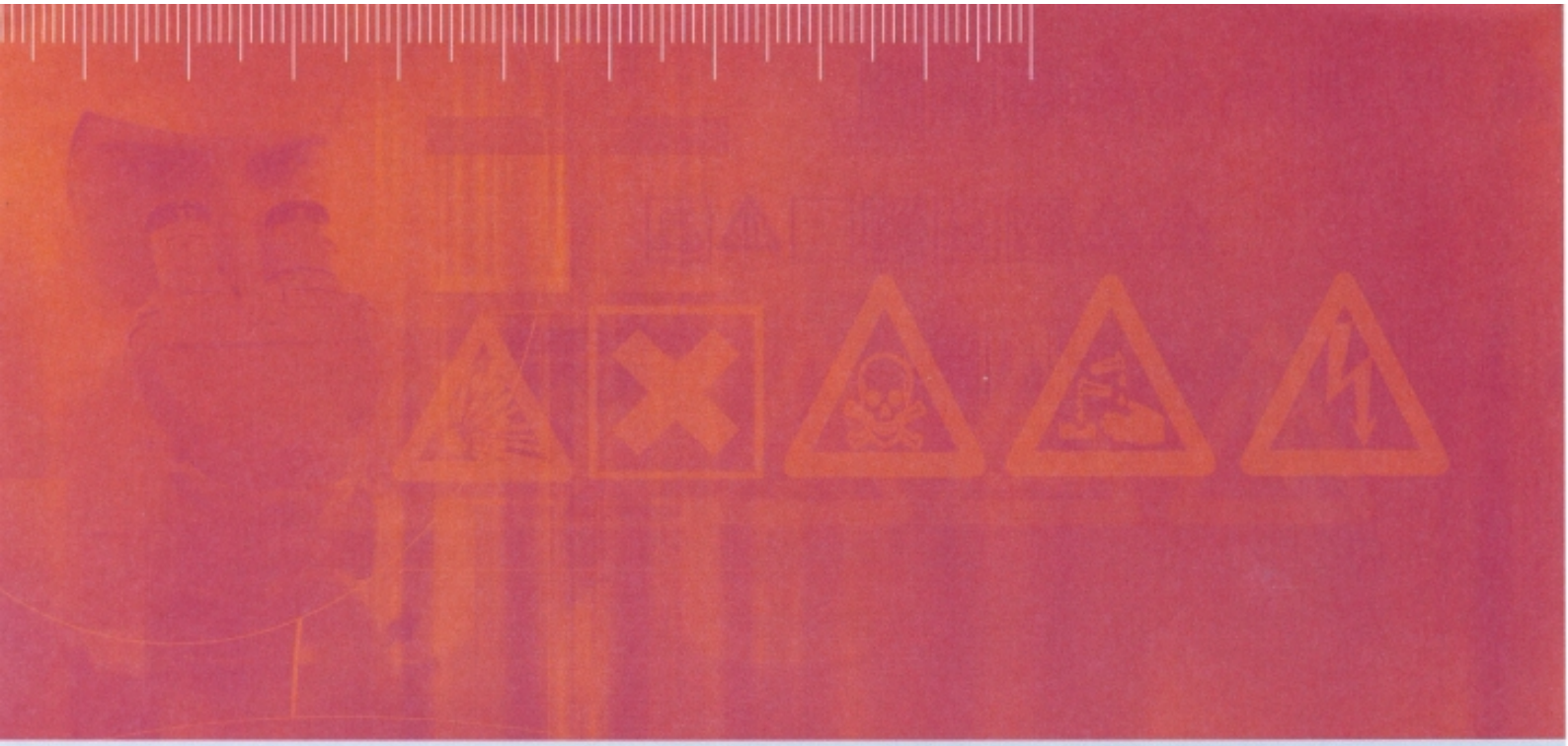


RAPPORT D'ÉTUDE 22/06/2015

N° DRA-13-133211-12545A

DRA 71 - Opération B

Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

DRA71 – Opération B

Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation

Direction des Risques Accidentels

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Valérie DE DIANOUS, Yann FLAUW, Agnès JANES, Souhila KRIBI, Emmanuel LEPRETTE.

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 équivalent 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	Yann FLAUW	Valérie DE DIANOUS	Christophe BOLVIN	Fréderic MERLIER	Sylvain CHAUMETTE
Qualité	Ingénieur Evaluation Quantitative des Risques Direction des Risques Accidentels	Ingénieur Evaluation Quantitative des Risques Responsable du programme d'appui DRA71 Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Evaluation Quantitative des Risques Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui à l'Administration Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle Analyse et Gestion Intégrées des Risques Direction des Risques Accidentels
Visa					

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 7

1.1 Contexte et objectifs 7

1.2 Champ des substances 8

1.3 Organisation du document 8

2. PROBABILITE D'INFLAMMATION OU FREQUENCE D'INFLAMMATION ... 9

2.1 Quand parler de probabilité et de fréquence d'inflammation ? 9

2.2 Différents types de probabilité d'inflammation 9

3. DIFFERENTES METHODOLOGIES D'EVALUATION DES PROBABILITES ET FREQUENCES D'INFLAMMATION 13

3.1 Utilisation de sources de données génériques (pratique usuelle) 13

3.2 Approche par jugement ou avis d'expert 13

3.3 Approche détaillée 14

3.4 Vers une approche semi-quantitative 14

4. PROPOSITION D'APPROCHE « SEMI-QUANTITATIVE » 17

4.1 Principes de l'approche proposée par l'INERIS 17

4.2 Gaz inflammables 18

4.3 Gaz liquéfiés cryogéniques 27

4.4 Liquides inflammables 27

4.5 Poussières ou poudres oxydables 40

5. CONCLUSION 45

6. REFERENCES 47

7. LISTE DES ANNEXES 49

GLOSSAIRE

ATEX	Atmosphères Explosives
BIS	Barrière Instrumentée de Sécurité
BO	Boil-Over
BOCM	Boil-Over Couche Mince
EDD	Etude de Dangers
EMI	Energie Minimale d'Inflammation
ERC	Evénement Redouté Central
HSL	Health and Safety Laboratory
IEMS	Interstice Expérimental Maximal de Sécurité
LII	Limite Inférieure d'Inflammabilité
LSE	Limite Supérieure d'Explosivité
P_{imm}	Probabilité d'inflammation immédiate
P_{ret}	Probabilité d'inflammation retardée
PhD	Phénomène Dangereux
PIE	Point Inférieur d'Explosivité
TAI	Température d'Auto-Inflammation
TIE	Température (limite) Inférieure d'Explosivité
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion

1. INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

La loi n°2003-699 du 30 juillet 2003[1] a introduit l'obligation de produire des études de dangers donnant lieu « à une analyse de risques qui prend en compte la probabilité d'occurrence, la cinétique et la gravité des accidents potentiels selon une méthodologie qu'elle explicite ». Des arrêtés et circulaires sont venus compléter cette exigence législative en déterminant ou proposant des règles d'élaboration des études de dangers. En particulier, 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 précise dans son article 2 comment évaluer la probabilité d'occurrence des phénomènes dangereux et accidents :

« L'évaluation de la probabilité s'appuie sur une méthode dont la pertinence est démontrée. Cette méthode utilise des éléments qualifiés ou quantifiés tenant compte de la spécificité de l'installation considérée. Elle peut s'appuyer sur la fréquence des événements initiateurs spécifiques ou génériques et sur les niveaux de confiance des mesures de maîtrise des risques agissant en prévention ou en limitation des effets. ».

Pour ce faire, l'INERIS utilise un outil de représentation combinant un arbre des défaillances avec un arbre des événements ; cet outil est appelé nœud-papillon. Dans un nœud-papillon, les inflammations suite à une perte de confinement de substances dangereuses sont le plus souvent représentées comme des événements secondaires conditionnés à un Evénement Redouté Central (ERC) de type perte de confinement d'un produit inflammable. Il est donc nécessaire de connaître les probabilités conditionnelles d'inflammation sachant qu'un rejet a eu lieu. Par abus de langage, elles seront simplement désignées par « probabilités d'inflammation » dans la suite de cette note.

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du programme d'appui technique DRA71 (Evaluation des risques des systèmes industriels) – opération B (Approches probabilistes). Il s'inscrit dans la suite du rapport DRA-11-117406-03282A[2] [1]. Ce dernier fournit une compilation de différentes sources contenant des données sur des probabilités d'inflammation. Le présent rapport propose une approche d'évaluation semi-quantitative des probabilités d'inflammation et des fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux de type explosion en fonction du type de produit. Cette approche s'appuie sur les résultats du rapport de 2012 et sur des jugements d'experts réalisés en groupes de travail internes à l'INERIS.

---

[1] *Loi n° 2003-699 du 30/07/03 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages*

[2] *Revue des valeurs génériques pour les probabilités d'inflammation présentes dans la littérature, 2012*

1.2 CHAMP DES SUBSTANCES

Les substances concernées par l'approche proposée dans ce rapport sont :

- les gaz inflammables (liquéfiés ou comprimés) ;
- les gaz inflammables liquéfiés cryogéniques ;
- les liquides inflammables ;
- les poussières inflammables.

Les substances inflammables ou combustibles solides non divisées sont exclues de ce rapport.

De plus, l'approche proposée dans ce rapport est au stade de projet : les valeurs sont à conforter (choix des classes de réactivité des gaz, des catégories de liquides inflammables, valeurs de probabilité pour les liquides de catégorie 1) et des développements à prévoir. De plus, des réductions de probabilités seront possibles selon des facteurs à définir.

1.3 ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent rapport est structuré de la manière suivante : après quelques rappels sur les probabilités d'inflammation et les fréquences d'inflammation (chapitre 2), il présente les différentes méthodologies d'estimation existant à ce jour (chapitre 3). Le chapitre 4 introduit l'approche « semi-quantitative », objet de ce rapport. Enfin, le chapitre 5 souligne les points restant à développer suite à ce rapport.

2. PROBABILITE D'INFLAMMATION OU FREQUENCE D'INFLAMMATION

2.1 QUAND PARLER DE PROBABILITE ET DE FREQUENCE D'INFLAMMATION ?

Pour qu'une réaction de combustion se produise, il est nécessaire de combiner la présence d'un combustible, d'un comburant, et d'apporter suffisamment d'énergie. Le mélange d'un comburant et d'un combustible dans des proportions adéquates peut former une ATEX (atmosphère explosive). Si elle est mise en présence d'une source d'inflammation, cette ATEX est susceptible de s'enflammer.

Lorsque l'on souhaite estimer la fréquence d'occurrence d'un phénomène dangereux associé à une inflammation, il existe ainsi deux situations, chacune nécessitant un traitement différent :

1. l'ATEX est présente en permanence et une source d'inflammation suffisamment énergétique pour amorcer la combustion est appliquée dans l'ATEX. On cherche alors à estimer directement une fréquence d'inflammation ;
2. l'ATEX n'est pas présente en permanence, et une source d'inflammation suffisamment énergétique est appliquée dans l'ATEX concomitamment à sa présence, ou était déjà présente lors de la formation de l'ATEX. On cherche alors à estimer une probabilité d'inflammation.

Dans le premier cas, parler de probabilité d'inflammation n'a pas de sens. En effet, comme rappelé au chapitre 1.1, une probabilité d'inflammation est la probabilité conditionnelle d'inflammation sachant qu'une perte de confinement d'une substance inflammable a eu lieu (c'est-à-dire sachant qu'une ATEX s'est formée). Il est ici impossible d'attribuer une fréquence à la formation d'une ATEX car elle est présente en permanence. On estimera donc dans ce cas directement la fréquence d'occurrence du phénomène dangereux, c'est à dire l'inflammation de l'ATEX.

2.2 DIFFERENTS TYPES DE PROBABILITE D'INFLAMMATION

Suite à un ERC de type rejet de produit inflammable, plusieurs phénomènes dangereux sont susceptibles de se produire :

- le jet enflammé ou le feu de nappe ;
- le BLEVE ;
- la dispersion atmosphérique ;
- le VCE ou l'UVCE ;
- le flash fire ;
- la boule de feu.

Pour pouvoir quantifier l'occurrence de certain de ces phénomènes, il est nécessaire de distinguer l'inflammation immédiate de l'inflammation retardée.

2.2.1 Probabilité d'inflammation immédiate

La définition de l'inflammation immédiate par rapport à l'inflammation retardée varie suivant les sources. Ainsi, Iddir [2] considère que l'inflammation immédiate devrait être décorrélée du temps, c'est-à-dire qu'il s'agit d'une inflammation instantanée se produisant lors de la libération à l'atmosphère du produit inflammable. En particulier, une inflammation survenant quelques secondes après la fuite devrait être considérée comme retardée. Dans ces conditions, l'inflammation immédiate ne devrait dépendre que des caractéristiques du produit (point d'éclair, température d'ébullition, débit ou masse du rejet, etc.) et être totalement indépendante des conditions externes.

Pourtant, plusieurs sources étendent la définition d'inflammation immédiate pour prendre également en compte les inflammations « rapides », c'est-à-dire qui surviennent peu de temps après le rejet. Les arbres d'événements du BEVI [3] utilisent cette notion pour l'inflammation immédiate.

Les autres bases de données ne définissent pas aussi clairement la notion de probabilité immédiate. Ainsi, le projet ARAMIS [11] propose de prendre en compte des facteurs comme la conception des installations, la présence d'une cuvette de rétention ou de barrières de prévention pour évaluer la probabilité d'inflammation immédiate. De tels facteurs ne peuvent pas avoir d'impact sur la probabilité d'inflammation instantanée, on peut donc supposer qu'il s'agit, comme pour le BEVI, d'inflammation rapide.

Le rapport Canvey [4] propose des valeurs de probabilités d'inflammation immédiate dépendant de la densité des sources d'inflammation à proximité immédiate du rejet : la définition d'inflammation immédiate semble donc également proche de l'inflammation rapide au sens du BEVI.

Dans une étude de dangers, l'objectif est d'évaluer les fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux. Il semble donc pertinent de retenir comme définition de l'inflammation immédiate celle retenue par le BEVI [3]. En effet, les probabilités ainsi estimées pourront directement être utilisées dans les arbres des événements associés à la perte de confinement étudiée pour quantifier les fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux susceptibles de se produire.

Il est de plus à noter que l'ensemble des bases s'accordent sur le fait que l'inflammation immédiate reste essentiellement gouvernée par les caractéristiques du produit et de la fuite, et de l'environnement immédiat de la source du rejet.

La probabilité d'inflammation immédiate sera notée P_{imm} dans le reste de ce document.

2.2.2 Probabilité d'inflammation retardée

Toute inflammation qui n'est pas immédiate (au sens de paragraphe précédent) est dite retardée. La probabilité d'inflammation retardée sera notée P_{ret} dans le reste de ce document.

Il faut cependant faire attention lors de l'utilisation de la probabilité d'inflammation retardée lors de la quantification. En effet, inflammation immédiate et retardée ne sont pas des événements indépendants mais consécutifs, l'inflammation retardée ne pouvant se produire que si l'inflammation immédiate n'a pas eu lieu. Ainsi, pour estimer la fréquence d'occurrence d'un phénomène dangereux issu d'une inflammation immédiate, il suffit de multiplier la fréquence d'occurrence de l'ERC par P_{imm}. En revanche, pour estimer la fréquence d'occurrence d'un phénomène dangereux (PhD) issu d'une inflammation retardée, il faudra multiplier par $(1 - P_{imm}) \times P_{ret}$ et non directement P_{ret} si l'on veut être précis mathématiquement. Multiplier par P_{ret} sera majorant mais peut être envisagé si la probabilité d'inflammation immédiate n'est pas accessible ni fiable ou si l'utilisateur souhaite avoir surestimé, de façon prudente, P_{imm}.

Remarque : dans le cas d'un traitement semi-quantitatif simple, multiplier par P_{ret} uniquement est suffisant en raison des approximations dues à l'utilisation de classes de fréquences.

Au contraire de l'inflammation immédiate, l'inflammation retardée est essentiellement gouvernée par les caractéristiques de l'environnement du rejet, en particulier le nombre et le type de sources d'inflammation présentes dans la zone d'inflammabilité du rejet, et par l'efficacité de ces sources d'inflammation. Les caractéristiques du produit sont bien sûr, comme pour l'inflammation immédiate, des paramètres à prendre en compte.

3. DIFFERENTES METHODOLOGIES D'EVALUATION DES PROBABILITES ET FREQUENCES D'INFLAMMATION

3.1 UTILISATION DE SOURCES DE DONNEES GENERIQUES (PRATIQUE USUELLE)

La pratique usuelle est d'utiliser des bases de données génériques ou des guides par type de substances. L'ensemble de ces bases, et des valeurs qu'elles contiennent, est présenté dans le rapport 2012 [1]. Pour rappel, les bases couramment utilisées sont :

- le GT DLI [5] pour les liquides inflammables (probabilités d'inflammation et fréquences de pressurisation, feu de bac et boil-over) ;
- le BEVI [3] ou l'UKOOA [6] pour les gaz inflammables ;
- le guide GT silos [7] pour les explosions de poussières.

Nous pouvons également citer un livre du CCPS [13] sur les rejets de substances inflammables.

Cette approche présente l'avantage d'être simple d'utilisation et de fournir rapidement une valeur de probabilité ou de fréquence. Cependant, elle présente certains défauts :

- certaines bases distinguent les probabilités d'inflammation immédiates et retardées, d'autres non. Les définitions mêmes d'inflammation immédiate et retardée diffèrent d'une base à l'autre ;
- les données présentes dans les différentes bases sont très rarement tracées. Il est donc difficile de garantir leur applicabilité dans un contexte précis ;
- les valeurs proposées par ces bases sont des valeurs moyennes, et il est impossible en les utilisant de prendre en compte des spécificités locales ;
- les bases se recoupent mais ne donnent pas nécessairement les mêmes valeurs. Il est dès lors difficile de savoir quelle base utiliser.

3.2 APPROCHE PAR JUGEMENT OU AVIS D'EXPERT

Cette approche (qui ne concerne que les probabilités d'inflammation) consiste à attribuer une valeur à la probabilité d'inflammation par avis d'expert, sans utiliser de source de données spécifique.

La probabilité pourra soit être prise égale à 1, de manière majorante (tout rejet s'enflamme), soit décotée par un ou plusieurs facteurs de 10 sur la base d'un jugement d'expert. Par exemple, elle pourra être prise égale à 10^{-1} pour une fuite d'un produit que l'expert juge peu inflammable, ou égale à 10^{-2} pour un rejet vertical d'une soupape placée en hauteur.

Si les avis d'experts se basent sur des données de retour d'expérience reconnues, ou sur des choix justifiés, comme pour les rejets de soupapes en hauteur (où une modélisation 3D peut justifier une décote des valeurs de probabilités d'inflammation), cette approche peut être considérée comme acceptable.

3.3 APPROCHE DETAILLEE

Cette approche consiste à réaliser une étude détaillée de l'ERC étudié et de l'environnement afin d'estimer plus finement la probabilité d'inflammation. Cette étude se découpe en 2 parties.

Pour estimer la probabilité d'inflammation immédiate, il s'agit de recenser toutes les causes de perte de confinement et d'évaluer la probabilité d'inflammation en fonction de l'énergie apportée par la cause de la perte de confinement et de la réactivité de la substance (notamment son énergie minimale d'inflammation – EMI).

Pour estimer la probabilité d'inflammation retardée, un calcul de porte ET va être utilisé. D'une part, il faut estimer la fréquence de présence de l'ATEX (fréquence de l'ERC) et sa « durée de vie », c'est-à-dire la durée pendant laquelle l'ATEX s'enflamme si une source d'inflammation d'énergie suffisante y est introduite. Il faut ensuite modéliser la taille et la forme de l'ATEX, puis recenser l'ensemble des sources d'inflammation d'énergie suffisante présentes dans ce volume.

Enfin, pour chacune des sources d'inflammation identifiées, il est nécessaire d'évaluer leur fréquence de présence, et la durée moyenne pendant laquelle elles seront présentes.

L'ensemble de ces données peut alors être utilisé dans le calcul de la porte ET pour obtenir la probabilité d'inflammation retardée.

Le défaut principal de cette approche est sa complexité, aussi bien pour le temps nécessaire à collecter les données que pour la difficulté d'obtention de ces données.

Néanmoins, sur certains cas nécessitant une démarche plus fine, il peut être nécessaire de la mettre en œuvre.

3.4 VERS UNE APPROCHE SEMI-QUANTITATIVE

Aucune des 3 approches présentées ci-dessus n'est pleinement satisfaisante. Chacune présente des défauts ou demande un travail approfondi de collecte de données ou d'évaluation de la qualité d'une base avant de pouvoir obtenir une valeur de probabilité/fréquence utilisable.

Nous proposons pour cela une nouvelle approche, dite « semi-quantitative » car les valeurs de probabilités présentées sont des puissances de 10, inspirée des 3 méthodes précédentes. Cette méthode est détaillée au chapitre 4.

Les avantages et inconvénients des 4 méthodes présentées dans ce chapitre sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Liste des avantages et inconvénients de chaque méthode

	Avantages	Inconvénients
Approche simplifiée par utilisation de sources de données génériques.	Simple à utiliser.	Mauvaise traçabilité.
		Valeurs différentes d'une base à l'autre.
	Rapide à mettre en œuvre.	Certaines bases ne distinguent pas inflammation immédiate et retardée.
		Valeurs moyennes : impossibilité de prendre en compte des spécificités d'un site.
Approche par jugement d'expert	Possibilité de prendre en compte des spécificités du site (environnement, contexte).	Difficile de juger de la validité des valeurs.
Approche détaillée	Seule approche à prendre en compte de manière quantifiée l'environnement du site (contrôle des sources d'inflammation).	Informations nécessaires souvent non disponibles : fréquence et temps de présence des différents types de source d'inflammation.
	Les probabilités issues de cette approche sont en parfaite adéquation avec le site car calculées à l'aide du REX interne.	Il est recommandé d'avoir un outil Excel pour faciliter le calcul ; peut prendre plusieurs minutes sinon.
Approche semi-quantitative	Les valeurs sont arrondies à des sous-puissances de 10 pour être plus facilement utilisées (surtout dans le cas d'un traitement semi-quantitatif d'un nœud-papillon).	Toutes les valeurs proposées sont des jugements d'experts issus des différentes bases de données de l'approche simplifiée.
	Beaucoup de cas particuliers permettent un traitement spécifique de certaines substances ou situations.	Faible prise en compte des spécificités du site.
		Perte d'information par rapport aux sources utilisées lors des arrondis.

4. PROPOSITION D'APPROCHE « SEMI-QUANTITATIVE »

4.1 PRINCIPES DE L'APPROCHE PROPOSEE PAR L'INERIS

L'objectif de la méthode est de pouvoir proposer une approche simple « paramétrée », c'est-à-dire un ensemble de probabilités et de fréquences en fonction des valeurs de paramètres jugés importants dans le phénomène d'inflammation.

Pour l'inflammation immédiate, la valeur dépend :

- des causes possibles ; le paramètre retenu est le débit de fuite[3] ;
- de la réactivité de la substance ; le paramètre retenu est la réactivité de la substance (en corrélation avec son EMI et sa vitesse de combustion laminaire pour les gaz et en corrélation avec sa catégorie pour les liquides).

Pour l'inflammation retardée, la valeur dépend :

- de la position du nuage par rapport à des sources d'inflammation potentielles[4] ; le paramètre retenu est le classement en zones ATEX[5] ;
- de la réactivité de la substance ; le paramètre retenu est ici encore la réactivité de la substance (en corrélation avec son EMI et sa vitesse de combustion laminaire pour les gaz et en corrélation avec sa catégorie pour les liquides).

L'approche proposée est semi-quantitative, c'est-à-dire que les valeurs de probabilités proposées sont des puissances de 10. De plus, pour faciliter les calculs et pour s'assurer de ne pas être minorant sur les phénomènes d'explosion en cas d'inflammation retardée, les probabilités sont à utiliser « telles que » : on applique P_{imm} pour déterminer la fréquence d'un feu torche et on applique directement P_{ret} pour déterminer la fréquence d'une explosion, contrairement à l'approche proposée dans le BEVI ou la probabilité d'inflammation retardée doit être en plus multipliée par $1 - P_{imm}$.

Les valeurs présentées dans ce rapport ont été déterminés par un groupe de travail interne composé d'experts de l'analyse des risques et de phénoménologie des substances. Les valeurs issues de plusieurs bases de données ont été étudiées et comparées pour retenir celles qui semblaient les plus adaptées. Ces choix sont tracés en annexe 2.

---

[3] L'inflammation immédiate dépend en effet de l'énergie fournie par l'événement initiateur causant la fuite. Nous considérons que cette énergie est bien représentée par le débit de fuite : des fuites de fort débit ont plus de chances d'avoir été causées par des événements initiateurs de forte énergie.

[4] Il est également possible d'envisager une étude détaillée telle que présentée au chapitre 3.

[5] Une zone « classée ATEX » signifie qu'une étude spécifique a été réalisée et que du matériel adapté a été mis en place.

4.2 GAZ INFLAMMABLES

4.2.1 Réactivité des gaz

Il est dans un premier temps nécessaire de répartir les gaz par catégorie, afin de pouvoir leur attribuer des probabilités d'inflammation différentes en tenant compte de leur réactivité. L'annexe 1 présente une synthèse d'études de sensibilité de substances inflammables par rapport à des sources d'inflammation.

Les résultats de cette étude nous ont incités à répartir les gaz en 4 catégories, en fonction de leur réactivité :

- les gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…) ;
- les gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés ci-dessus) ;
- les gaz peu réactifs (hors ammoniac) ;
- l'ammoniac.

Le classement des substances s'effectue en fonction de leurs propriétés physico-chimiques (EMI, TAI, interstice minimal de sécurité - IEMS, vitesse de combustion laminaire, etc.). La connaissance du comportement de certaines substances peut conduire au cas par cas à modifier leur classement et les probabilités des phénomènes dangereux présentés ci-après. Pour plus de renseignements, le lecteur peut se référer à la « fiche des gaz inflammables » [9].

4.2.2 Arbres des événements proposés : gaz inflammables liquéfiés

4.2.2.1 Rejet continu (tuyauterie, brèche capacité, soupape…)

En fonction de l'environnement dans lequel s'effectue le rejet, les phénomènes dangereux retenus ne sont pas les mêmes. On distingue ainsi deux types de rejets continus :

- le rejet continu en extérieur ; on pourrait distinguer deux cas selon que la tuyauterie est aérienne (rejet horizontal) ou enterrée (rejet incliné). En pratique un seul arbre est présenté mais le paramètre « orientation » du jet est pris en compte ;
- le rejet continu dans un local. Nous proposons pour ce type de rejet le même arbre sauf que l'UVCE est remplacé par l'explosion à l'intérieur du local. De plus, le feu torche ne sera pas examiné si le bâtiment dispose de murs et toitures coupe-feu. La proportion de gaz inflammable dans le local dépend de la durée de fuite.

Pour la construction de l'arbre des événements du rejet continu de gaz inflammable liquéfié, nous avons fait les choix suivants :

- les natures des phases et les événements associés ne sont pas détaillés dans les arbres mais ces paramètres sont à prendre en compte dans les modélisations des effets. La formation de flaques au sol est à étudier ;

- les effets toxiques éventuels en cas d'inflammation ne sont pas représentés sur l'arbre générique proposé ci-après ; une branche effet toxique devra être rajouté après l'inflammation pour les produits concernés (par exemple les effets toxiques des fumées pour des produits chlorés) ;
- l'UVCE/VCE et le flash fire sont regroupés ;
- nous proposons dans l'arbre des barrières couramment rencontrées. Il faudra cependant vérifier qu'elles sont bien présentes avant d'utiliser l'arbre. En particulier, elles ne sont pas valables pour des brèches sur des équipements. Leurs performances sont à étudier au cas par cas.

Pour les rejets continus en extérieur, nous proposons ainsi l'arbre des événements suivant :

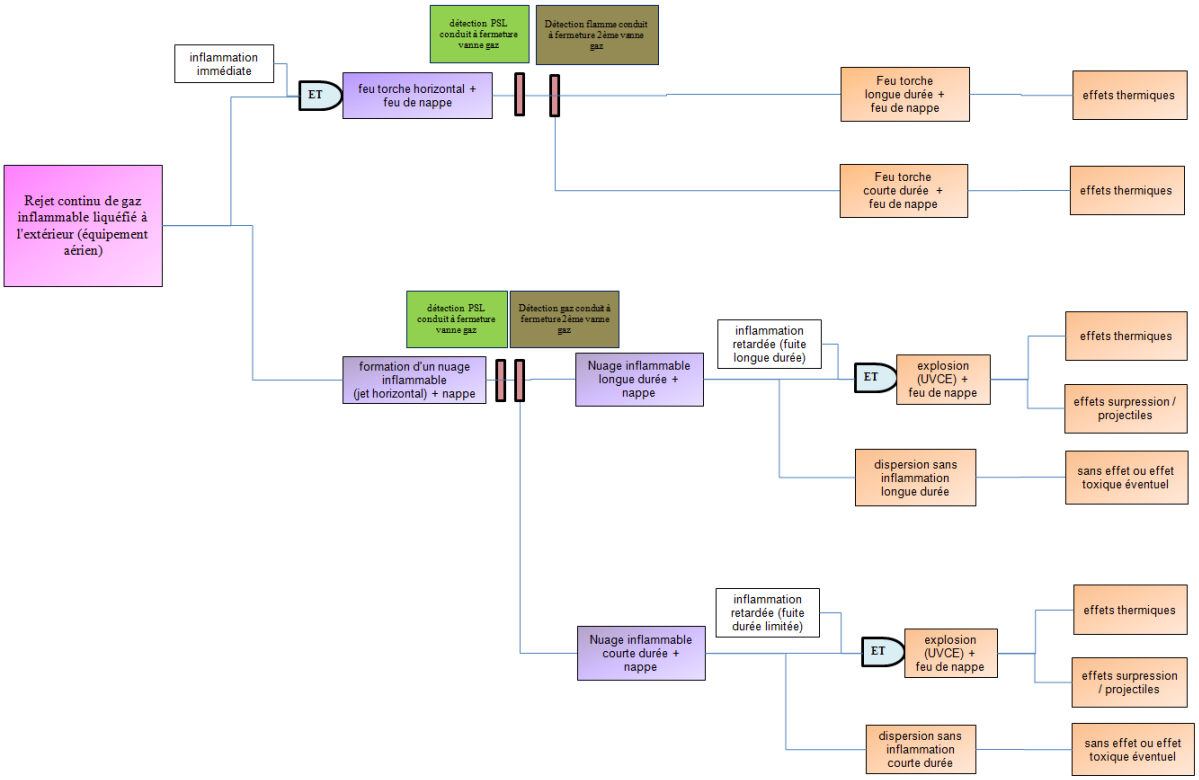


Figure 1 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet continu d'un gaz inflammable liquéfié

Il est à noter que conformément à la fiche n°3 de la circulaire du 10 mai 2010 : « Les données expérimentales pour le butane et le propane montrent qu'en cas de fuite sur la phase liquide, il n'y a quasiment pas de formation de flaque au sol si le rejet n'est pas impactant. Il n'y a donc pas de calcul d'évaporation de flaque. ». Pour les autres substances, la formation de nappes est possible comme indiqué sur la figure 1.

Pour les fuites sur une tuyauterie enterrée à l'extérieur, l'arbre est identique sauf que le rejet est orienté différemment. Nous référons le lecteur au guide GESIP [8] pour plus d'informations.

Pour quantifier les phénomènes dangereux thermiques identifiés dans la figure 1, il est donc nécessaire de calculer 3 probabilités pour les gaz inflammables liquéfiés :

- la probabilité d'inflammation immédiate ;
- la probabilité d'inflammation retardée avec fuite de longue durée ;
- la probabilité d'inflammation retardée avec fuite de courte durée suite au fonctionnement d'une Barrières Instrumentées de Sécurité (BIS) de type détection et isolement.

Note : si une explosion se produit, on peut considérer que le feu torche prend le relais (il y a un phénomène de remontée de la flamme au niveau de la brèche). On retient dans ce cas à durée équivalente la fréquence maximale du feu torche issu de l'inflammation immédiate ou retardée.

4.2.2.2 Rejet instantané (ruine capacité…)

Pour la construction de l'arbre des événements du rejet continu de gaz inflammable liquéfié, nous avons fait les choix suivants :

- l'UVCE/VCE et le flashfire sont regroupés ;
- la branche relative à l'explosion en cas d'inflammation immédiate est supprimée. C'est la modélisation qui décidera de la taille du nuage lors de l'inflammation immédiate.

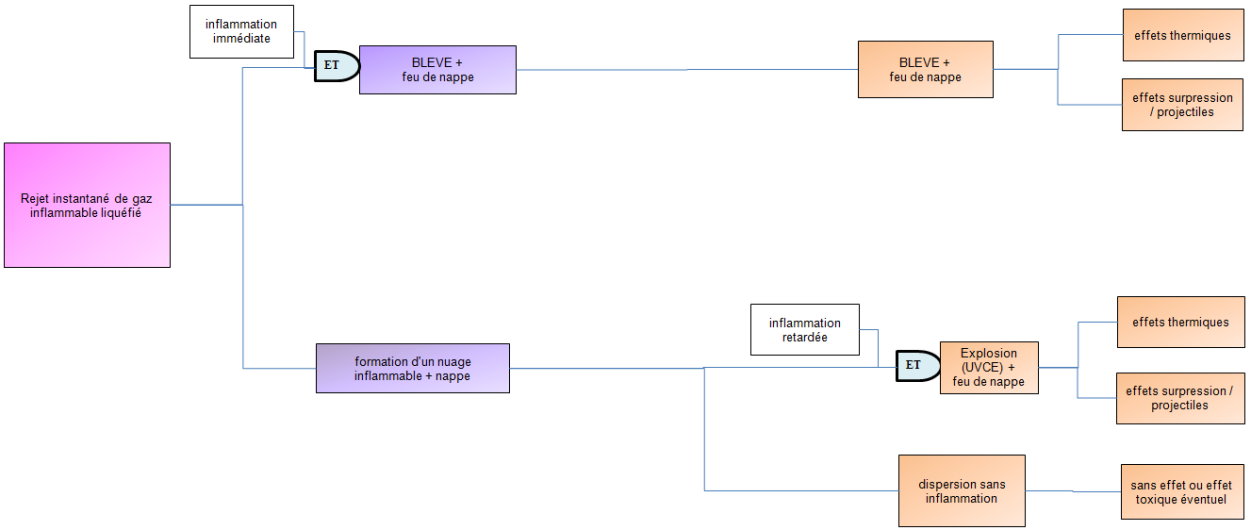


Figure 2 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet instantané d'un gaz inflammable liquéfié

Pour quantifier les phénomènes dangereux thermiques identifiés dans la figure 2, il est donc nécessaire de calculer la probabilité d'inflammation immédiate et retardée.

4.2.3 Arbres des événements proposés : gaz inflammables comprimés

4.2.3.1 Rejet continu (tuyauterie, brèche capacité, soupape…)

Comme pour les gaz inflammables liquéfiés, nous distinguons les rejets continus en extérieur et dans un local (cf. 4.2.2.1). De plus, pour la construction de l'arbre des événements du rejet continu de gaz inflammable comprimé, nous avons fait les mêmes choix que pour le rejet de gaz liquéfié :

- l'UVCE et le flash fire sont regroupés ;
- les effets toxiques éventuels en cas d'inflammation sont à traiter au cas par cas. Ils ne sont pas représentés sur les arbres ;
- nous proposons dans l'arbre des barrières couramment rencontrées pour réduire le temps de fuite. Il faudra cependant vérifier qu'elles sont bien présentes avant d'utiliser l'arbre. En particulier, elles ne sont pas valables pour des brèches sur des équipements. Leurs performances sont à étudier au cas par cas.

Pour les rejets continus en extérieur, nous proposons ainsi l'arbre des événements suivant :

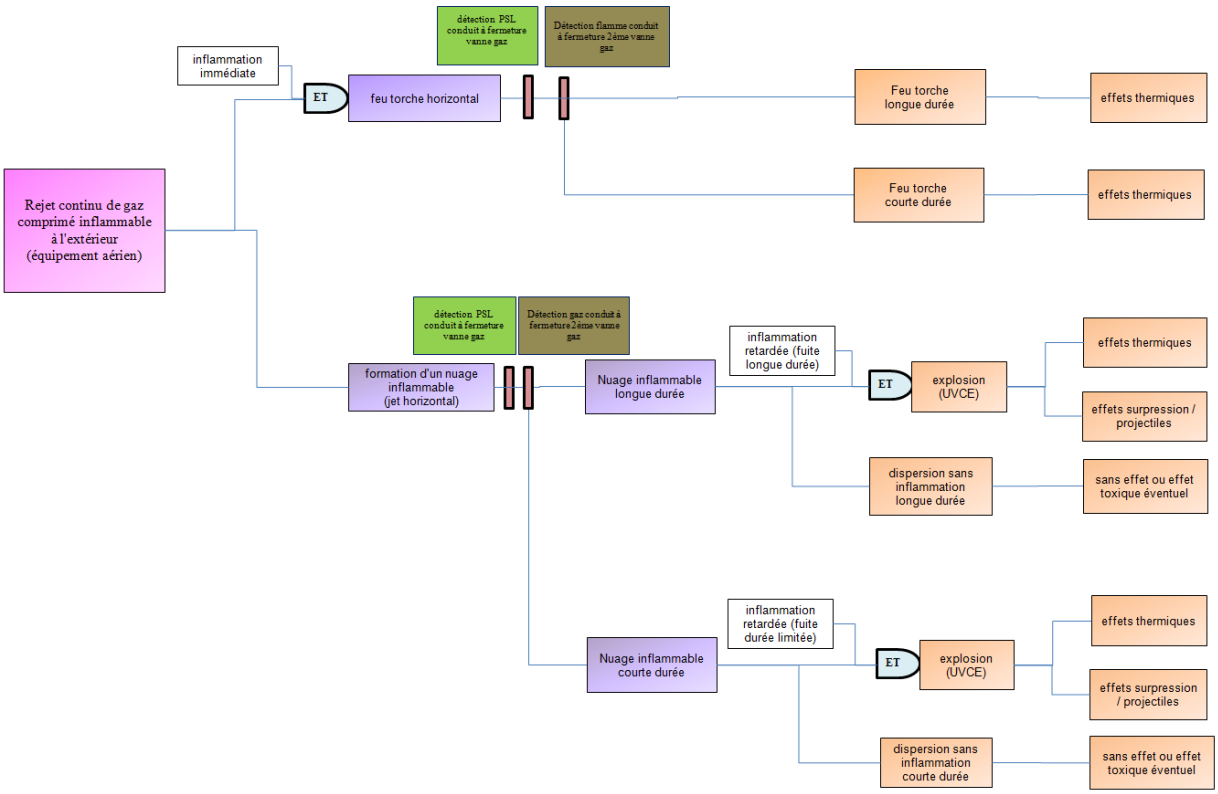


Figure 3 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet continu d'un gaz inflammable comprimé à l'extérieur

Pour les fuites sur une tuyauterie enterrée à l'extérieur, l'arbre est identique sauf que le rejet est orienté différemment. Nous référons le lecteur au guide GESIP [8] pour plus d'informations.

Pour quantifier les phénomènes dangereux thermiques identifiés dans la figure 3, il est donc nécessaire de calculer 3 probabilités pour les gaz inflammables liquéfiés :

- la probabilité d'inflammation immédiate ;
- la probabilité d'inflammation retardée avec fuite de longue durée ;
- la probabilité d'inflammation retardée avec fuite de courte durée.

Attention : si une explosion se produit, on peut considérer que le feu torche prend le relais (il y a un phénomène de remontée de la flamme au niveau de la brèche). On retient dans ce cas à durée équivalente la fréquence maximale du feu torche issu de l'inflammation immédiate ou retardée.

4.2.3.2 Rejet instantané (ruine capacité…)

Pour la construction de l'arbre des événements du rejet continu de gaz inflammable comprimé, nous avons fait les choix suivants :

- l'UVCE/VCE et le flashfire sont regroupés ;
- la branche relative à l'explosion en cas d'inflammation immédiate est supprimée. C'est la modélisation qui décidera de la taille du nuage lors d'une inflammation immédiate. De manière simplifiée, on appelle cela « boule de feu ».

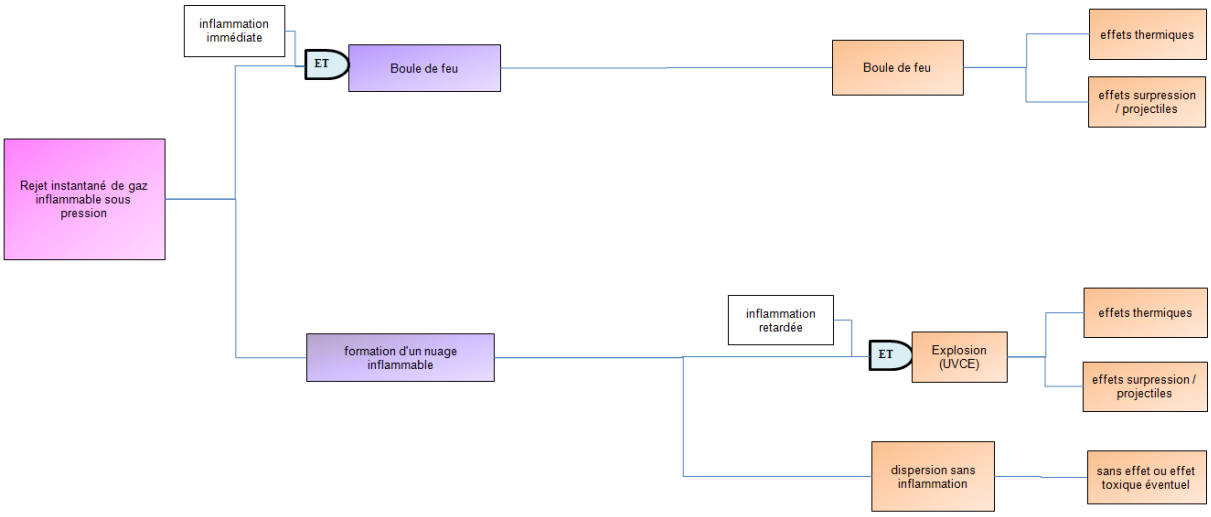


Figure 4 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet instantané d'un gaz inflammable comprimé

Pour quantifier les phénomènes dangereux thermiques identifiés dans la figure 4, il est donc nécessaire de calculer la probabilité d'inflammation immédiate et retardée.

4.2.4 Probabilités d'inflammation immédiate (gaz inflammables liquéfiés et comprimés)

Ce chapitre présente les valeurs proposées pour les probabilités d'inflammation immédiate et retardée. Une comparaison des valeurs proposées avec celles issues de différents guides est présentée en annexe 2.

4.2.4.1 Rejet continu

En s'inspirant des ordres de grandeur du BEVI (cf. annexe 2), nous proposons le tableau suivant pour les probabilités d'inflammation immédiate d'un rejet continu :

Tableau 2 : Probabilités d'inflammation immédiate d'un rejet continu d'un gaz inflammable en fonction de sa réactivité

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac</th></tr>
<tr><td colspan="2">ERC induit par une source d'énergie</td><td colspan="3">1</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="3">ERC non induit par une source d'énergie (corrosion, fuite de joint…) : selon le débit de fuite Q et la réactivité du gaz, la probabilité augmente</td><td>Si Q > 10 kg/s</td><td colspan="2">1</td><td>10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si 1 kg/s < Q < 10 kg/s</td><td>1</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si Q < 1 kg/s</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>10^{-2}</td><td>0</td></tr>
</table>

<u>Cas particulier</u> : dans le cas d'une ouverture de soupape avec rejet vertical (hors feu enveloppant), nous proposons de retenir comme probabilité d'inflammation immédiate 10^{-2}, quelle que soit la réactivité du produit.

4.2.4.2 Rejet instantané

Sur la base des éléments du BEVI (cf. annexe 2), nous retenons le tableau suivant :

Tableau 3 : Probabilités d'inflammation immédiate d'un rejet instantané de gaz inflammable en fonction de sa réactivité

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac</th></tr>
<tr><td colspan="2">ERC induit par une source d'énergie</td><td colspan="3">1</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ERC non induit par une source d'énergie (corrosion, fuite de joint…) : selon le débit de fuite Q et la réactivité du gaz, la probabilité augmente</td><td>Si Q > 1000 kg</td><td colspan="2">1</td><td>10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si Q < 1000 kg</td><td>1</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>0</td></tr>
</table>

4.2.5 Probabilités d'inflammation retardée (gaz inflammables liquéfiés et comprimés)

4.2.5.1 Rejet continu

Rappel : les probabilités ne sont pas à utiliser comme celles du BEVI : pour un ERC donné, on applique P_{imm} pour déterminer la fréquence d'un feu torche et on applique directement P_{ret} pour déterminer la fréquence d'une explosion.

La probabilité d'inflammation retardée dépend de la durée de présence de l'ATEX. En cas de fuite de durée limitée, la probabilité d'inflammation retardée est théoriquement réduite. Nous proposons donc 2 séries de probabilités d'inflammation retardée, une pour les fuites longue durée (plus de 30 secondes), une pour les fuites de courte durée (inférieures à 30 secondes).

Inflammation retardée (UVCE) avec fuite de longue durée

Il est proposé de retenir pour les gaz moyennement et hautement réactifs (soit la majorité des substances) les valeurs de probabilité d'inflammation retardée données par le guide du GT DLI pour les substances de catégorie B[6]. Pour les gaz très réactifs particuliers et les gaz peu réactifs, des surcotes et des décotes sont appliquées.

[6] *Ce sont les substances dont le point d'éclair est inférieur à 55°C et non classées extrêmement inflammables.*

Note : L'ammoniac (catégorie inflammable R10, classe 2 selon le règlement CLP et faiblement réactif) est traité séparément. Il est dans la même classe que les catégories B. On adopte donc les chiffres du GT DLI pour les catégories B. Cependant, sur la base de l'accidentologie, l'inflammation de l'ammoniac n'est retenue qu'en milieu confiné. A l'extérieur, on ne retient pas d'UVCE. De plus, la zone dans laquelle le nuage est présent ne doit pas nécessairement être classée ATEX : si des mesures sont prises pour couper les alimentations électriques des équipements non classés sur détection de fuite et que le nuage n'a pas le temps d'atteindre ces équipements, on considère que le « nuage est contenu dans une zone ATEX ».

Sur la base de ces éléments, nous proposons pour les probabilités d'inflammation retardée des gaz inflammables liquéfiés le tableau suivant :

Tableau 4 : Probabilités d'inflammation retardée des gaz inflammables liquéfiés en fonction de leur réactivité pour une fuite longue durée

<table>
<tr><th>Nuage contenu dans la zone</th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac (en milieu confiné)</th></tr>
<tr><td>Absence de sources d'inflammation (notamment absence de personnel et de voies de circulation, par exemple zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)</td><td>10^{-1}</td><td colspan="3">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>« Classée ATEX » avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)</td><td>10^{-1}</td><td>10^{-2}</td><td colspan="2">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>« Classée ATEX » avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)</td><td>1</td><td>10^{-1}</td><td colspan="2">10^{-2}</td></tr>
<tr><td>Nuage contenu dans une « zone non classée ATEX » contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)</td><td colspan="2">1</td><td colspan="2">10^{-1}</td></tr>
</table>

Remarques :

- une zone « classée ATEX » signifie qu'une étude spécifique a été réalisée et que du matériel adapté a été mis en place ;
- la valeur de 10^{-1} de la case en bas à droite du tableau 3 est à pondérer par le volume des nuages : pour des nuages très étendus, une probabilité plus importante pourrait être retenue ;
- si le nuage atteint des zones non classées ATEX avec des sources d'inflammation potentielles, une évaluation au cas par cas est possible pour réduire la probabilité en considérant la probabilité d'avoir simultanément une source d'inflammation et un nuage inflammable ;
- pour l'ammoniac, on ne retient pas de VCE en extérieur ; les valeurs proposées dans le tableau sont applicables à des zones confinées. Pour une salle des machines de réfrigération, on considère une probabilité de 10^{-2} dans la mesure où le local est équipé de détecteurs avec coupure des alimentations électriques non dimensionnées pour une utilisation en atmosphère explosible.

Inflammation retardée (UVCE) avec fuite de courte durée (inférieure à 30 secondes)

Des évaluations de probabilités pour diverses configurations (fréquences et durées de présence des sources d'inflammation, durée de présence du nuage) ont montré que des facteurs de décote supérieurs à 10 ne pouvaient être appliqués que lorsque la durée de présence des sources d'inflammations est inférieure à 30 secondes par jour (cf. annexe 2). Nous proposons donc le tableau suivant :

Tableau 5 : Probabilités d'inflammation retardée des gaz inflammables liquéfiés en fonction de leur réactivité pour une fuite courte durée

<table>
<tr><th>Nuage contenu dans la zone</th><th>Gaz très réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac (en milieu confiné)</th></tr>
<tr><td>Absence de sources d'inflammation et absence de personnel et voies de circulation (zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)</td><td>10^{-1}</td><td colspan="3">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>Classée ATEX avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)</td><td>10^{-1}</td><td>10^{-3}(*)</td><td colspan="2">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>Classée ATEX avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)</td><td>1</td><td>10^{-1}</td><td colspan="2">10^{-2}</td></tr>
<tr><td>Nuage contenu dans une zone non classée ATEX contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)</td><td colspan="2">1</td><td colspan="2">10^{-1}</td></tr>
</table>

(*) Seule valeur modifiée par rapport aux fuites longue durée

Note : la réduction de probabilité proposée dans ce tableau ne concerne qu'une case : les gaz moyennement et hautement réactifs en zone « classée ATEX » avec présence de personnel occasionnelle. En revanche, la limitation de la durée de fuite réduit également la taille du nuage et peut permettre de changer de ligne dans le tableau, entraînant ainsi une réduction de probabilité.

4.2.5.2 Rejet instantané

En considérant les arbres présentés au paragraphe 4.2.2 et 4.2.3, on retient comme probabilités d'inflammation retardée pour le rejet instantané les mêmes valeurs que pour le rejet continu de longue durée.

4.3 GAZ LIQUEFIES CRYOGENIQUES

La phase de la substance ne modifie pas les probabilités d'inflammation. Le rejet froid conduirait à générer plus de décharges électrostatiques mais sans que cela modifie notablement les classes de probabilités d'inflammation considérées (exemple du gaz naturel). En revanche :

- le comportement est différent car il s'agit non plus d'un gaz mais d'un liquide froid. Etant alors de comportement « lourd », il tend à s'accumuler au sol. Les arbres d'événements sont donc différents ;
- les limites d'inflammabilité sont modifiées (LIE/LSE).

Avec ces précautions, les valeurs de probabilités d'inflammation retenues pour les gaz liquéfiés cryogéniques peuvent être prises identiques à celles des gaz liquéfiés et sous pression, présentées au paragraphe 4.2.

4.4 LIQUIDES INFLAMMABLES

4.4.1 Catégories des liquides inflammables

Nous proposons de reprendre les catégories retenues par le règlement CLP/SGH (Système Général Harmonisé) en vigueur depuis le 20 janvier 2009. Ce règlement remplace le règlement CLP préexistant.

Le nouveau règlement a légèrement modifié les catégories de liquides inflammables. Il répartit les liquides inflammables en 3 catégories :

- la catégorie 1 représente les liquides extrêmement inflammables : tous les liquides dont le point d'éclair est strictement inférieur à 23°C et le point initial d'ébullition inférieur ou égal à 35°C ;
- la catégorie 2 représente les liquides très inflammables : tous les liquides dont le point d'éclair est strictement inférieur à 23°C et le point initial d'ébullition strictement supérieur à 35°C ;
- la catégorie 3 représente les liquides inflammables : tous les liquides dont le point d'éclair est supérieur ou égal à 23°C et inférieur ou égal à 60°C[7].

[7] *Les liquides de point d'éclair supérieur à 60°C ne sont pas considérés comme des liquides inflammables par le règlement CLP mais comme des liquides combustibles.*

Les différences avec le règlement préexistant sont illustrées sur la figure suivante. La ligne du haut correspond au nouveau règlement CLP/SGH, et la ligne du bas au règlement préexistant.

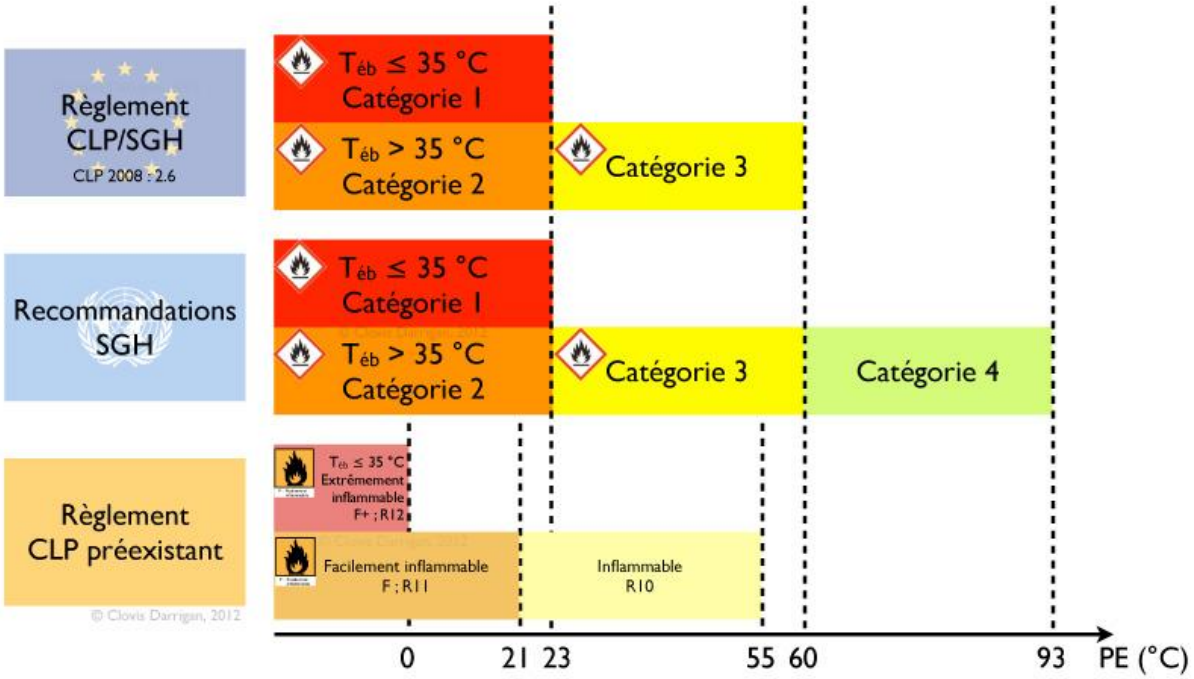


Figure 5 : Comparaison entre le règlement CLP préexistant et le nouveau règlement CLP/SGH

Les substances concernées par le changement de catégories sont :

- celles ayant un point d'éclair entre 55°C et 60°C, qui passent de non inflammables à la catégorie 3 ;
- celles ayant un point d'éclair entre 21°C et 23°C qui passent de la catégorie R10 à la catégorie 1 ou 2 en fonction du point d'ébullition ;
- celles ayant un point d'éclair entre 0°C et 21°C de R11 à la catégorie1 ou 2 en fonction du point d'ébullition.

Le document qui nous a servi de source pour proposer des valeurs de probabilités d'inflammation pour les liquides inflammables est le guide GT DLI [5], qui utilise un classement différent du règlement CLP préexistant ou actuel pour les liquides inflammables. Les différences entre le règlement préexistant sont illustrées par la figure suivante.

<table>
<tr><th>Point d'éclair[1]</th><th colspan="2">Nomenclature
Réglementation ICPE</th><th>RAEDHL (art 101)
Réglementation Industrie</th><th>Arrêté 20/04/94
Réglementation santé-travail</th></tr>
<tr><td rowspan="3">0°C
21°C
55°C</td><td>« A » (Extrêmement inflammable) Avec Psat à 35°C>100 kPa</td><td>« B » (Inflammable 1ère catégorie)</td><td rowspan="3">Catégorie B (1ère classe)</td><td>Extrêmement inflammable (F+ ou R12) avec point d'ébullition ≤ 35°C</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">« B »
(Inflammable 1ère catégorie)</td><td>Facilement inflammable (F ou R11)</td></tr>
<tr><td>Inflammable (R10)</td></tr>
<tr><td>100°C</td><td colspan="2">« C » hors fioul lourd
(Inflammable 2ème catégorie)</td><td>Catégorie C (2ème classe)
Sous catégorie C2</td><td></td></tr>
</table>

Figure 6 : Comparaison entre les catégories du GT DLI (première colonne) et le règlement CLP préexistant (dernière colonne)

Nous avons utilisé les valeurs du guide GT DLI comme base pour les probabilités proposées dans ce rapport. Ces valeurs sont données pour les liquides de catégorie B et C.

La catégorie 1 du nouveau règlement CLP inclut strictement la catégorie A du GT DLI : elle contient, en plus de la catégorie A, tous les liquides dont le point d'éclair est compris entre 0°C et 23°C, et dont le point d'ébullition est inférieur ou égal à 35°C. Les produits de catégorie B qui ne sont pas déjà positionnés en catégorie 1 correspondent aux catégories 2 et 3 du règlement CLP. Les produits de catégorie C sont répartis entre la catégorie 3 pour ceux dont le point d'éclair est compris entre 55°C et 60°C et la catégorie combustible non inflammable pour ceux dont le point d'éclair est supérieur à 60°C.

Remarque : le disulfure de carbone est traité séparément en raison de ses caractéristiques et de sa très forte réactivité. Les probabilités d'inflammation (immédiates et retardées) qui lui sont associées sont celles de l'hydrogène (tableaux 1 à 4).

Pour les liquides inflammables, la méthode que nous proposons est largement inspirée du guide GT DLI [5]. Nous proposons donc :

- des probabilités d'inflammation (immédiates et retardées) pour les rejets continus ou instantanés ;
- des fréquences de phénomènes dangereux pour les pressurisations de cuves, les explosions de réservoirs, les feux de bacs et les boil-over.

4.4.2 Arbres d'événements proposés (rejets de liquides inflammables)

4.4.2.1 Rejet continu de liquide inflammable (tuyauterie, brèche capacité, …)

Pour le rejet continu de liquide inflammable, nous proposons l'arbre des événements suivant :

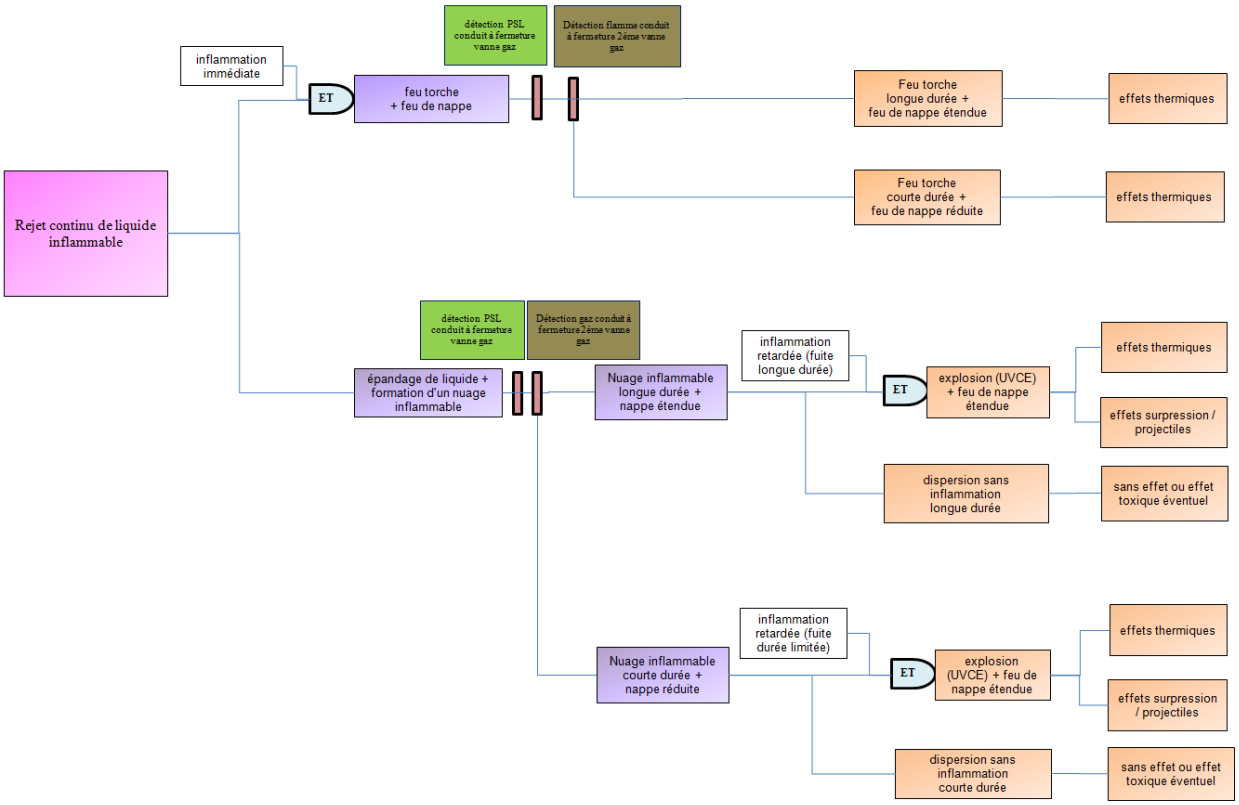


Figure 7 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet continu d'un liquide inflammable

<u>Remarque</u> : les effets du jet enflammé ne sont pas systématiquement étudiés car ils sont parfois couverts par les effets du feu de nappe.

4.4.2.2 Rejet instantané de liquide inflammable (ruine capacité…)

Pour le rejet instantané de liquide inflammable, nous proposons ainsi l'arbre des événements suivant :

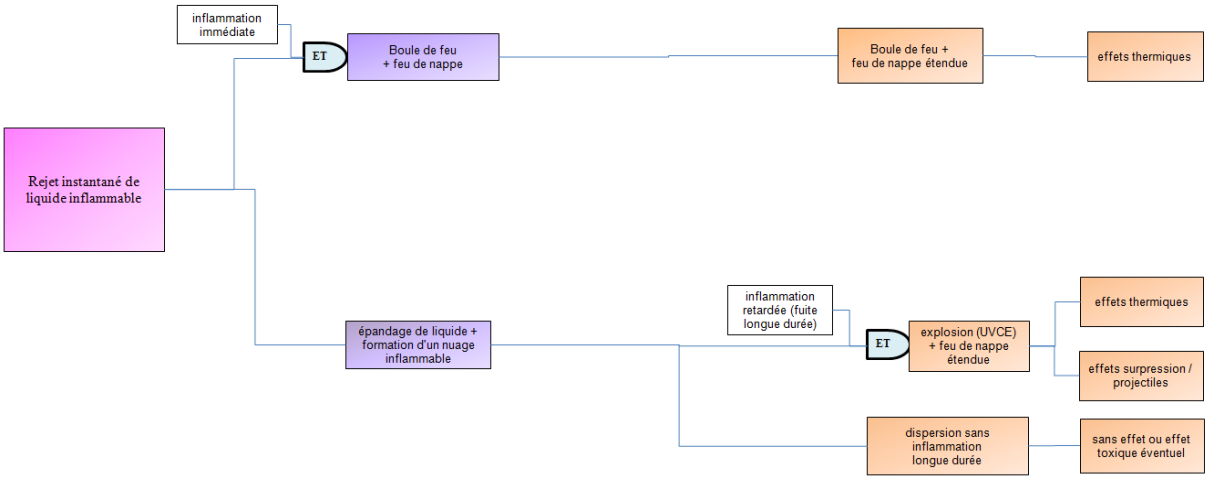


Figure 8 : Proposition d'arbre des événements résultant d'un rejet instantané d'un liquide inflammable

On peut toutefois considérer que le rejet instantané avec boule de feu est traité dans les autres phénomènes étudiés (pressurisation de bac, boil over), qui sont détaillés dans les paragraphes 4.4.5 à 4.4.7.

Les autres cas de rejet instantané (rupture zip, projectiles…) conduiront à des pertes de confinement massives avec épandage suivi éventuellement d'UVCE et de feu de nappe. Selon la température et l'énergie de la cause de perte de confinement, on pourra avoir inflammation immédiate ou non. Mais le phénomène de « boule de feu » est exclu.

4.4.3 Probabilités d'inflammation immédiate (liquides inflammables)

Le tableau présenté ci-dessous est extrapolé des informations contenues dans le guide GT DLI [5].

Tableau 6 : Probabilités d'inflammation immédiate des rejets de liquide inflammable (continus ou instantanés)

	Produits catégorie 1, 2 et 3	**Produits combustibles non inflammables**
ERC induit par une source d'énergie ou température de stockage élevée	1	10^{-1}
ERC non causé par source d'énergie (corrosion, fuite de joint…)	0	

Remarque :

- La probabilité pour les substances de catégorie 1 est assimilée à celle de la catégorie 2 et 3 (le guide GT DLI ne présente pas de valeurs pour les substances de catégorie A, assimilées aux catégories 1 du règlement CLP comme précisé précédemment) ;
- la probabilité pour les substances combustibles non inflammables est assimilée à la probabilité de la catégorie C du GT DLI ;
- la boule de feu est traitée dans les autres phénomènes (pressurisation et boil-over) ;
- l'inflammation immédiate pour des produits de catégories C peut s'expliquer par la formation d'aérosols conduisant à une inflammation même si T < PE.

4.4.4 Probabilités d'inflammation retardée (liquides inflammables)

Nous proposons 2 séries de valeurs pour la probabilité d'inflammation retardée en fonction de la durée de l'ATEX. Pour plus de détails, nous référons le lecteur à la « fiche liquide inflammables » [10].

Inflammation retardée (UVCE + feu de nappe) avec ATEX de longue durée

Nous proposons de retenir pour les probabilités d'inflammation retardée d'un rejet de liquide inflammable les valeurs présentées dans le guide GT DLI.

Tableau 7 : Probabilités d'inflammation retardée des rejets de liquide inflammable avec ATEX de longue durée

Nuage contenu dans la zone	Produits catégories 1, 2 et 3	Produits combustibles non inflammables
Absence de sources d'inflammation et absence de personnel et voies de circulation (zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)	10^{-3}	
Classée ATEX avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)	10^{-2} à 10^{-1}	10^{-3}
Classée ATEX avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)	10^{-1} à 1	10^{-2}
Nuage contenu dans une zone non classée ATEX contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)	1	10^{-1}

Remarques :

- Les données du guide GT DLI, et donc par extension le tableau 6 sont applicables « dans le cas de la démonstration de l'absence de sources d'ignition particulières sur le site et dans son environnement ».
- La probabilité pour les substances de catégorie 1 est assimilée à celle de la catégorie 2.
- Pour les deux cases donnant des plages de probabilité, la réactivité de la phase gazeuse devra être étudiée. En cas de réactivité forte (par exemple le disulfure de carbone), la probabilité retenue sera la borne supérieure de l'intervalle. En cas de réactivité moyenne ou faible, la probabilité retenue sera la borne inférieure.

Inflammation retardée (UVCE + feu de nappe) avec ATEX de courte durée

Le temps de persistance de la fuite intervient à deux niveaux :

- si le liquide n'est pas contenu dans une surface restreinte (rétention par exemple), la taille du nuage augmente avec le temps ; de ce fait la probabilité de trouver une source d'inflammation active est plus importante ; ce facteur intervient sur la définition du volume de l'ATEX ;
- à taille de nuage équivalente, la probabilité de trouver une source d'inflammation active augmente avec le temps.

Il faudrait pouvoir démontrer que le nuage ne persiste pas longtemps. Nous considérons qu'une « courte durée » correspond à un nuage de 30 secondes : Technip [2] a montré que les probabilités baissent de 30% en cas de fuite dans une unité. Cependant ce facteur intègre la taille du nuage.

Il est donc retenu de ne pas considérer le facteur « temps » comme un facteur de décote. Seule la taille du nuage est prise en compte et le tableau 7 s'applique quel que soit la durée de l'ATEX.

4.4.5 Pressurisation lente de réservoir

4.4.5.1 Phénoménologie de la pressurisation lente de réservoir

Le rapport *« Nouveaux modèles Liquides inflammables »* [14] précise que la pressurisation de bac ne peut survenir que si les conditions suivantes sont réunies :

- une cuvette en feu est présente sous le bac ou à proximité ;
- le bac est à toit fixe ;
- le débit d'évaporation du produit dans le bac est supérieur au débit de gaz susceptible d'être évacué par la soupape ou l'évent.

Si ces conditions sont réunies, la pressurisation doit être considérée, même si elle n'est pas automatique : il faut que la pression du fluide soit supérieure à la pression de rupture du bac.

Les phénomènes dangereux qui découlent de cette pressurisation dépendent des caractéristiques du produit :

- si la pression de vapeur saturante est supérieure à la LSE : pressurisation et boule de feu ;

- si la pression de vapeur saturante est inférieure à la LIE : pressurisation sans boule de feu ;
- si la pression de vapeur saturante est comprise entre la LIE et la LSE : explosion avec des effets de pression et boule de feu.

On ne retient donc pas la pressurisation de réservoir si :

- un évent correctement dimensionné équipe le réservoir ;
- si le diamètre du réservoir est supérieur 20 m ;
- si le bac est enterré ;
- si l'incendie n'est pas possible sous ou autour du réservoir (cuvette déportée).

4.4.5.2 Arbre d'événements d'une pressurisation de réservoir

Le GT DLI considère que la pressurisation de réservoir est un phénomène à développement différé, illustré par l'arbre suivant :

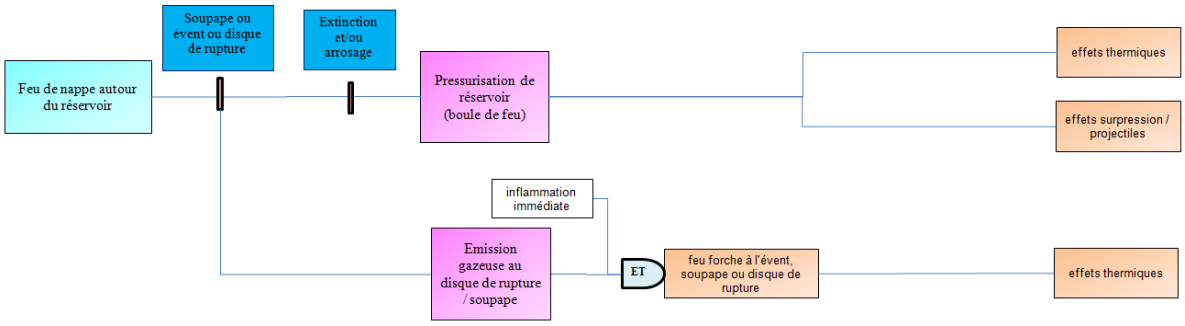


Figure 9 : Arbre d'événements expliquant le phénomène de pressurisation de réservoir

<u>Note</u> : les effets des rejets aux soupapes, disques de rupture ou évents ne sont généralement pas modélisés car ils sont couverts par les phénomènes relatifs à la cuvette (feu de nappe, dispersion toxique…).

4.4.5.3 Fréquence de la pressurisation

La fréquence de la pressurisation se déduit de la fréquence du feu de nappe (en tenant compte des éventuelles mesures de réduction du risque telles que l'extinction).

Fréquence « Pressurisation cuve » = fréquence du feu de nappe X probabilité de défaillance de l'extinction incendie et/ou probabilité de défaillance de l'arrosage de cuve (facteur 10) (si la cinétique d'extinction est compatible).

A défaut de démonstration de la cinétique compatible, la fréquence de la pressurisation sera celle du feu de nappe.

La fréquence du feu de nappe est égale à la probabilité d'inflammation (retardée ou immédiate) x Fréquence de la perte de confinement.

La probabilité d'inflammation (retardée ou immédiate) est évaluée aux paragraphes 4.4.3 et 4.4.4 en fonction de la catégorie de la substance et de l'étendue du nuage inflammable.

Pour information, la valeur de référence (issue du guide GT DLI) pour le feu de nappe en cuvette est :

Tableau 8 : Fréquence de feu de nappe en cuvette. Source : GT DLI [5]

Phénomènes dangereux	Références	Valeurs de référence
Feu de nappe en cuvette	LASTFIRE	2.10^{-5}/an

4.4.6 Explosion de réservoir

4.4.6.1 Phénoménologie de l'explosion de réservoir

Le rapport « *Nouveaux modèles Liquides inflammables* » [14] indique que pour qu'une explosion de bac ait lieu, 2 conditions doivent être réunies :

1. Le produit doit émettre des vapeurs à une concentration supérieure à la LIE.
2. Une source d'inflammation doit être présente.

Par exemple, sous certaines conditions de stockage, comme une température inférieure à 20°C, les bacs de gazole ne peuvent pas connaître d'explosion de bac. En effet, la pression de vapeur saturante est dans ce cas inférieure à la limite inférieure d'explosivité. C'est en général le cas des cuves enterrées de produits de catégorie 4 pour lesquelles la température de stockage est inférieure à 20°C.

Il est également important de noter que l'explosion ne peut avoir lieu que si une source d'inflammation est présente en même temps que l'ATEX dans le bac.

4.4.6.2 Nœud-papillon d'une explosion de réservoir

Les réflexions menées en GT interne, et basées sur le guide du GT DLI, ont mené à la proposition de nœud-papillon suivante :

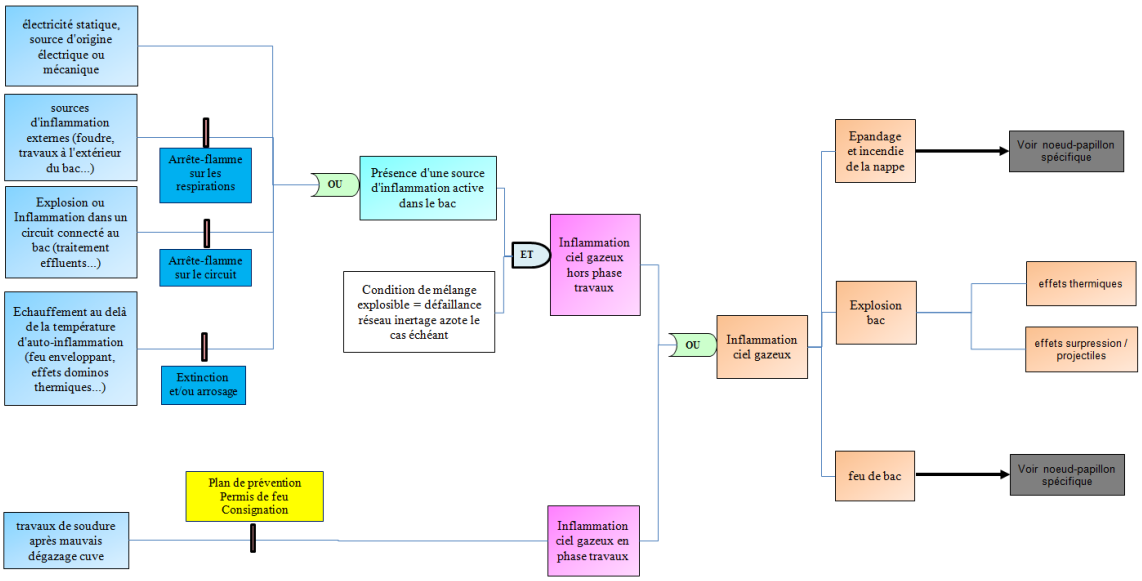


Figure 11 : Nœud-papillon de l'explosion de réservoir

4.4.6.3 Fréquences d'occurrence d'une explosion de réservoir

En se basant sur les données du GT DLI, nous proposons pour les fréquences d'explosion de réservoir le tableau suivant :

Tableau 9 : Fréquences d'explosions de réservoirs

Conditions requises	**Produits catégorie 1**	**Produits catégorie 2**	**Produits catégories 3**
Cas A : réservoirs sans inertage			
	Présence ATEX : probabilité ≈ 1	Présence ATEX : probabilité < 1 (dépend de la température ambiante)	Présence ATEX : probabilité dépend des possibilités d'échauffement (effets dominos)
Procédures encadrant les travaux par points chauds sur les réservoirs et à proximité ET matériel ATEX dans la cuve de catégorie adaptée ET prévention électricité statique y compris en phase transfert	F4 : entre $10^{-5}/an$ et $10^{-4}/an$		F5 : entre $10^{-6}/an$ et $10^{-5}/an$

Cas B : réservoirs avec inertage **Le contrôle de l'inertage est obligatoire, sinon on ne considère pas l'inertage comme une mesure efficace**		
Inertage avec contrôle de l'inertage ET ensemble des mesures énoncées ci-dessus satisfaites	F5 : entre $10^{-6}/an$ et $10^{-5}/an$ (même si les travaux par points chauds sur le réservoir ne sont pas concernés par l'inertage, on veut traduire une amélioration de la sécurité par inertage, d'où une décote d'une classe)	Non applicable (pas d'inertage sur de la catégorie 3)

<u>Remarques</u> :

- Le guide du GT DLI fournit la valeur de $4.10^{-5}/an$ pour l'explosion de réservoir. Cette valeur a été considérée comme point de départ de nos réflexions, servant à la proposition des classes présentées dans le tableau ci-dessus ;
- le cas des travaux sur la cuve non dégazée et le cas des chargements de poudres nécessitant ouverture et perte inertage (cas des mélangeurs) devront être traités avec précaution (la décote de fréquence n'est pas immédiate) ;
- si un effet domino (incendie à proximité générant effets thermiques…) conduit à une montée en température au-delà de la TIE, il peut y avoir formation d'ATEX mais ce n'est pas pour autant qu'une source d'inflammation active va conduire à l'explosion (il faudrait concomitance des deux événements). On reste de ce fait sur la même fréquence générique, indépendamment de la fréquence de l'effet domino ;
- si un effet domino conduit à dépasser la TAI, il peut y avoir inflammation et c'est la fréquence de l'effet domino qui conduit à la fréquence de l'explosion. Mais cette fréquence est à pondérer par la probabilité de défaillance de l'arrosage et de l'extinction selon la cinétique du phénomène (en combien de temps on atteint la TAI). Les valeurs du tableau donnent des fréquences minimales à considérer ;
- pour les bacs avec toit flottant, la probabilité de VCE est réduite, mais le phénomène n'est pas exclu (le toit peut être bloqué, hauteur minimale correspondant au toit reposant sur ses béquilles). Dans ce cas, la fréquence d'explosion pour les catégories 2 sans inertage peut être réduite de F4 à F5.

4.4.7 Fréquences d'occurrence du feu de bac et du Boil-Over

4.4.7.1 Conditions sous lesquelles le boil-over est possible

Le rapport *« Nouveaux modèles Liquides inflammables »* [14] précise que « Le déclenchement d'un phénomène de Boil-Over (BO) nécessite au préalable un feu de bac et la présence d'eau au fond de celui-ci. Ainsi, pour tous les produits miscibles dans l'eau ou plus lourds que l'eau, un tel phénomène est impossible. De même, le contact doit être possible entre l'onde de chaleur généré par l'incendie dans le produit et la surface de l'eau. Ainsi, la présence d'un obstacle au fond du bac, toit flottant par exemple en cas de noyage de celui-ci, peut enrayer le déclenchement du phénomène ».

Ce rapport précise d'autre part que les critères nécessaires à l'obtention d'un boil-over couche mince (BOCM) ne sont pas établis, et que le BOCM à grande échelle n'est pas avéré.

<u>Pour le BOCM :</u>

- les substances concernées sont : kérosène, FOD, gazole ;
- la substance doit être plus légère que l'eau et surtout non miscible ;
- il existe une influence du fond de bac mais elle n'est pas prise en compte actuellement (un fond concave ou convexe réduirait la probabilité de BOCM).

<u>Pour le BO classique :</u>

- les substances concernées sont : fiouls lourds, bruts lourds et légers ;
- la forme du bac est importante : un bac de type cylindre horizontal rend le boil-over impossible.

Le guide GT DLI précise les substances concernées par le boil-over :

Famille de produits	BOCM	Boil-over classique
Essences	non	non
Naphta	¤¤	¤¤
Carburéacteurs	oui	non
Gazoles et FODs	oui	non
Fuels lourds	non	oui
Bruts	non	oui
Alcools	non *	non *
MTBE/ETBE	¤¤	non (car produit pur)

<u>Remarques :</u>

- ce tableau est établi à dire d'experts sur la base du retour d'expériences et d'essais dans les conditions de stockage des dépôts
- Les produits miscibles à 100 % ne font pas de boil-over classique ou en couche mince
- Les produits purs ne génèrent pas de Boil-over classiques

(*) L'alcool remplit les deux conditions ci-dessus
(¤¤) Produit n'ayant pas fait l'objet de test

Figure 12 : Liste des produits concernés par les boil-overs classiques et les boil-overs couches minces (BOCM) – source GT DLI [5]

4.4.7.2 Nœud-papillon du boil-over

Nous proposons comme nœud-papillon explicatif du phénomène de boil-over :

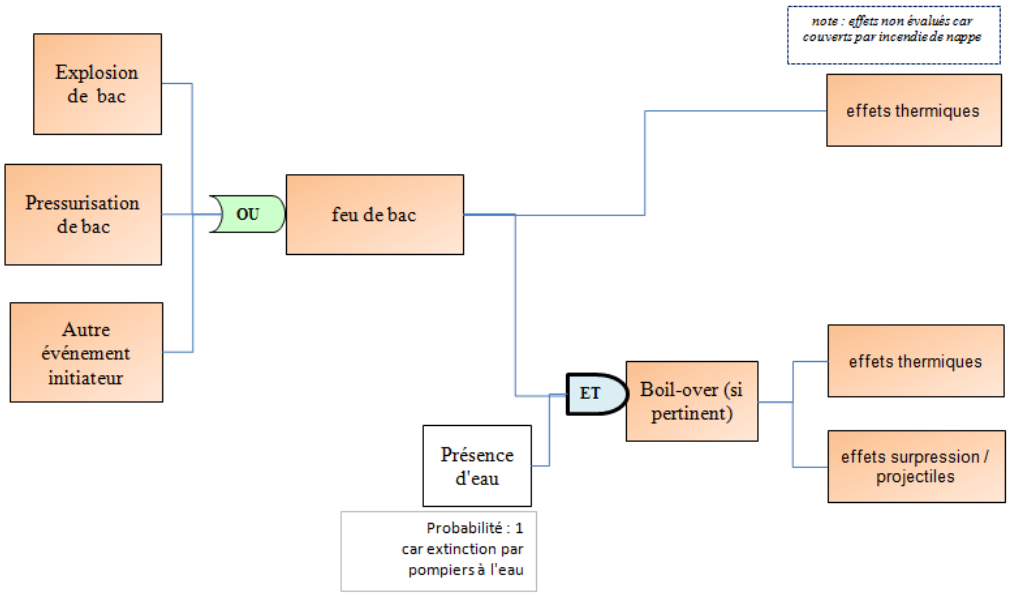


Figure 15 : Nœud-papillon du boil-over

4.4.7.3 Fréquences d'occurrence du feu de bac et du boil-over

Avec ces hypothèses, et si on sait évaluer la cinétique et confirmer que le temps de réponse de l'extinction est compatible :

Fréquence du boil-over = fréquence du feu de bac X probabilité de défaillance de l'extinction incendie (si cinétique compatible).

A défaut de démonstration de la cinétique compatible, la fréquence du boil-over sera celle du feu de bac.

La fréquence du feu de bac est à estimer à partir des fréquences des événements initiateurs (explosion, pressurisation, etc.).

Comme la fréquence de l'inflammation du liquide est difficile à évaluer, une autre approche plus directe consiste à utiliser la valeur fournie par le GT DLI :

Tableau 10 : Fréquences de feux de bac et boil-over. Source [5]

Phénomènes dangereux	Références	Valeurs de référence
Feux de bac (toit flottant)	LASTFIRE	$1,3.10^{-4}$/an
Feux de bac (toit fixe)	LASTFIRE	8.10^{-5}/an
Boil-Over (bruts)	TOTAL	9.10^{-6}/an

4.5 POUSSIERES OU POUDRES OXYDABLES

L'exploitation de procédés dans lesquels un ou plusieurs pulvérulents combustibles sont mis en œuvre en présence d'air expose a priori au risque d'occurrence des phénomènes dangereux suivants, qui peuvent donner lieu à des accidents graves, aussi bien en termes de dégâts humains que matériels :

- l'explosion d'un pulvérulent dispersé dans l'air,
- l'incendie d'un pulvérulent en masse,
- l'auto-échauffement d'un pulvérulent en masse.
- l'explosion d'un gaz résultant de la pyrolyse d'un dépôt de produits pulvérulents.

4.5.1 Explosion d'un pulvérulent dispersé dans l'air

4.5.1.1 Introduction

Pour une installation donnée, deux cas d'explosion peuvent être étudiés :

- une explosion dans un volume ou un équipement, explosion dite « primaire »,
- ou une explosion dans un volume faisant suite à une propagation. On parle d'explosion secondaire lorsque l'explosion primaire qui se propage rencontre un nuage ou un dépôt de poussières, et enflamme ceux-ci, créant ainsi une nouvelle explosion (dite « secondaire »).

L'explosion[8] se produit en cas de mise en suspension de poussières inflammables (de granulométrie suffisamment fine) et de présence d'une source d'inflammation, comme illustré sur le noeud-papillon suivant :

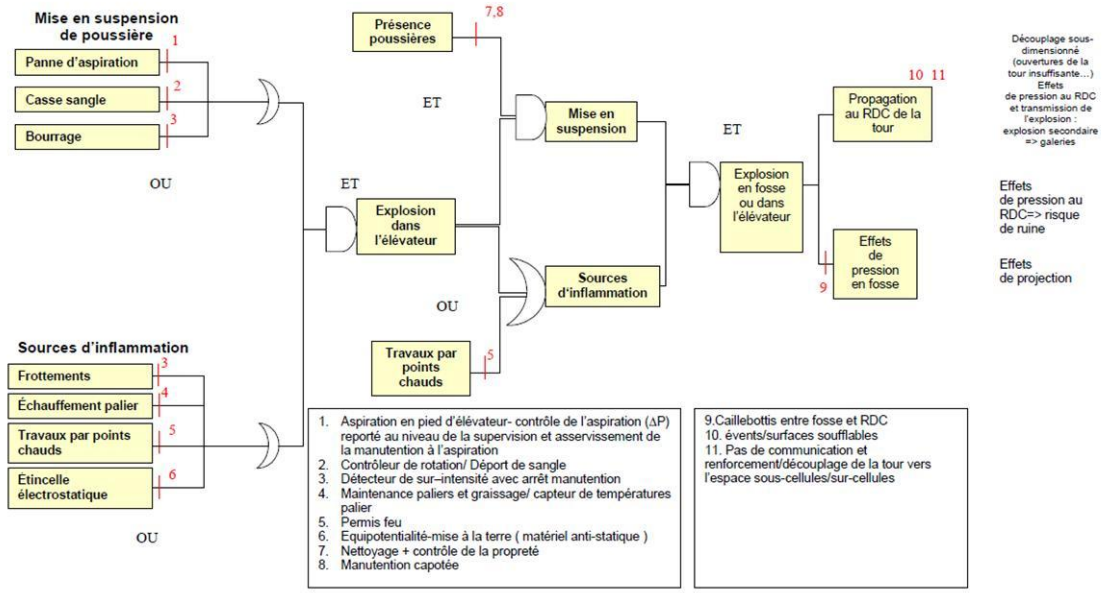


Figure 16 : Représentation du scénario d'explosion d'une tour de manutention d'un silo vertical selon le modèle du nœud papillon (extrait du guide silo)

---

[8] *Tous secteurs d'activité confondus, un total de 190 explosions de poussières a été répertorié dans la base ARIA, de 1903 à janvier 2010. Leur analyse montre que les activités les plus touchées par les explosions de poussières sont de loin les industries du bois et de l'agroalimentaire, qui comptabilisent à elles seules près des trois quarts des explosions recensées. Les autres secteurs concernés par ce phénomène sont le secteur des céréales, de la chimie et la pharmacie et le secteur des métaux.*

Pour enflammer une ATEX de poussières combustibles, il faut qu'une quantité suffisante d'énergie lui soit apportée localement par une source d'inflammation.

L'énergie minimale d'inflammation (EMI) dépend de la nature du combustible et aussi de la composition de l'ATEX et elle est minimale pour une composition voisine de la composition stœchiométrique.

L'annexe 1 présente les caractéristiques de poussières combustibles et les sources d'inflammation usuelles.

4.5.1.2 Fréquence d'inflammation

Il n'existe pas de base de données relative aux fréquences d'inflammation des poussières combustibles. Pour mémoire, il est excessivement difficile d'obtenir une probabilité d'inflammation des poussières en agrégeant les fréquences d'occurrence de toutes les causes d'inflammation et les probabilités de défaillance des barrières de sécurité associées (on a notamment des difficultés à traiter correctement les problématiques liées à l'interdiction de fumer, aux permis de travaux par point chaud …).

De ce fait, il est possible de se référer au retour d'expérience indiqué dans le guide silos (version 2008) pour déterminer d'une manière globale la probabilité d'occurrence d'une inflammation d'une ATEX (explosion de poussière) dans ce type d'installation. Le guide silos indique que la fréquence d'une explosion primaire en cellule varie de C à E, avec une valeur usuelle de D dans l'état actuel des silos et en tenant compte de la mise en place de mesures compensatoires correspondant à l'état de l'art (nettoyage des locaux, aspiration des poussières au niveau des équipements, etc) .

D'autre part, le guide silo propose, conformément à la fiche n°7 de la circulaire du 10 mai 2010, de retenir pour l'apparition du point chaud lors d'une intervention une fréquence A et de considérer le permis de feu comme une mesure de maîtrise des risques avec un NC de **0,1 ou 2** si deuxième contrôle par une tierce personne.

Plusieurs points importants sont à prendre en compte pour la cotation de la probabilité d'une explosion primaire ou secondaire d'une ATEX de poussières combustibles :

- la fréquence d'explosion de poussières dépend en pratique de la fréquence de mise en suspension. Les probabilités d'explosion au sein d'équipements dans lesquels les poussières sont mises en suspension en fonctionnement normal seront plus importantes que celles d'explosion dans des équipements avec mise en suspension occasionnelle ou accidentelle. De même, les équipements disposant de système de dépoussiérage en continu seront moins sujets à une explosion que ceux dépourvus de ce dispositif de sécurité.
- une majorité des explosions de poussières dans le domaine de l'agroalimentaire se seraient produites dans des élévateurs. En Allemagne, comme aux Etats-Unis, les élévateurs sont les équipements les plus impliqués (27 %). Les "silos" (capacités de stockage) représenteraient 21 % des cas, les broyeurs 19 % et les séchoirs 10%. Pour cette raison, la probabilité d'explosion dans un volume contenant un élévateur à godets serait plus importante que celle contenant des transporteurs à bande ou des redler. Aussi, la probabilité l'explosion d'un silo alimenté directement par un redler serait plus importante que celle d'un silo alimenté par un autre type de convoyeur,

- un espace bâtimentaire qui abrite des équipements non capotés serait sujet à plus de dépôt de poussières qu'un bâtiment qui renferme des équipements capotés et étanches,
- la mise en œuvre d'une procédure de nettoyage régulière des espaces bâtimentaires permet de décoter la probabilité de la propagation d'une explosion primaire.

4.5.2 Incendie d'un pulvérulent en masse

4.5.2.1 Définition

L'incendie d'une substance solide est le phénomène par lequel les gaz qui sont issus de la pyrolyse de cette substance subissent une combustion en présence de l'oxygène de l'air.

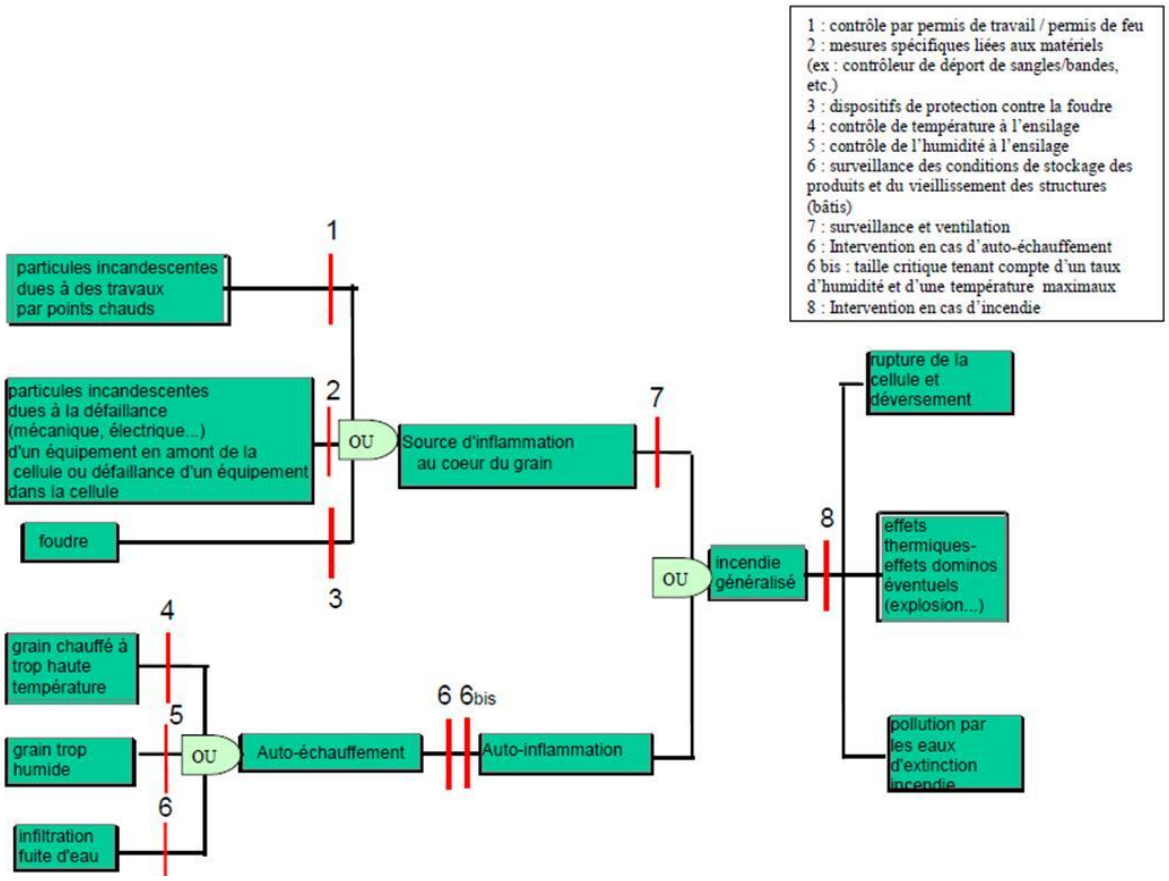


Figure 17 : Représentation du scenario d'auto-inflammation du produit en cellule selon le modèle du nœud papillon (extrait du guide silo)

4.5.2.2 Fréquence d'inflammation

Un incendie dans un silo, un convoyeur ou tout autre équipement de concassage, broyage ou tamisage est traité en analyse de risques mais le phénomène n'est jamais retenu car le feu est couvant (pour les céréales ou le sucre). Ce type de feu ne donne pas lieu à des flammes, de ce fait, les effets thermiques ne sont pas importants et à moins que les équipements soient en bordure du site, leurs effets ne dépassent pas les limites de propriété.

Il est à noter que l'accidentologie révèle de nombreux incendies imputables à un départ de feu dans les bandes transporteuses. Cependant l'arrêté du 18 février 2010[9] impose la mise en place de bandes non propagatrices de flamme ce qui limite les effets d'un incendie. Idem pour les élévateurs où les sangles sont remplacées de plus en plus par des sangles conçues en matières difficilement inflammables.

Pour les autres équipements cités préalablement (concasseur, broyeur, tamiseur, etc), leur taille n'est pas très importante, de plus, ils sont souvent dans des locaux fermés, on retient donc rarement les scenarios d'incendie dans l'EDD même si c'est traité en APR.

Il est important de noter que les guides existants ne donnent pas de probabilités d'inflammation pour les poussières combustibles.

4.5.3 Auto-échauffement d'un pulvérulent en masse

Lorsqu'une substance pulvérulente combustible est contenue en masse dans un récipient sous air, ou présente à l'état de dépôt sur une surface, son auto-échauffement est le phénomène par lequel cette substance subit une oxydation qui, d'abord lente, s'accélère progressivement en l'échauffant.

Une masse ou un dépôt de substance pulvérulente combustible est un milieu à l'intérieur duquel l'air pénètre et où le contact entre les molécules d'oxygène et les grains de substance est d'autant meilleur que la surface spécifique de ces grains est grande. C'est parce qu'un tel milieu a une faible conductivité thermique que la chaleur produite par la combustion entraîne un échauffement progressif du dépôt (auto-échauffement) et une accélération du phénomène d'oxydation.

De combustion lente et sans flamme au départ, le phénomène peut s'emballer et évoluer vers une combustion vive du dépôt, s'accompagnant d'une flamme ou au moins d'incandescences, qui peuvent alors constituer la source d'inflammation d'une ATEX poussiéreuse, si une telle ATEX se forme à proximité du dépôt en cours de combustion.

Selon l'oxydabilité de la substance, le phénomène d'emballement peut démarrer dès la température ambiante ou seulement à partir d'une température supérieure à l'ambiante.

---

9 *Arrêté du 18/02/10 relatif à la prévention des risques accidentels présentés par certaines installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation sous la rubrique n° 2260.*

Comme l'incendie, le phénomène d'auto-échauffement est très proche de celui de l'explosion puisqu'il résulte de la libération d'une énergie de combustion et qu'il peut être à l'origine d'une explosion. De même, l'auto-échauffement produit des gaz de pyrolyse et de combustion, en particulier, dans des conditions de sous-oxygénation, du CO, particulièrement toxique.

4.5.4 Inflammation de gaz de pyrolyse d'un dépôt de produits pulvérulents

Lorsqu'un produit pulvérulent en dépôt se trouve exposé à une élévation de température soit du fait d'un auto-échauffement soit parce qu'il se trouve sur une surface chaude, celui-ci peut produire des gaz de pyrolyse dont l'accumulation peut conduire à la formation d'une ATEX gazeuse. L'échauffement à l'origine de la pyrolyse ou une autre source d'énergie ponctuelle (étincelle, point chaud) peut alors enflammer cette ATEX et conduire à une explosion ou un incendie.

Ce scénario est rarement traité en EDD car les exploitants disposent de nombreux moyens pour rendre la probabilité d'occurrence de ce phénomène la plus basse possible par le biais notamment d'une mesure du taux d'humidité à la réception des produits et par une mesure en continu de la température des produits dans les silos. D'autre part, si un échauffement se produit dans un silo, l'exploitant à la possibilité de vidanger le silo ou de l'inerter.

La probabilité d'occurrence d'une telle explosion étant plus faible que celle d'une explosion de poussières classique, on se limite dans les EDD à cette dernière.

5. CONCLUSION

Le présent rapport propose une approche d'évaluation semi-quantitative des probabilités d'inflammation ou des fréquences d'occurrence des phénomènes dangereux de type explosion en fonction du type de produit :

- les gaz inflammables (liquéfiés ou comprimés) ;
- les gaz inflammables liquéfiés cryogéniques ;
- les liquides inflammables ;
- les poussières inflammables.

Cette approche s'appuie sur les différents documents et bases de données qui ont été identifiées dans le rapport de 2012. Pour chaque type de produit, des discussions se sont tenues en groupe de travail interne pour choisir le nœud-papillon représentatif de la phénoménologie du produit, et pour choisir les valeurs de probabilités d'inflammation (ou, le cas échéant, fréquences de phénomènes dangereux) à appliquer directement sur ces nœuds-papillons.

L'approche est dite semi-quantitative car les choix de probabilités d'inflammation sont des sous-puissances de 10 (par analogie avec les classes de fréquences).

Ce rapport est une première version qui sera confortée et validée grâce à des échanges en interne et éventuellement avec des partenaires étrangers. Des doutes persistent en effet sur certains produits hautement réactifs (hydrogène par exemple) ou encore sur les liquides cryogéniques. Certaines valeurs sont à conforter (choix des classes de réactivité des gaz, des catégories de liquides inflammables, valeurs de probabilité pour les liquides inflammables). Enfin, ce rapport pourra être complété à terme avec des valeurs pour les solides non divisés.

6. REFERENCES

[1] FLAUW Y. (2012) - DRA-11-117406-03282A « Revue des valeurs génériques pour les probabilités d'inflammation présentes dans la littérature », INERIS.

[2] Olivier IDDIR – 2010 – Editions T.I. :

Evaluation des probabilités d'inflammation dans les analyses de risque.

[3] RIVM – 2009 – version 3.2 :

Reference Manual BEVI Risk Assessments.

[4] HSMO – 1978 – Health and Safety Executive :

Canvey : an investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock area.

[5] Guide Dépôts de Liquides Inflammables – Version Octobre 2008 :

Guide de maîtrise des risques technologiques dans les dépôts de liquides inflammables.

[6] OGP – 2010 – report No. 434 – 6.1 :

Ignition Probabilities

[7] Guide de l'état de l'art sur les silos pour l'application de l'arrêté ministériel relatif aux risques présentés par les silos et les installations de stockage des céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables – MEDDE – 2008 – version 3

[8] GESIP, Rapport n°2008/01, Guide Méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz combustibles et produits chimiques), révision 2012, édition du 12 décembre 2012, reconnu par la décision BSEI n°2012-50 du 17 décembre 2012 publiée au Bulletin Officiel MEDDE/METL du 25/02/2013

[9] JANES A. – DRA-09-103185-10120A, « fiche des gaz inflammables », INERIS, 13 août 2009.

[10] JANES A. – DRA-09-103185-12091D, « fiche des liquides inflammables », INERIS, 22 décembre 2009.

[11] ARAMIS D1C – Appendix 12, July 2004. Probabilistic aspects in the event tree.

[12] Règlement n°1272/2008 du 16 décembre 2008, dit règlement CLP

[13] Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass, CCPS, Juin 2014

[14] JOLLY S. – DRA-14-141606-11902A, « Nouveaux modèles Liquides inflammables », INERIS, 28 novembre 2014

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	***Désignation précise***	***N°pages***
1	*Sources d'inflammation et sensibilité de la substance inflammable*	*12*
2	*Comparaison et justification des valeurs de probabilités d'inflammation proposées*	*8*

Annexe 1 :
Sources d'inflammation et sensibilité de la substance inflammable

Cette annexe détaille les paramètres importants pour juger du caractère inflammable d'une substance. Après avoir présenté les différents types de sources d'inflammation existantes, la sensibilité des gaz et liquides inflammables d'une part, et des combustibles pulvérulents d'autre part, sera étudiée.

1. DIFFERENTES SOURCES D'INFLAMMATION

La norme NF EN 1127 « Atmosphères explosives - Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion » identifie 13 sources d'inflammation.

	Sources possibles (selon norme NF EN 1127)	Vraisemblance (selon norme NF EN 1127)	Mesures de prévention courantes (selon norme ou article Technip à vérifier)
1	Surfaces chaudes	probable	Limitation de la température de surface des équipements (calorifugeage des canalisations, etc)
2	Flammes et gaz chauds (incluant les particules chaudes)	probable	Rejet en hauteur (torchère) Interdiction des travaux à flamme nue sans permis de feu préalable
3	Etincelle d'origine mécanique	probable	Maintenance préventive des machines tournantes (lubrification, etc…)
4	Matériel électrique	probable	Mode de protection en adéquation avec le type de zone ATEX dans laquelle le matériel est installé
5	Courants électriques vagabonds, protection contre la corrosion cathodique	Peu vraisemblable	/
6	Electricité statique	probable	Liaison équipotentielle Mise à la terre Limitation des vitesses de circulation des fluides dans les canalisations Equipements (chaussures et tenues « antistatiques »).
7	Foudre	probable	Paratonnerre, fils tendus
8	Ondes électromagnétiques - radiofréquences de 10^4 Hz à 3.10^{12} Hz	Peu vraisemblable	/
9	Ondes électromagnétiques de 3.10^{11} Hz à 3.10^{15} Hz	Peu vraisemblable	/
10	Rayonnement ionisant	Peu vraisemblable	/
11	Ultrasons	Peu vraisemblable	/
12	Compression adiabatique et ondes de chocs	Peu vraisemblable	/
13	Réactions exothermiques comprenant l'auto-inflammation des poussières	probable	Sécurité sur température haute (dispositif quench, etc.).

Parmi ces sources, les plus probables sur un site classé sont les surfaces chaudes, les flammes et gaz chauds (incluant les particules chaudes), les étincelles d'origine mécanique, le matériel électrique, l'électricité statique, la foudre, les réactions exothermiques comprenant l'auto-inflammation des poussières.

2. SENSIBILITE D'UN NUAGE INFLAMMABLE A LA SOURCE D'INFLAMMATION – CAS DES GAZ ET LIQUIDES INFLAMMABLES

La sensibilité d'un gaz inflammable à une source d'inflammation est déterminée par sa **réactivité**. Cette caractéristique est liée à l'**énergie minimale d'inflammation** de la substance et/ou à la **vitesse de combustion laminaire**. Ces deux paramètres ne sont pas facilement accessibles, ce qui pose le problème du classement effectif de la réactivité d'une substance donné

La norme NF EN 60079-20-1 présente un tableau de classement des gaz et vapeurs inflammables selon leur deux paramètres : **courants minimaux d'inflammation** (CMI) et selon les **interstices expérimentaux maximaux de sécurité** (IEMS). La norme identifie un nombre important de substances.

2.1 REACTIVITE EN FONCTION DE L'ENERGIE MINIMALE D'INFLAMMATION

Le tableau ci-dessous (issu d'un article de Technip dans les Techniques de l'Ingénieur) fait un parallèle entre EMI et nature de la source. Un parallèle avec les classes EMI de la réglementation ATEX (cf. 2.1) a été ajouté.

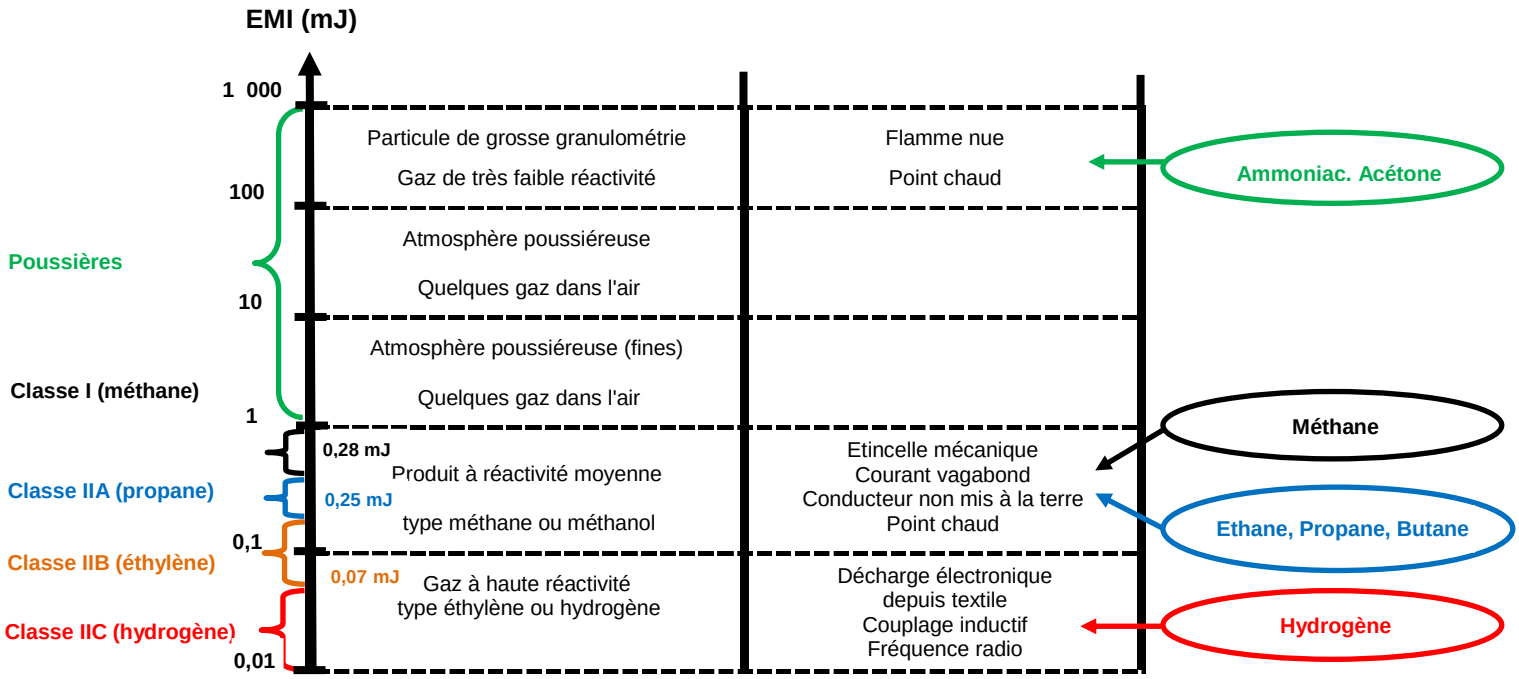


Illustration des plages d'EMI (d'après courtesy of L.G. Bitton)

Il en ressort que les gaz et liquides inflammables sont sensibles à la majorité des sources d'inflammation usuelles. Des mesures de prévention doivent être mises en œuvre pour réduire la probabilité d'occurrence des inflammations.

Remarque : L'énergie d'inflammation dépend aussi de la ***nature du rejet*** *: ainsi, pour une même substance, un jet turbulent nécessite une source d'inflammation plus importante (en intensité et en surface) qu'un nuage diffus de gaz inflammable.*

2.2 CLASSEMENT DES SUBSTANCES SELON LEUR REACTIVITE

2.2.1 Classement selon la norme NF EN 60079-20-1

La norme NF EN 60079-20-1 présente un tableau de classement des gaz et vapeurs inflammables selon leur deux paramètres : courants minimaux d'inflammation (CMI) et selon les interstices expérimentaux maximaux de sécurité (IEMS). La réglementation ATEX associe à chaque groupe des énergies minimales d'inflammation seuils.

Les gaz et vapeurs sont classés en 4 groupes permettant de spécifier le matériel adapté en vue de la prévention des explosions des nuages inflammables. Ces classes sont les suivantes :

Groupe de gaz	Substance définissant la limite inférieure de classe	EMI (mJ)	IEMS (mm)
Classe I	Méthane	0,28 mJ ≤ EMI	1,14
Classe IIA	Propane	0,25 mJ ≤ EMI < 0,28 mJ	0,9
Classe IIB	Ethylène	0,07 ≤ EMI < 0,25 mJ	0,5 à 0,9
Classe IIC	Hydrogène	0,011 mJ < EMI < 0,07 mJ	< 0,5

Un autre paramètre est la température minimale d'inflammation qui se traduit aussi par une classe de température : T1 (450°C), T2 (300°C), T3 (200°C), T4 (135°C), T5 (100°C), T6 (85°C).

Il est à noter que :

- le classement selon cette norme n'est pas directement corrélé au classement de réactivité, les paramètres de classement étant différents.
- la majorité des gaz et vapeurs sont classés IIA et IIB ; on pourra donc considérer que les catégories A et B des liquides inflammables peuvent être associées, pour les probabilités conditionnelles d'inflammation, à la classe des gaz moyennement et hautement réactifs.

2.2.2 Caractéristiques issues d'autres sources

2.2.2.1 Energies minimales d'inflammation

Le rapport INERIS « Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – juillet 1999 – Y. Mouilleau et JF Lechaudel » présente les énergies minimales d'inflammation de quelques substances, reprises dans le tableau de synthèse présenté ci-après.

2.2.2.2 Vitesse de combustion laminaire

Le rapport INERIS « Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – juillet 1999 – Y. Mouilleau et JF Lechaudel » donne les vitesses de flamme laminaires Su pour différents gaz. Les vitesses maximales de combustion laminaire (ou vitesse de fondamentale de combustion) de quelques combustibles gazeux courants sont reportées dans le tableau suivant, tiré principalement de (Harris, 1983). Les vitesses de combustion sont maximales pour une concentration en combustible dans le mélange proche de la stœchiométrie :

Gaz combustible mélangé à de l'air en proportion généralement un peu supérieure à la stœchiométrie. (-)	Vitesse maximum de combustion laminaire *Su* (m/s)
Hydrogène	3,5
Méthane	0,45
Ethane	0,53
Propane	0,52
Butane	0,5
Pentane	0,52
Hexane	0,52
Heptane	0,52
Acétylène	1,58
Ethylène	0,83
Propylène	0,66
Butylène	0,57
Benzène	0,62
Cyclohexane	0,52
Ammoniac[6]	0,07

De nombreuses autres substances sont identifiées dans la norme NFPA 68.

2.2.2.3 Réactivité

Le BEVI classe les substances selon leur réactivité (basse, moyenne, haute) en précisant que la réactivité dépend de la vitesse de flamme. Il est précisé qu'à défaut de démonstration, le gaz sera considéré comme moyennement ou hautement réactif ; une probabilité d'inflammation immédiate plus élevée sera alors associée.

Les gaz suivants sont identifiés en faiblement réactifs dans le BEVI : ammoniac, bromométhane (ou bromure de méthyle), monoxyde de carbone, chloroéthane (ou chlorure d'éthyle ou monochloroéthane), chlorométhane (ou chlorure de méthyle), méthane CH_4.

La version antérieure du BEVI (Purple Book) identifiait d'autres substances comme peu réactives. Il s'agissait du 1-chloro, 2-3 epoxy-propane, 1-3 dichloropropène, 3-chloro, 1-propène, plomb tétraéthyle. Les substances identifiées dans le Purple Book sont les suivantes :

Tableau 5 – Réactivité des produits suivant la classification du CPR 14 E [6]

Faible réactivité	Réactivité moyenne	Haute réactivité
1-chloro-2,3-epoxy-propane	1-butène	1-butanéthiol*
1,3-dichloropropène	1,2-diaminoéthane	acétylène
3-chloro-1-propène	1,3-butadiène	benzène*
ammoniac	acétaldéhyde	carbone disulfure*
bromométhane	acétonitrile	éthanéthiol*
monoxyde de carbone	acrylonitryle	oxyde d'éthylène
chloroéthane	butane	formate d'éthyle*
chlorométhane	chloroéthène	formaldéhyde*
méthane	diméthylamine	sulfure d'hydrogène*
plomb tétraéthyle	éthane	acrylate de méthyle*
	éthylène	formate de méthyle*
	éthylétahnamine	oxyde de propylène*
	acide formique	naphta (solvant)*
	propane	tétrahydrothiophène*
	propène	acétate de vinyle

* Produits classés par défaut dans le CPR 14 E en haute réactivité du fait du manque d'information permettant de caractériser leurs réactivités.

2.2.3 Synthèse

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques (dans l'air) des substances issues des différentes sources présentées précédemment.

Pour plus d'informations (autres substances, autres caractéristiques), le lecteur pourra consulter les sources mentionnées dans cette annexe et redétaillées dans la légende ci-dessous.

Légende des couleurs utilisées dans les tableaux de synthèse :

- en rouge : source « Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre – juillet 1999 – Y. Mouilleau et JF Lechaudel »
- en vert : norme NFPA
- en bleu : selon norme NF EN 60079-20
- les réactivités de gaz indiqués correspondent au classement selon le BEVI et/ou selon le PURPLE BOOK (valeurs entre parenthèses ; les classements par défaut en haute réactivité sont précisés par [haute])

- en orange, selon site GESTIS : http://dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index-2.jsp

Autres sources d'informations sur les substances :

CarATEX de l'INRS : http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/caratex.html

Substance	CAS	Point éclair (°C) [temp. ebullition]	EMI (mJ)	Temp. inflammation (°C)	Vitesse maxi de combustion laminaire (m/s)	Maxi exprimental Safe Gap MESG (mm)	Groupe équipement et classe de température	Classement réactivité BEVI (Purple)	Catégorie liquide CLP
bromométhane	74-83-9	Gaz, flashpoint = 194°C		535			IIA – T1	faible	
1,3-dichloropropène	542-75-6	*27°C [108°C]*		*> 500°C (web)*			IIA	(faible)	3
Méthane (grisou)	74-82-8	gaz	0,30	505	0,45 / 0,40	1,14	/ – T1	faible	F+/R12 H220
méthane	74-82-8	gaz	0,30	600	0,45 / 0,40	1,14	IIA – T1	faible	F+/R12 H220
ammoniac	7664-41-7	gaz	14	630	0,07	3,18	IIA – T1	faible	R10 H221
Chloroéthane (=chlorure d'éthyle)	75-00-3	-50°C [12,3°C]	?	510			IIA – T1	faible	F+/R12 gaz
Chlorométhane (= chlorure de méthyle)	74-87-3	gaz		625			IIA – T1	faible	gaz
3-chloro-1-propène	107-05-1,	-32°C [45°C]		390			IIA – T2	(faible)	2
Acétonitrile (=cyanure de méthyle)	75-05-8	13°C [82°C]		523		1,5	IIA – T1	(moyenne)	2
éthane	74-84-0	gaz	0,25	515	0,53 / 0,47	0,91	IIA - T1	(moyenne)	gaz
Propylène (=propène)	115-07-1	gaz		455	0,66		IIA – T1	(moyenne)	gaz
butane	106-97-8	gaz	0,25	372	0,50 / 0,45	0,98	IIA – T2	(moyenne)	gaz
propane	74-98-6	Gaz (-22°C)	0,25	450	0,52 / 0,46	0,92	IIA – T2	(moyenne)	gaz
Acide formique (=acide méthanoïque)	64-18-6	42°C		525			IIA – T2	(moyenne)	3
éthyléthanamine	109-89-7	-23°C [56°C]		312			IIA – T2	(moyenne)	2
diméthylamine	204-697-4	*-18°C [7°C] Web*						(moyenne)	1
1-butene (=butylene-n	106-98-9	gaz		345	0,57 / 0,51	0,94	IIA – T2	(moyenne)	gaz
Méthanol (=alccol méthylique)	67-56-1	9°C		440	0,56	0,92	IIA – T2		2
Benzène et iso	71-43-2	-11°C [80°C]		498	0,62 / 0,39 à 0,48	0,99	IIA – T1	[haute]	2
acétone (=propanone)	67-64-1	-18°C [56°C]	1,15	399	0,54	1,04	IIA – T2		2
formate d'éthyle (=acide formique)	109-94-4	-20°C [54°C]		440		0,94	IIA – T2	[haute]	2
hexane	110-54-3	-22°C [69°C]	0,288	225	0,52 / 0,46	0,93	IIA – T3		2
heptane	142-82-	-7°C	0,24	204	0,52 / 0,46	0,91	IIA – T3		2

Substance	CAS	Point éclair (°C) [temp. ebullition]	EMI (mJ)	Temp. inflammation (°C)	Vitesse maxi de combustion laminaire (m/s)	Maxi exprimental Safe Gap MESG (mm)	Groupe équipement et classe de température	Classement réactivité BEVI (Purple)	Catégorie liquide CLP
	5	[98°C]							
cyclohexane	110-82-7	-17°C [81°C]		244	0,52 / 0,48	0,94	IIA – T3		2
pentane	109-66-0	-40°C [36°C]		243	0,52 / 0,46	0,93	IIA – T3		2 (limite 1)
Chloroéthène (=chlorure de vynile)	200-831-0	*-78°C [13°C] Web*		415		0,96	IIA – T2	(moyenne)	1
Acétaldéhyde (=éthanal)	75-07-0	-38°C [20°C]		155		0,92	IIA – T4	(moyenne)	1
Tétrahydrothiophène (=thiolane = thiophane)	110-01-0	12°C [119°C]		200°C	0,99		IIA – T4	[haute]	2

Substance	*CAS*	*Point éclair (°C) [temp. ebullition]*	*EMI (mJ)*	*Temp. inflammation (°C)*	*Vitesse maxi de combustion laminaire (m/s)*	*Maxi exprimental Safe Gap MESG (mm)*	*Groupe équipement et classe de température*	*Classement réactivité BEVI (Purple)*	*Catégorie liquide*
oxyde de carbone	*630-08-0*	*gaz*	*/*	*607*	*0,46*	*0,94*	*IIB – T1*	*faible*	*F+/R12 H220*
Acrylonitrile (=cyanure de vinyle = 2-propenenitrile	*107-13-1*	*-5°C [77°C]*		*620*		*0,87*	*IIB – T1*	*(moyenne)*	*2*
Acide cyanhydrique	*74-90-8*	*-20°C [26°C]*		*535*		*0,88*	*IIB – T1*		*1*
Acrylate de méthyle	*96-33-3*	*-3°C [80°C]*		*455*		*0,85*	*IIB – T2*	*[haute]*	*2*
Acétate de vinyle	*108-05-4.*	*-7°C [72°C]*		*385*		*0,93*	*IIA – T2*		*2*
Propyne	*74-99-7*	*gaz*	*0,11*		*0,82*	*0,74*	*IIB – T2*		*gaz*
1-chloro-2-3-epoxy-propane (=oxirane)	*106-89-8*	*28°C*		*385*		*0,74*	*IIB – T2*	*(faible)*	*3*
1-3-butadiene	*106-99-0*	*gaz*	*0,13*	*420*		*0,79*	*IIB – T2*	*(moyenne)*	*gaz*
Ethylène (=ethene)	*74-85-1*	*gaz*	*0,07*	*440*	*0,83 / 0,80*	*0,65*	*IIB – T2*	*(moyenne)*	*F+/R12 H220*
Ethanol (=alcool éthylique)	*64-17-5*	*13°C [79°c]*		*400°C*		*0,89*	*IIB – T2*		*2*
1-Propanol	*71-23-8*	*15°C [97°C]*	*385*			*0,87*	*IIB – T2*		*2*
Formate de méthyle	*107-31-3*	*-20°C [32°C]*		*346°C*		*0,94*	*IIB – T2*	*[haute]*	*1*
Naphta (solvant)								*[haute]*	
3-Chloro-2-methyl-1-propene	*563-47-3*	*-12°C [72,2°C]*		*541*			*IIB – T1*		*2*
Oxyde de propylène	*75-56-9*	*-37°C [34°C]*		*430*	*0,82*	*0,7*	*IIB – T2*	*[haute]*	*1*

Substance	CAS	Point éclair (°C) [temp. ebullition]	EMI (mJ)	Temp. inflammation (°C)	Vitesse maxi de combustion laminaire (m/s)	Maxi exprimental Safe Gap MESG (mm)	Groupe équipement et classe de température	Classement réactivité BEVI (Purple)	Catégorie liquide
Oxyde d'éthylène	75-21-8	gaz		429	1,08	0,59	IIB – T2	(haute)	gaz
Formaldéhyde (=méthanal = oxyde de méthylène)	50-00-0	60°C					IIB – T2	[haute]	3
Sulfure d'hydrogène	7783-06-4	gaz		260			IIB – T3	[haute]	gaz
Diméthylhydrazine	57-14-7	-18°C [63°C]					IIB – T3		2
oxyde de diéthyle (=ether)	60-29-7	-45°C [35°C]	0,20	175	0,47	0,87	IIB – T4		1
butanethiol	109-79-5	1°C [98°C]						[haute]	2
Acétylène (=éthyne)	74-86-2	gaz	0,017	305	1,58 / 1,66	0,37	IIC – T2	(haute)	gaz
hydrogène	1333-74-0	gaz	0,011	560	3,5	0,29	IIC – T1		gaz
Disulfure de carbone	75-15-0	-30°C [46°C]	0,009	90	0,58	0,37	IIC – T6	[haute]	2

2.2.4 Proposition de classement pour application de la méthode

Les probabilités d'inflammation proposées font apparaitre 3 classes de substances :

- faiblement réactives justifiant une réduction de la probabilité d'inflammation ;
- moyennement ou hautement réactives (la majorité des substances) ;
- hautement réactives particulières (équivalents à des substances très réactives s'enflammant facilement).

Note : une analyse du comportement des substances étudiées est à mener pour justifier la possibilité d'un effet donné. Par exemple, pour l'ammoniac, le jet enflammé n'est pas retenu comme physiquement possible.

2.2.4.1 Classement en faiblement réactif

On se propose de considérer de manière majorante pour les faiblement réactifs une liste limitée de substances. Il appartient alors à l'utilisateur de justifier si d'autres substances répondent au critère de faiblement réactifs.

Les substances proposées sont :

- le méthane,
- l'ammoniac,

- des substances identifiées par le BEVI ou le Purple Book qui sont des substances comportant des composés halogénés : bromométhane, 1,3-dichloropropène, chloroéthane, chlorométhane, oxyde de carbone,
- de manière générale, des substances ou mélanges répondant aux critères :
  - EMI > 0,3 mJ
  - vitesse laminaire de combustion < 0,45 m/s
  - MESG > 1,14mm

2.2.4.2 Classement en hautement réactif particuliers

On conserve :

- les substances classées en IIC, à savoir : l'hydrogène, l'acétylène
- l'oxyde de propylène, l'oxyde d'éthylène, l'éthylène, le propyne

Note : le disulfure de carbone est un liquide classé IIC. On lui appliquera une probabilité d'inflammation majorée par rapport aux autres liquides.

De manière générale, une substance sera considérée comme hautement réactive particulière si ses caractéristiques répondent à un des deux critères

- EMI < 0,1 mJ
- Vitesse laminaire de combustion > 0,8 m/s
- MESG < 0,74mm

2.2.4.3 Classement en hautement ou moyennement

Les autres substances ne répondant pas au critère des deux catégories précédentes seront classées dans cette catégorie.

3. SENSIBILITE DES COMBUSTIBLES PULVERULENTS A LA SOURCE D'INFLAMMATION

3.1 CARACTERISTIQUES DES PULVERULENTS COMBUSTIBLES

Pour caractériser plus précisément les risques d'explosion, d'auto-échauffement ou d'incendie dans une installation où est mis en oeuvre un pulvérulent combustible, il est nécessaire de connaître, et si besoin de déterminer expérimentalement, certaines caractéristiques d'inflammabilité et d'explosibilité du produit[10].

Les caractéristiques concernées sont :

- Température de début d'oxydation sous air ;
- Dimension et température critiques d'un stockage ;

[10] *Oméga 14 : Sécurité des procédés mettant en œuvre des pulvérulents combustibles. Décembre 2014*

- Température minimale d'inflammation (TMI) d'un produit en dépôt de 5 mm ;
- Température minimale d'inflammation (TMI) d'un produit en nuage ;
- Energie minimale d'inflammation (EMI) ;
- Caractéristiques de violence d'explosion (Kst) et de pression maximale d'explosion (Pmax) ;
- Limites d'explosivité ;
- Concentration limite en oxygène (CLO).

Il est important de souligner que celles-ci dépendent très largement de la granulométrie du produit, qu'il convient toujours de préciser en regard d'une des caractéristiques décrites précédemment.

Il existe 6 conditions nécessaires à l'occurrence de l'explosion d'une ATEX air pulvérulent :

- présence d'air,
- présence du pulvérulent combustible,
- le pulvérulent doit être de granulométrie suffisamment fine, c'est-à-dire sous forme de grains de dimension moyenne inférieure à 300 µm, et dispersé dans l'air sous forme de nuage,
- existence de proportions adéquates entre l'air et le pulvérulent (un tel mélange constitue l'ATEX),
- présence d'une source d'inflammation dans l'ATEX,
- présence d'un confinement suffisant de l'ATEX et d'un volume suffisant d'ATEX par rapport au volume de ce confinement.

3.2 SOURCES D'INFLAMMATION

Pour les combustibles pulvérulents, l'EMI est généralement comprise entre 0,1 et 100 J ; de plus, elle dépend de la granulométrie (elle est d'autant plus faible que la granulométrie est fine) et du taux d'humidité du pulvérulent (elle est d'autant plus faible que ce taux est faible).

L'expérience montre qu'il existe de nombreuses situations où une ATEX est susceptible de recevoir localement une énergie au moins égale à la valeur de l'EMI et donc capable d'enflammer cette ATEX.

Citons les sources d'inflammation les plus souvent mises en cause dans les explosions accidentelles :

- les flammes nues (briquet, chalumeau, brûleur…) ;
- une surface portée à température élevée et en contact avec l'ATEX, par le biais du phénomène d'auto-inflammation ; le phénomène d'auto-échauffement (cf. § 2.3) peut également être à l'origine de l'inflammation d'une ATEX ;
- les étincelles électriques produites par les matériels électriques standards (interrupteur, moteur…) ;

- les étincelles ou points chauds produits par le choc ou le frottement entre deux solides (pièces métalliques, par exemple) ;
- certaines étincelles de décharge électrostatique, pour les pulvérulents dont l'EMI est inférieure à 1 J. Au contraire, pour les pulvérulents dont l'EMI est sensiblement supérieure à 1 J, les phénomènes de décharge électrostatique ne libèrent pas suffisamment d'énergie pour constituer une source d'inflammation,
- la foudre,
- échauffements d'origine mécanique[11] :
  - échauffements des courroies de transmission ou des bandes de transport,
  - les bourrages,
  - l'usure des paliers / roulements,
  - les élévateurs : patinage au niveau du tambour, frottement des courroies sur les carters),
  - les appareils à cylindres : défaut de réglage des cylindres),
  - les équipements tournants (échauffement des parois).

11 Association national de la meunerie française _ Guide de l'état de l'art de l'industrie meunière relatif à la prévention et à la protection des risques présentés par les installations de meunerie soumises à autorisation au titre de la rubrique 2260.Juillet 2011

Annexe 2 :
Comparaison et justification des valeurs de probabilités d'inflammation de gaz proposées

Cette annexe compare les valeurs retenus dans ce rapport pour les fuites de gaz avec celles présentes dans les bases de données ayant servies de sources à cette étude. Elle est structurée comme le présent rapport, en reprenant les tableaux présentés pour les comparer avec ceux issus d'autres bases.

1. PROBABILITES D'INFLAMMATION IMMEDIATE

1.1 REJET CONTINU

Les valeurs de probabilités d'inflammation immédiate d'un rejet continu de gaz inflammable que nous présentons dans ce rapport sont rappelées dans le tableau suivant :

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac</th></tr>
<tr><td colspan="2">ERC induit par une source d'énergie</td><td colspan="3">1</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="3">ERC non induit par une source d'énergie (corrosion, fuite de joint…) : selon le débit de fuite Q et la réactivité du gaz, la probabilité augmente</td><td>Si Q > 10 kg/s</td><td colspan="2">1</td><td>10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si 1 kg/s < Q < 10 kg/s</td><td>1</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si Q < 1 kg/s</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>10^{-2}</td><td>0</td></tr>
</table>

1.1.1 Comparaison avec le BEVI

Pour l'inflammation immédiate d'un rejet continu de gaz inflammable liquéfié ou comprimé, le BEVI considère pour des installations fixes (y compris citernes en phase de transfert) :

- pour les gaz hautement et moyennement réactifs : une probabilité d'inflammation immédiate à 0,2 si Q < 10 kg/s ; si le débit est compris entre 10 et 100 kg/s, la probabilité d'inflammation est de 0,5 ; si le débit est supérieur à 100 kg/s alors la probabilité d'inflammation est 0,7.
- pour les gaz faiblement réactifs, la probabilité d'inflammation immédiate ne dépasse pas 0,1, quel que soit le débit. Une probabilité d'inflammation immédiate de 0,02 est adoptée si Q < 10 kg/s.

Ces valeurs sont résumées dans le tableau suivant.

Catégorie de la substance	Terme source si rejet continu	Probabilité d'inflammation immédiate
Catégorie 0 moyenne/haute réactivité	< 10 kg/s 10-100 kg/s > 100 kg/s	0,2 0,5 0,7
Catégorie 0 basse réactivité	< 10 kg/s 10-100 kg/s > 100 kg/s	0,02 0,04 0,09
Catégorie 1	tout débit	0,065
Catégorie 2	tout débit	0,01
Catégorie 3, 4	tout débit	0

Pour les équipements de transport hors phase de transfert, la probabilité d'inflammation immédiate indiquée dans le BEVI ne dépend pas de la substance mais de la citerne (0,1 pour les wagons et les camions et de 0,5 à 0,7 pour les bateaux). Nous avons choisi dans notre méthode pour simplifier d'adopter les mêmes valeurs que pour les installations fixes, cette approche étant majorante pour les gaz moyennement et hautement réactifs.

Les valeurs que nous proposons sont donc dans la plupart des cas **plus grandes que celles du BEVI, jusqu'à un facteur 5** pour les rejets dont le débit est compris entre 1kg/s et 10kg/s : **nous retenons une probabilité de 1 pour les gaz hautement réactifs et 0,1 pour les faiblement réactifs là où le BEVI retient respectivement 0,2 et 0,02.**

Pour les fuites de débit inférieur à 1kg/s, les valeurs que nous proposons sont 2 fois plus faibles que celles du BEVI, ce qui se justifie car la catégorie correspondante couvre jusqu'à des fuites de débit 10 kg/s.

Note : la base ARAMIS retient les valeurs du BEVI pour les inflammations immédiates de gaz.

1.1.2 Comparaison avec l'UKOOA

La base UKOOA [6] considère que la probabilité d'inflammation immédiate est de 10^{-3} quel que soit le produit concerné. Cette valeur est très faible au regard de celles du BEVI. Nous avons donc choisi de ne pas la retenir.

1.1.3 Comparaison avec le guide GESIP

Pour des canalisations de transport d'éthylène et de propylène (gaz de réactivité moyenne), le guide GESIP s'appuie sur les données du « Loss Prevention in the Process Industries » [9] 2nd Ed. par Frank P. Lees au chapitre 16.10 "Ignition Models" pour en déduire les probabilités d'inflammation immédiate :

- Fuite mineure (< 1 kg/s) : 1%
- Fuite importante (1 à 50 kg/s) : 6 % ;
- Fuite majeure (> 50 kg/s) : 21%

Il est à noter que le Lees ne distingue pas les probabilités en fonction de la réactivité du gaz. Ces données sont applicables à toute tuyauterie (pas nécessairement enterrées).

La valeur de fuite mineure est **10 fois inférieure** à celle que nous avons retenue. La plage de fuite importante n'est pas la même que celle que nous avons retenue, mais la valeur correspondante est **un peu inférieure** pour les débits inférieurs à 10 kg/s (**6% au lieu de 10%**), et **plus de 16 fois inférieure** (**6% au lieu de 1**) pour les débits entre 10 et 50 kg/s. La valeur de fuite majeure est **5 fois inférieure** à celle que nous avons retenue (**21% au lieu de 1**).

Pour de l'hydrogène (gaz de très forte réactivité), compte-tenu de l'énergie minimale d'inflammation, le guide GESIP retient une probabilité d'inflammation (immédiate / retardée) de 59% pour une petite brèche (< 12 mm) et 100% pour les autres brèches.

Pour des conditions équivalentes (fuite dans une zone non classée ATEX, notre proposition retient le même ordre de grandeur : 1.

L'accidentologie confirme que l'hydrogène s'enflamme dans la majorité des cas (16% de fuites non enflammées selon « l'accidentologie de l'hydrogène par le BARPI »). La proportion jet enflammé / explosion dépend de la position de la fuite : à l'intérieur de locaux, on relève 3 fois plus d'explosions que de jets enflammés alors qu'en moyenne on relève 2 fois plus d'explosions que de jets enflammés. Il n'y a pas de différence notable, si bien qu'une probabilité d'inflammation immédiate de 1 est retenue.

Pour le gaz naturel, le guide GESIP s'appuie sur la base EGIG (transport de gaz naturel ; pression ≥ 16 bar ; tuyauteries enterrées) et note les probabilités d'inflammation (totale) suivantes :

- Petite brèche (< 12 mm) : 4% (part due à la foudre importante) ;
- Brèche moyenne (13 à 70 mm) : 2% ;
- Rupture : 10 % pour DN ≤ 400 mm et 33% pour DN > 400 mm.

Il est précisé que des données pour la distribution de gaz conduisent à ne pas modifier ces chiffres, même en environnement urbain.

Si on supprime la cause « foudre » (installations classées protégées contre la foudre), la probabilité est réduite pour les petites et moyennes fuites :

- Petite brèche (< 12 mm, correspondant à un débit de 0,4 kg/s sous 25 bar) : 0,7% (part due à la foudre importante) ;
- Brèche moyenne (13 à 70 mm, correspondant à un débit de 4,4 kg/s sous 25 bar) : 1,5% ;
- Rupture (débit pouvant être encore inférieur à 10 kg/s) : probabilité inchangée.

On peut considérer pour un gaz faiblement réactif une probabilité d'inflammation de 10% pour un débit inférieur à 10 kg/s et 10% pour un débit supérieur à 10 kg/s (les diamètres sur site étant généralement ≤ 400 mm). On aurait pu envisager une probabilité de 10^{-2} pour des débits < 1 kg/s mais rappelons que ces données sont valables spécifiquement pour des tuyauteries enterrées de gaz naturel sous pression, pour lesquelles la probabilité d'inflammation est réduite du fait de la formation d'un jet vertical qui limite la possibilité de rencontrer une source d'inflammation. De plus, dans le cas des jets turbulents de gaz, la source d'inflammation doit se trouver au centre du jet et avec une surface et une énergie minimales. On conserve donc une probabilité de 10^{-1} même pour des débits < 10 kg/s.

1.2 REJET INSTANTANE

Les valeurs de probabilités d'inflammation immédiate d'un rejet instantané de gaz inflammable que nous présentons dans ce rapport sont rappelées dans le tableau suivant :

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac</th></tr>
<tr><td colspan="2">ERC induit par une source d'énergie</td><td colspan="3">1</td><td>0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ERC non induit par une source d'énergie (corrosion, fuite de joint…) : selon le débit de fuite Q et la réactivité du gaz, la probabilité augmente</td><td>Si Q > 1000 kg</td><td colspan="2">1</td><td>10^{-1}</td><td>0</td></tr>
<tr><td>Si Q < 1000 kg</td><td>1</td><td colspan="2">10^{-1}</td><td>0</td></tr>
</table>

1.2.1 Comparaison avec le BEVI

Pour l'inflammation immédiate d'un rejet instantané de gaz inflammable liquéfié ou comprimé, le BEVI donne pour le BLEVE une probabilité égale à P_{imm} x Fraction de BLEVE, cette fraction étant égale à 0,7 pour les installations fixes et 1 pour les unités de transport, car une 2ème branche avec « explosion » est associée à la probabilité d'inflammation immédiate. Dans notre approche, l'explosion est associée à l'inflammation retardée.

Le BEVI considère de plus que la probabilité d'inflammation immédiate dépend de la quantité relâchée

- pour les gaz hautement et moyennement réactifs : une probabilité d'inflammation immédiate à 0,2 si Q < 1000 kg ; si la quantité relâchée est comprise entre 1000 et 10000 kg/s, la probabilité d'inflammation est de 0,5 ; si la quantité est supérieure à 10000 kg/s alors la probabilité d'inflammation est 0,7.
- pour les gaz faiblement réactifs, la probabilité d'inflammation immédiate ne dépasse pas 0,1, quel que soit la quantité. Une probabilité d'inflammation immédiate de 0,02 est adoptée si Q < 1000 kg.

Ces valeurs sont résumées dans le tableau suivant :

Catégorie de la substance	Terme source si rejet instantané	Probabilité d'inflammation immédiate
Catégorie 0 moyenne/haute réactivité	< 1.000 kg 1000 – 10000 kg > 10000 kg	0,2 0,5 0,7
Catégorie 0 basse réactivité	< 1.000 kg 1000 – 10000 kg > 10000 kg	0,02 0,04 0,09
Catégorie 1	toute quantité	0,065
Catégorie 2	toute quantité	0,01
Catégorie 3, 4	toute quantité	0

Dans le BEVI, Pour les équipements de transport hors phase de transfert, la probabilité d'inflammation immédiate ne dépend pas de la substance mais de la citerne (0,1 pour les wagons et les camions et de 0,5 à 0,7 pour les bateaux) ; les valeurs que nous proposons sont les mêmes que pour les installations fixes pour simplifier. Pour les gaz moyennement et hautement réactifs :

- majorant pour les wagons et citernes car on affiche 1 alors que le BEVI donne 0,1 ;
- minorant pour les navires où on peut afficher 0,1 alors que le BEVI donne 0,1.

Pour les gaz faiblement réactifs, notre approche est minorante pour toutes les citernes.

Les valeurs que nous proposons sont dans la plupart des cas **plus grandes que celles du BEVI, jusqu'à un facteur 5** pour les rejets dont la quantité est inférieure à 1000 kg : **nous retenons une probabilité de 1 pour les gaz hautement réactifs et 0,1 pour les faiblement réactifs là où le BEVI retient respectivement 0,2 et 0,02.** En revanche, pour les gaz **moyennement réactifs**, nous avons choisi de **retenir 0,1 là ou le BEVI retient 0,2.**

Pour les fuites de **quantité supérieure à 1000kg,** les valeurs que nous proposons sont **plus élevées que celles du BEVI (1 contre 0,5 à 0,7 dans le BEVI** pour les hautement et **moyennement et hautement réactifs**, **0,1 contre 0,09** pour les **faiblement réactifs**).

Note : ARAMIS retient les mêmes valeurs que le BEVI.

1.2.2 Comparaison avec l'UKOOA

La base UKOOA [6] considère que la probabilité d'inflammation immédiate est de 10^{-3} quel que soit le produit concerné. Cette valeur est très faible au regard de celles du BEVI. Nous avons donc choisi de ne pas la retenir.

2. PROBABILITES D'INFLAMMATION RETARDEE

2.1 REJET CONTINU

Les valeurs de probabilités d'inflammation retardée d'un rejet continu longue durée de gaz inflammable que nous présentons dans ce rapport sont rappelées dans le tableau suivant :

<table>
<tr><th>Nuage contenu dans la zone</th><th>Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)</th><th>Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)</th><th>Gaz peu réactifs (hors ammoniac)</th><th>Ammoniac (en milieu confiné)</th></tr>
<tr><td>Absence de sources d'inflammation (notamment absence de personnel et de voies de circulation, par exemple zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)</td><td>10^{-1}</td><td colspan="3">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>« Classée ATEX » avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)</td><td>10^{-1}</td><td>10^{-2}</td><td colspan="2">10^{-3}</td></tr>
<tr><td>« Classée ATEX » avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)</td><td>1</td><td>10^{-1}</td><td colspan="2">10^{-2}</td></tr>
<tr><td>Nuage contenu dans une « zone non classée ATEX » contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)</td><td colspan="2">1</td><td colspan="2">10^{-1}</td></tr>
</table>

Les valeurs de probabilités d'inflammation retardée d'un rejet continu courte durée de gaz inflammable que nous présentons dans ce rapport sont rappelées dans le tableau suivant :

Nuage contenu dans la zone	Gaz très réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)	Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)	Gaz peu réactifs (hors ammoniac)	Ammoniac (en milieu confiné)
Absence de sources d'inflammation et absence de personnel et voies de circulation (zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)	10^{-1}	10^{-3}		
Classée ATEX avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)	10^{-1}	10^{-3}		
Classée ATEX avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)	1	10^{-1}	10^{-2}	
Nuage contenu dans une zone non classée ATEX contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)	1		10^{-1}	

2.2 REJET INSTANTANE

Les valeurs de probabilités d'inflammation retardée d'un rejet instantané de gaz inflammable que nous présentons dans ce rapport sont égales à celles du rejet continu de longue durée, rappelées dans le tableau suivant :

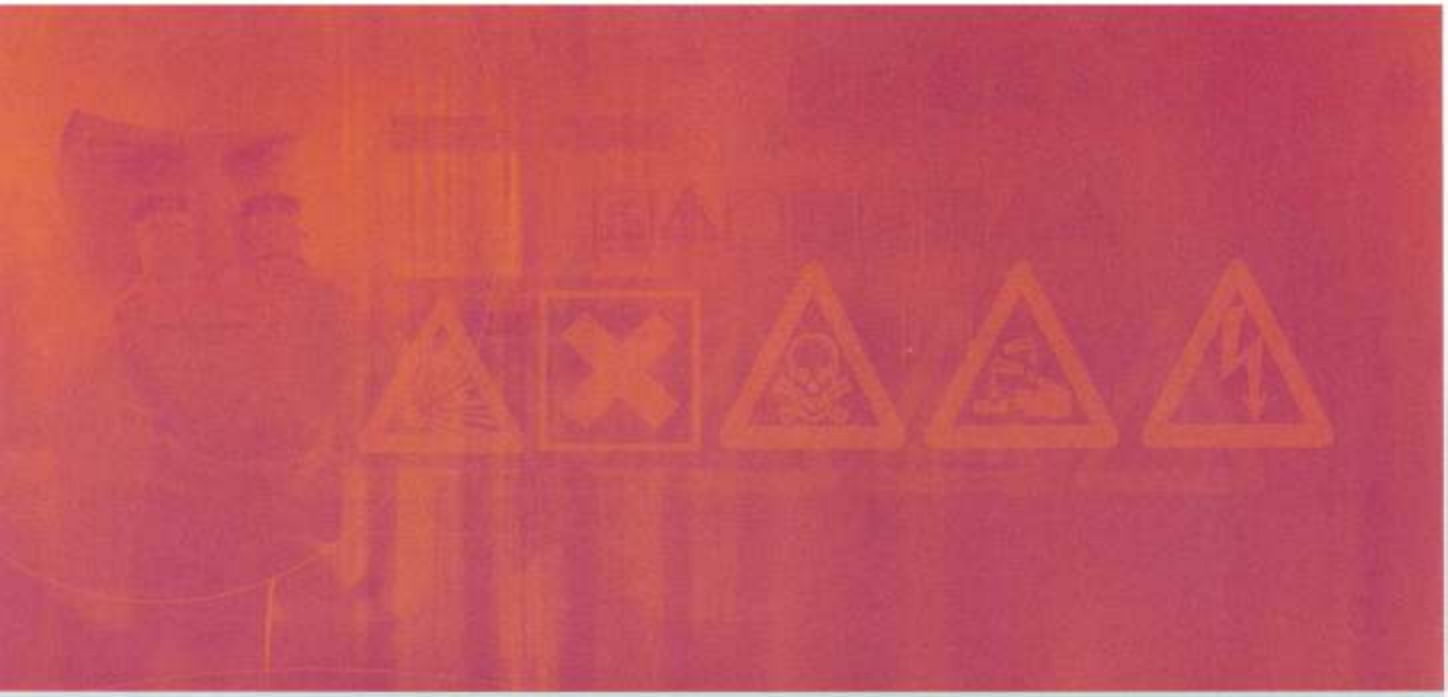
Nuage contenu dans la zone	Gaz hautement réactifs particuliers (hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène…)	Gaz moyennement et hautement réactifs (hors ceux identifiés en 1ère colonne)	Gaz peu réactifs (hors ammoniac)	Ammoniac (en milieu confiné)
Absence de sources d'inflammation (notamment absence de personnel et de voies de circulation, par exemple zone entre deux unités de production, rejet vertical de soupape en aérien…)	10^{-1}	10^{-3}		
« Classée ATEX » avec présence de personnel occasionnelle (exemple rétention)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	
« Classée ATEX » avec forte présence de personnel (exemple zone de dépotage)	1	10^{-1}	10^{-2}	
Nuage contenu dans une « zone non classée ATEX » contenant de possibles sources d'inflammations (extérieur site par exemple)	1		10^{-1}	

2.3 COMPARAISON AVEC LE BEVI

Pour l'inflammation retardée d'un rejet continu de longue durée d'un gaz inflammable liquéfié ou comprimé, pour le BEVI, la probabilité d'inflammation retardée est déduite de la probabilité d'inflammation immédiate : $P_{ret} = (1-P_{imm})$ x Facteur, ce facteur étant indépendant de la réactivité de la substance. Ce facteur dépend de la présence de sources d'inflammation : si le nuage sort du site, il est retenu une probabilité de 1. Sinon, une évaluation est à faire en fonction des sources :

- pour de grosses fuites (sortant a priori des limites du site), avec une probabilité d'inflammation immédiate de 0,7, la probabilité de VCE est de 0,3, c'est-à-dire que le rejet s'enflamme toujours ;
- pour de petites fuites, ne sortant pas a priori des limites du site, on pondère selon le classement de la zone et la probabilité de présence de personnel.

L'approche proposée par le BEVI étant une approche QRA, il est difficile de la comparer avec les valeurs retenues dans notre proposition.



INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
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