeurs sont des points de départ.

La rupture catastrophique sera plutôt 2.10^{-6} /an si la capacité suit des normes de construction telles que BS 5500.

Les effets externes (séisme, effets dominos, impacts par véhicules...) sont pris en compte à hauteur de 1.10^{-6} /an.

Notes BEVI:

Les valeurs incluent les fuites sur les piquages et 1ères brides.

Notes OGP :

La fréquence d'un BLEVE d'une capacité sous pression doit être calculée à partir de l'arbre des défaillances, en tenant compte des sources d'incendies adjacentes capables de causer cet évènement. Des analyses antérieures montrent que la fréquence attendue pour un tel évènement est comprise entre 10^{-7} et 10^{-5} par capacité par an.

3. ECHANGEURS TUBULAIRES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Fuite externe		3,00E-02	/an	OREDA
Transfert thermique insuffisant		6,00E-02		
Lecture anormal d'instruments	type tubes - calandre, gaz/eau glycolée	3,90E-02		
Rupture simultanée de 10 tubes		1,00E-05		BEVI
Rupture d'un tube		1,00E-03		
Brèche par diamètre équivalent à 10% du diamètre du tube		1,00E-02		
Rupture d'un tube		7,10E-03		Handboek
Rupture de l'échangeur		1,30E-05		
Brèche dans la calandre	50 mm < ϕ ≤ 150 mm	1,60E-05		
	25 mm < ϕ ≤ 50 mm	3,90E-03		
	0 < ϕ ≤ 25 mm	6,00E-03		
Fuite niveau du tube		3,40E-02		Reldat
Fuite au niveau du joint		1,10E-02		

Note Handboek :

Il s'agit des valeurs pour des échangeurs tubulaires. Les valeurs sont données pour les fuites sur la calandre externe. Il est précisé que la brèche sur un tube conduira à une fuite dans la calandre mais qu'il faut vérifier la possibilité de brèche de la calandre résultant de la brèche de tubes. Si la brèche est possible, une fréquence de rupture de tubes de $7,1 \cdot 10^{-3}/\text{an}$ est retenue.

Note BEVI :

Dans tous les cas, les fuites sont supposées se faire à l'atmosphère.

Les valeurs retenues de fréquence correspondent à des échangeurs tubulaires dans lesquels la substance dangereuse est contenue dans les tubes et pour lesquels la pression design de la partie externe (calandre) est inférieure à celle de la pression côté substance dangereuse. Si la pression design de la partie externe était supérieure, la seule perte de confinement retenue serait celle de la rupture simultanée de 10 tubes avec une fréquence de $1 \cdot 10^{-6}/\text{an}$ (pour un échangeur avec fluide côté tubes).

Pour des échangeurs à plaques ou des échangeurs pour lesquels la substance dangereuse se trouve dans la calandre, les fréquences sont les suivantes :

- ruine instantanée : $5 \cdot 10^{-5}/\text{an}$;
- rejet complet en 10 minutes : $5 \cdot 10^{-5}/\text{an}$;
- Fuite par brèche de diamètre 10 mm : $1 \cdot 10^{-3}/\text{an}$.

Dans le cas où la substance se trouve dans les tubes mais aussi dans la calandre, d'autres données sont fournies dans le BEVI.

Note OREDA :

Pour les défaillances sur les échangeurs de type aéro (avec ventilateur), les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes sur la base de la durée de fonctionnement. Le chiffre annuel est évalué en prenant le taux par heure (fourni par OREDA) multiplié par 8760 heures.

Note Reldat :

Observations faites sur une durée de deux ans pour des installations de chimie fine.

4. CITERNES ROUTIÈRES ET FERROVIAIRES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Libération instantanée du contenu		1,00E-05	/ an	BEVI
Libération du contenu à travers le plus gros piquage		5,00E-07		
Feu de nappe suite à libération instantanée du contenu		5,80E-09		

5. RÉSERVOIRS ATMOSPHÉRIQUES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Libération catastrophique	volume $\geq 450\text{m}^3$	5,00E-06	/an	FRED
Libération majeure ($\phi = 500\text{ mm}$)		1,00E-04		
Libération mineure ($\phi = 150\text{ mm}$)		2,50E-03		
Libération par le toit	2,00E-03			
Libération catastrophique	volume $< 450\text{m}^3$ Produit inflammable	1,60E-05		
Libération majeure		1,00E-04		
Libération mineure		1,00E-03		
Libération instantanée du contenu	volume $< 450\text{m}^3$	5,00E-06		BEVI / Handboek
Libération du contenu en 10 min	débit constant et continu	5,00E-06		
Brèche 10 mm ϕ		1,00E-04		Reldat
Rupture catastrophique		1,00E-05		
Fuite $\geq 50\text{ mm}$		2,00E-04		
25 mm \leq Fuite $< 50\text{ mm}$		1,00E-03		
Fuite $< 25\text{ mm}$		4,00E-03		

Note FRED :

La libération majeure est définie comme une perte rapide de la plupart ou de tout le contenu sur plusieurs minutes.

La libération mineure est définie comme une perte beaucoup plus lente du contenu en 30 minutes.

Note Handboek :

Les fréquences des défaillances pour un réservoir de stockage atmosphérique s'appliquent au bac de stockage et incluent les raccords de tuyauterie jusqu'à la première bride. Le système de canalisation doit être considéré séparément.

Note Reldat :

Les fréquences sont basées sur des réservoirs de stockage de fioul.

6. TUYAUTERIES

EQUIPEMENT	MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
TUYAUTERIE ENTERREE	Rupture catastrophique	Gazoduc	7,00E-09	/m/an	BEVI
		Tuyauterie au norme NEN 3650	1,53E-07		
		Autres tuyauteries	5,00E-07		
	Brèche 20 mm ϕ	Gazoduc	6,30E-08		
		Tuyauterie au norme NEN 3650	4,58E-07		
		Autres tuyauteries	1,50E-06		
TUYAUTERIE AERIENNE	Rupture catastrophique	DN < 75mm	1,00E-06		
		75 \leq DN \leq 150	3,00E-07		
		DN > 150 mm	1,00E-07		
	Brèche 10% DN	DN < 75mm	5,00E-06		
		75 \leq DN \leq 150	2,00E-06		
		DN > 150 mm	5,00E-07		
TUYAUTERIE		diamètres tuyauterie (mm)		/m/an	FRED
	Spray release	Tous diamètres	1,00E-06		
	Brèche 3 mm ϕ	0-49	1,00E-05		
		50-149	2,00E-06		
	Brèche 4 mm ϕ	150-299	1,00E-06		
		300-499	8,00E-07		
		500-1000	7,00E-07		
	Brèche 25 mm ϕ	0-49	5,00E-06		
		50-149	1,00E-06		
		150-299	7,00E-07		
		300-4900	5,00E-07		
	Brèche 1/3 ϕ tuyauterie	500-1000	4,00E-07		
		150-299	4,00E-07		
		300-4900	2,00E-07		
	Rupture guillotine	500-1000	1,00E-07		
		0-49	1,00E-06		
		50-149	5,00E-07		
		150-299	2,00E-07		
	Brèche <1%	300-4900	7,00E-08		
		500-1000	4,00E-08		
		2,80E-07			
		1,20E-07			
	Brèche 1-5%	Fréquences à multiplier par L/D	5,00E-08		
Brèche 5-20%	2,20E-08				
Rupture catastrophique					

Note FRED :

Spray release : il s'agit d'une fuite sous forme de spray. La fuite est selon la circonférence de la tuyauterie avec une épaisseur de 50 μ m.

Note BEVI :

Les valeurs incluent les défaillances au niveau des brides, joints et soudures.

Note Handboek :

Les fréquences sont fonctions de la longueur (L) et du diamètre (D) (exprimés en mm). Une longueur minimale de 10 m est à considérer. Ces données correspondent à des tuyauteries aériennes.

7. POMPES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Défaillance		1 à 1,00E-01	/an/pompe	ICSI
		3,00E-05		FRED
Fuite	Spray release simple garniture	5,00E-04		FRED
	simple garniture	5,00E-04		Reldat
		5,16E-03		Handboek
		4,40E-03		FRED
	Spray release double garniture	5,00E-05		Reldat
	double garniture	5,00E-05		Handboek
		6,04E-03		Handboek
4,40E-03		Handboek		
Rupture catastrophique	simple garniture	1,00E-04	/an	Handboek
	double garniture	1,00E-04		BEVI
	Sans garniture	1,00E-05		BEVI
	Avec garniture	1,00E-04		BEVI
Brèche 10% DN	Sans garniture	5,00E-05	/an	BEVI
	Avec garniture	4,50E-03		BEVI
Fuite pompe dépotage		1,00E-03		GTDLI

Note FRED :

Spray release : il s'agit d'une fuite sous forme de spray. La fuite est selon la circonférence de l'arbre avec une épaisseur de 50 µm.

Note Handboek :

Il s'agit des valeurs relatives aux pompes centrifuges, avec garnitures (« gaskets »). La fuite est de taille $d_{\text{éq}} = 0,1.D_{\text{max}}$.

Note ICSI :

Il s'agit de toutes les défaillances possibles de la pompe, sans nécessairement perte de confinement : « Entre 1/an, toutes causes confondues (perte de la fonction de pompage, sans secours), et 10^{-1} /an ».

Inclut la rupture des joints dynamiques.

Note Reldat :

Il s'agit des fréquences de rejets typiques de référence pour les pompes à l'exclusion des fuites d'étanchéité.

Note BEVI :

Il n'y a pas de différence entre les fréquences de défaillances pour les pompes avec simple joint et les pompes avec double joint.

Ces scénarios sont applicables uniquement lorsque la pompe est en marche.

La rupture catastrophique de la pompe est modélisée comme une rupture de la conduite d'alimentation de la pompe. Le scénario de fuite est quant à lui modélisé comme une fuite dans la conduite d'alimentation de la pompe.

8. VANNES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Défaillance	Vanne de régulation	1,00E-01	/vanne/an	ICSI
	Vanne TOR	1,00E-02 à 1,00E-03	/Demande	
Défaillance	Vanne manuelle	1,00E-04	/Demande	FRED/BEVI
	ROSOV	3,00E-02		
	ASOV	1,00E-02		
	XSFV	1,30E-02		
Spray release		2,00E-04	/vanne/an	

Note FRED / BEVI :

Spray release : il s'agit d'une fuite sous forme de spray. La fuite est selon la circonférence de l'arbre avec une épaisseur de 50 µm.

ROSOV : Remotely Operated Shut Off Valve

ASOV : Automatic Shut Off Valve

XSFV : eXceS Flow Valve

Note ICSI :

La valeur de fonctionnement accidentel correspond au fonctionnement accidentel tel qu'ouverture ou fermeture inopinée d'une vanne « tout ou rien ». Il est précisé que cette valeur est très variable selon la fonction de la vanne dans le contrôle du procédé. Ce sont des fréquences par vanne et par an. Pour une vanne automatique, une valeur de 1.10^{-2} /solicitation est donnée.

9. JOINTS ET BRIDES

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Défaillance bride		5,00E-06	/joint.an	FRED
Défaillance joint spiralé		1,00E-07		FRED
Défaillance joint statique		1,00E-07 à 1,00E-05		ICSI
Spray release		5,00E-06	/bride.an	FRED
Défaillance bride Tuyauterie < 3 inch	trou < 10 mm	3,10E-05		Reldat
	10 mm ≤ trou ≤ 25mm	4,00E-06		
	25 mm < trou ≤ 100mm	4,40E-06		
	trou > 100 mm et rupture	4,00E-07		
Défaillance bride 3 inch ≤ tuyauterie ≤ 11 inch	trou < 10 mm	4,70E-05		
	10 mm ≤ trou ≤ 25mm	2,80E-05		
	25 mm < trou ≤ 100mm	2,80E-05		
	trou > 100 mm et rupture	3,60E-06		
Défaillance bride Tuyauterie > 11 inch	trou < 10 mm	8,40E-05		
	10 mm ≤ trou ≤ 25mm	4,00E-06		
	25 mm < trou ≤ 100mm	4,00E-06		
	trou > 100 mm et rupture	6,90E-06		

Note FRED :

La défaillance de la bride est évaluée en considérant un trou équivalent à l'épaisseur du joint x la distance entre deux boulons.

Spray release : il s'agit d'une fuite sous forme de spray. La fuite est selon la circonférence de la tuyauterie avec une épaisseur de 50 µm.

Note : dans le BEVI, les fuites de joints / brides sont incluses dans celles des équipements (tuyauteries, réservoirs...).

10. **FLEXIBLES**

MODES DE DEFAILLANCE	INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES	FREQUENCE	UNITES	BASES DONNEES
Rupture guillotine	équipement basique	4,00E-05	/opération	FRED
	équipement moyen	4,00E-06		
	équipements avec systèmes sécurité	2,00E-07		
Brèche 15 mm φ	équipement basique	1,00E-06		
	équipement moyen	4,00E-07		
	équipements avec systèmes sécurité	4,00E-07		
Brèche 5 mm φ	équipement basique	1,30E-05		
	équipement moyen	6,00E-06		
	équipements avec systèmes sécurité	6,00E-06		
Brèche 25 mm φ		4,00E-03	/an	Reidat
		8,00E-06	/transfert	
1,00E-03		/an		
5,00E-06		/transfert		
Rupture catastrophique		1,20E-04	/transfert	FRED
Rejet		2,70E-06	/h	Handboek
Fuite 10% DN		5,40E-07		
Rupture catastrophique		4,00E-06		BEVI
Rupture catastrophique		4,00E-05		
Fuite 10% DN		4,00E-05		
Fuite		4,00E-05		

Note FRED :

Les données fournies sont applicables aux transferts depuis des camions. Trois niveaux de mesures de sécurité sont proposés conduisant à trois gammes de valeurs. Dans le cas où des inspections et des tests de pression et étanchéité sont réalisés, où un blocage des camions est réalisé, et où des barrières de mitigation existent (isolement automatique du flexible), les valeurs les plus basses de fréquences sont retenues.

Note Handboek / BEVI / Reidat / GTDLI:

Les données fournies sont applicables aux transferts depuis des camions, des wagons ou des bateaux.

11. SOUAPES

Les sources d'informations sont :

OREDA 97 et l'OREDA 2002 : Les informations sont classées en trois grandes catégories : critique, dégradé, et latent. Les deux dernières, qui n'ont pas conduit réellement à une perte de la fonction de la sécurité, ne sont pas retenues. Elles conduiraient en cas de prise en compte à augmenter les taux de défaillances de manière plus ou moins significative. Une fourchette de valeurs est donnée dans l'OREDA.

	OREDA 2002 – page 770 Taux de défaillance λ			OREDA 2002 – page 770 Exploitation (PFD _{avg} ou F)			
	Val. inf	Moyenne	Val. haute		Val. inf	Moyenne	Val. haute
Blocage fermé – échec à l'ouverture	0,16	1,68	4,61	PFD _{avg} (8760 h)	7,01E-04	7,36E-03	2,02E-02
Fuite interne – Fuite en position fermée	0,11	1,92	5,62	F sur 8760 h	9,64E-04	1,68E-02	4,92E-02
Ouverture intempestive	0,00	0,38	1,76	F sur 8760 h	0,00E+00	3,33E-03	1,54E-02

Note : les données OREDA 2002 varient selon la taille. Les valeurs indiquées sont des valeurs globales.

EIREDA : les données ne sont pas adaptées (tailles trop importantes).

ICSI :

Soupape de sécurité	Valeurs fournies	
Défaillance de soupape (non ouverture sur sollicitation)	PFD _{avg}	10 ⁻²
		10 ⁻¹ à 10 ⁻³
Ouverture à débit maxi d'une soupape de sécurité	F	1.10 ⁻⁴ /an
Ouverture inopinée d'une soupape (par exemple suite à la rupture du ressort)	F	1.10 ⁻¹ /an à 1.10 ⁻³ /an

Notes :

- La défaillance de soupape (PFD) est évaluée à 10⁻² mais il est précisé qu'elle peut varier de 10⁻¹ à 10⁻³. Et qu'il n'est pas raisonnable d'adopter une valeur inférieure à 10⁻³.
- Le chiffre communiqué pour l'ouverture à débit maxi correspond en fait à une valeur proposée par un industriel sur la base de son retour d'expérience. La sollicitation d'urgence de la soupape par surpression n'est pas incluse. La valeur plus générale donnée par la base est 1.10⁻¹/an à 1.10⁻³/an pour « l'ouverture inopinée d'une soupape (par exemple suite à la rupture du ressort) ». Il est précisé : « Une soupape est soumise à différents types de défaillance ; une défaillance partielle où la soupape « bat » est relativement fréquente, mais conduit à des conséquences généralement peu graves ».

BEVI :

Soupape de sécurité		Valeurs fournies	
Ouverture à débit maxi d'une soupape de sécurité		F	2.10 ⁻⁵ /an

12. AUTRES

La base ICSI fournit des fréquences pour les évènements suivants :

	Valeurs	Commentaires
Défaillance d'un système de régulation	1.10 ⁻¹ /an	On considère généralement que les défaillances de systèmes de régulation sont provoquées dans 15% des cas par la logique, pour 50% par les actionneurs et pour 35% par les capteurs
Perte d'alimentation électrique	de 10 ⁻¹ /an à 10 ⁻² /an	Fourchette de 10 ⁻¹ /an pour une alimentation non importante pour la sécurité, à 10 ⁻² /an pour une fonction importante pour la sécurité.
Défaillance d'un système d'utilité	de 1 à 1.10 ⁻¹ /an	Il s'agit par exemple des utilités de type refroidissement par eau, alimentation en azote. Cet événement pourra également apparaître en tant que PFD d'une barrière de protection ; la PFD sera alors de 10 ⁻¹ ou 10 ⁻² .
Erreur humaine sur une tâche habituelle	10 ⁻³ à 10 ⁻⁴ par opération	La méthode classique d'évaluation de la fréquence de ce type de défaillance sur une tâche isolable consiste à partir de la PFD pour une activité humaine (conditionné par divers facteurs évoqués ci-dessus), et multiplier par le nombre d'opération par an pour obtenir une fréquence d'occurrence. Valeurs de PFD de l'ordre de 10 ⁻³ à 10 ⁻⁴ par opération. Autre méthode d'évaluation : s'appuyer sur le principe de « l'unité type », en considérant des fréquences de l'ordre de 1/an pour des travaux routiniers et entre 10 ⁻¹ /an et 10 ⁻² /an si mise en œuvre des Bonnes Pratiques de Fabrication.
Erreur humaine sur une action de type procédurale (sur action non répétitive)	10 ⁻² par opération	



INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Aïata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - Internet : <http://www.ineris.fr>