

**Bureau Veritas Exploitation**

Service Risques Industriels  
16 Chemin du Jubin – BP 26  
69 571 DARDILLY CEDEX  
Siège social : 8 cours du Triangle – 92 800 PUTEAUX  
SAS au capital de 36 315 050 €  
RCS Nanterre 790 184 675

**Responsable de l'étude :**

Pierrick DUHAMEL  
Tél. +33 6 45 90 26 06  
pierrick.duhamel@bureauveritas.com



**Destinataire de l'étude :**

AROL ENERGY  
17 Av. du Lac Léman  
73370 LE BOURGET-DU-LAC

## **Etude de risques pour justifier la distance minimale d'éloignement entre épuration biogaz et chaufferie biogaz**

<b>Indice</b>	<b>Date</b>	<b>Révision</b>	<b>Emetteur</b>	<b>Vérificateur</b>
0	26/08/2022	Edition initiale	Pierrick DUHAMEL Ingénieur en risques Industriels	Cécile DUBIEN Manager du service risques Industriels
1	02/09/2022	Révision 1	Pierrick DUHAMEL Ingénieur en risques Industriels	-
1	12/09/2022	Révision 2	Pierrick DUHAMEL Ingénieur en risques Industriels	-

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>CONTEXTE</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTS DE REFERENCE</b> .....	<b>5</b>
2.1	GUIDES TECHNIQUES.....	5
2.2	DOCUMENTS ET DONNEES LIES AU PROJET.....	5
<b>3</b>	<b>DESCRIPTION D'UNE INSTALLATIONS TYPE</b> .....	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>ANALYSE DES RISQUES</b> .....	<b>8</b>
4.1	DANGERS LIES AUX SUBSTANCES.....	8
4.2	DANGERS LIES AUX INSTALLATIONS .....	9
4.3	SCENARIOS ET PHENOMENES DANGEREUX RETENUS .....	10
<b>5</b>	<b>SEUILS D'EFFETS CONSIDERES POUR LA DETERMINATION DES ZONES DE DANGERS</b> <b>11</b>	
5.1	SEUILS D'EFFETS DE SURPRESSION.....	11
5.2	SEUILS D'EFFETS THERMIQUES.....	12
5.3	CARACTERISATION DES CIBLES OU ENJEUX POTENTIELS .....	13
<b>6</b>	<b>MODELES DE CALCUL</b> .....	<b>14</b>
6.1	LOGICIEL DE MODELISATION.....	14
6.2	DEBIT DE FUITE EN CAS DE RUPTURE OU BRECHE SUR UN EQUIPEMENT OU UNE TUYAUTERIE.....	14
6.3	DIRECTION ET HAUTEUR DE LA FUITE .....	14
6.4	DISPERSION ATMOSPHERIQUE D'UN GAZ.....	14
6.5	FEU TORCHE (OU JET ENFLAMME).....	16
6.6	EXPLOSION NON CONFINÉE (UVCE / FLASH FIRE).....	16
6.7	EXPLOSION CONFINÉE (VCE) DANS UN LOCAL .....	18
<b>7</b>	<b>MODELISATION DE L'EXPLOSION DU CONTAINER EPURATION</b> .....	<b>20</b>
7.1	PHENOMENE DANGEREUX MODELISE .....	20
7.2	RESULTATS .....	20
7.3	CONCLUSION.....	21
<b>8</b>	<b>MODELISATION DE L'EXPLOSION DU CONTAINER CHAUFFERIE</b> .....	<b>22</b>
8.1	PHENOMENE DANGEREUX MODELISE .....	22
8.2	DONNEES – HYPOTHESES DE CALCUL .....	22
8.3	RESULTATS.....	22
8.4	CONCLUSION.....	23
<b>9</b>	<b>MODELISATION D'UNE FUITE DE BIOGAZ EN AVAL DU COMPRESSEUR</b> .....	<b>24</b>
9.1	DONNEES – HYPOTHESES DE CALCUL .....	24
9.2	RESULTATS .....	24
9.3	CONCLUSION.....	25



<b>10</b>	<b>MODELISATION D'UNE FUITE DE METHANE SUR LA TUYAUTERIE D'ALIMENTATION DE LA CHAUDIERE .....</b>	<b>26</b>
10.1	DONNEES – HYPOTHESES DE CALCUL .....	26
10.2	RESULTATS .....	26
10.3	CONCLUSION .....	27
<b>11</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>28</b>



## 1 CONTEXTE

AROL ENERGY fournit des solutions de traitement de gaz et de valorisation énergétique clé en main (unités d'épuration de biogaz, chaufferie biogaz, .. contenues en containers).

Ces unités sont installées usuellement sur des sites non classés au titre des ICPE, ou relevant de la réglementation ICPE et classés notamment sous le régime de la déclaration ou de l'enregistrement pour la rubrique 2781 – Méthanisation.

Les arrêtés ministériels de prescriptions générales (AMPG) applicables à la méthanisation sous la rubrique 2781 ont été révisés par les arrêtés publiés au Journal Officiel du 30 juin 2021. Dans les nouveaux AMPG Enregistrement et Déclaration, il est exigé que :

*« La distance entre les installations de combustion ou un local abritant ces équipements (unités de cogénération, chaudières) et les installations d'épuration de biogaz ou un local abritant ces équipements ne peut être inférieure à 10 mètres. »*

Cette prescription n'existait pas antérieurement. Pour les installations déclarées ou enregistrées avant le 1er juillet 2021 ou dont le dossier complet de déclaration ou de demande d'enregistrement a été déposé avant le 1er juillet 2021, cette prescription n'est applicable qu'aux nouveaux équipements, à partir du 1er juillet 2021. Pour les installations déclarées ou enregistrées après le 1er juillet 2021, cette prescription est applicable au 1er juillet 2021.

Des unités de traitement de gaz et de valorisation énergétique AROL ENERGY ont été implantées sur des sites existants non classés mais qui souhaitent augmenter leur capacité et passer sous les régimes de la déclaration ou de l'enregistrement ICPE. Ces installations, bien qu'existantes, sont considérées comme nouvelles et doivent donc respecter la distance d'éloignement minimale de 10 m ce qui n'est pas toujours le cas.

Afin d'apporter des éléments à ses clients, pour qu'ils puissent demander et justifier une demande de dérogation à l'inspection des ICPE, vis-à-vis de cette exigence de distance d'éloignement de 10 m minimum, AROL ENERGY souhaite disposer d'une analyse de risques sur les distances d'effets en cas d'accident, notamment vis-à-vis des effets domino, afin de comparer les distances d'effets déterminées par le calcul à l'exigence de 10 m.



## 2 DOCUMENTS DE REFERENCE

### 2.1 Guides techniques

Cette étude s'appuie sur les textes réglementaires, les guides techniques et rapports d'expertises suivants :

- [R1] Arrêté du 29 septembre 2005 – dit arrêté « PCIG » - 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 soumises à autorisation.
- [R2] Circulaire du 10 mai 2010 « récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers, à l'appréciation de la démarche de réduction du risque à la source et aux plans de prévention des risques technologiques (PPRT) dans les installations classées en application de la loi du 30 juillet 2003 » applicable aux installations soumises à simple autorisation moyennant le principe de proportionnalité.
- [R3] INERIS – Rapport N°46032 – DRA 32 – Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel – 10/04/2006.
- [R4] INERIS – DRA-14-133344-01580B – Etude des distances d'effets (explosion, thermique, toxique) des principaux scénarios majorants d'unité d'épuration de biogaz et d'injection de biométhane – 07/10/2014.
- [R5] « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation du logiciel PHAST à l'usage des industriels de l'industrie chimique » – UIC – DT 102 – Septembre 2012.
- [R6] 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 de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables - Version 3 – 2008 – MEEDDAT.
- [R7] INERIS – DRA-14-133344-01580B – Etude des distances d'effets (explosion, thermique, toxique) des principaux scénarios majorants d'unité d'épuration de biogaz et d'injection de biométhane – 07/10/2014.
- [R8] INERIS – N° DRA-12-125630-04945B – Les éclatements de capacités, phénoménologie et modélisation des effets - Ω 15 – 17/10/2013

### 2.2 Documents et données liés au projet

Les principaux documents relatifs au site et au projet qui ont été pris en compte dans l'élaboration de la présente étude sont notamment (liste non exhaustive) :

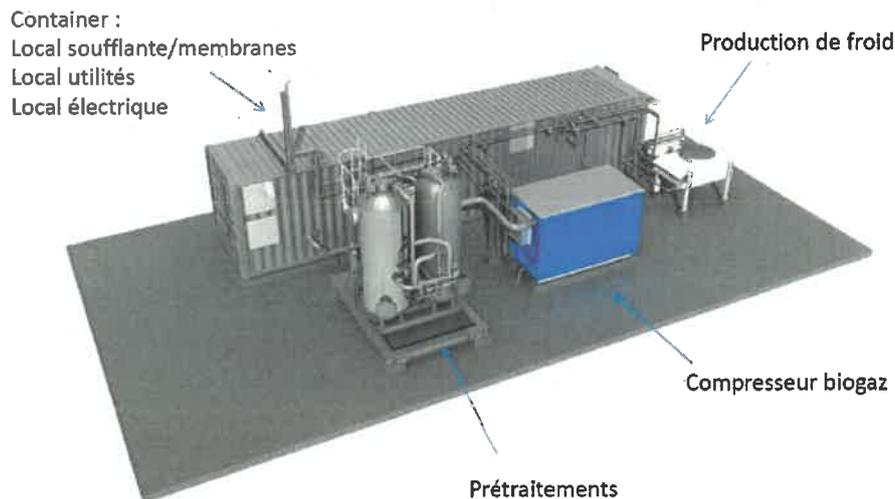
- Présentation du procédé type avec exemple d'implantation ;
- PID ;
- Caractéristiques des containers utilisés.

### 3 DESCRIPTION D'UNE INSTALLATIONS TYPE

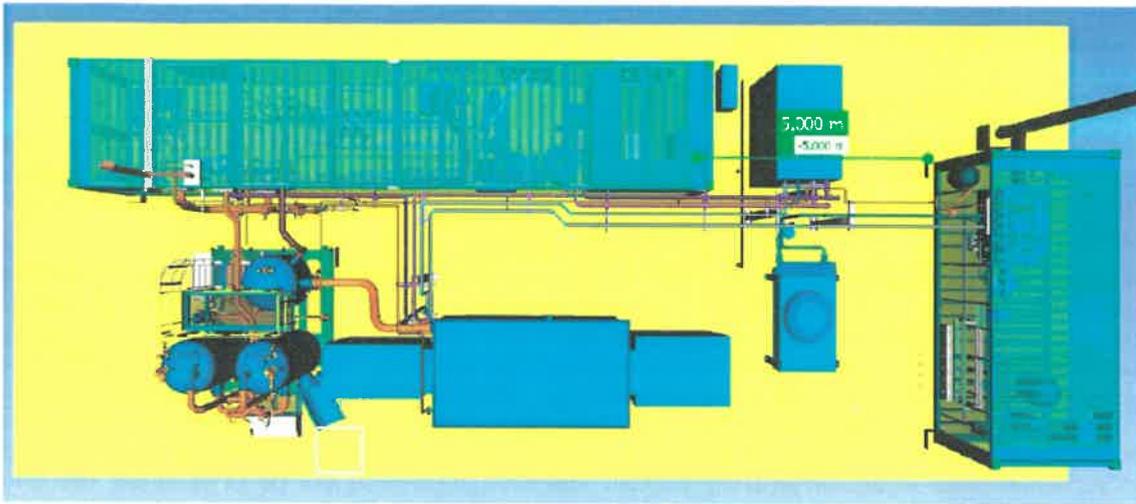
Le type d'installations étudiées dans ce rapport est composé :

- Une sous-unité de pré-traitement composé :
  - D'un bloc de déshumidification avec un économiseur qui pré-refroidit (en entrée) et réchauffe (en sortie) le gaz et un sécheur qui condense la majeure partie de l'eau présente dans le biogaz. Pour tout ce bloc, le plus souvent situé dans le container épuration, le biogaz est à moins de 0.5 barg.
  - D'un bloc de désulfuration avec deux filtres en lead-lag (en série, dont on peut choisir le sens de circulation ou en isoler un) remplis de charbon actif et un filtre chargé de la désulfuration et de l'élimination des COV du biogaz et un filtre pour retenir les particules.
- Un compresseur de biogaz ;
- Un container dit « d'épuration » de type 40 pieds, découpé en 3 locaux hermétiques : local électrique, local utilités et local process ; ce dernier local abrite un compresseur et les étages membranaires d'épuration.
- Un container de type 20 pieds abritant une chaudière alimentée par le biogaz.

Notons également la présence d'une unité de production de froid en extérieur, connecté au local utilités et permettant le fonctionnement des échangeur dans le local process.



**Figure 1 : Unité d'épuration de biogaz**



**Figure 2 : Implémentation standard de l'unité d'épuration (à gauche) et de la chaufferie (container à droite)**

## 4 ANALYSE DES RISQUES

### 4.1 Dangers liés aux substances

La principale substance dangereuse dans le type d'installation étudié est le méthane. Celui-ci peut être considéré comme pur en fin d'épuration et est considéré en mélange à 65% avec du CO<sub>2</sub> avant l'épuration. Dans le premier cas, on parlera de (bio)-méthane (= méthane quasi pur) biogaz et, dans le second, de biogaz.

Notons que la composition du biogaz varie selon les caractéristiques de la matière organique et les techniques utilisées. L'INERIS [R3] a analysé différentes compositions de biogaz provenant d'installations de traitement des boues dans des stations d'épuration. On peut ainsi noter la présence d'azote, d'oxygène et d'eau (de l'ordre de quelques %, avec un maximum de 17% d'azote pour certains biogaz au détriment de la concentration en méthane) ainsi que des composants sulfurés (H<sub>2</sub>S), aromatiques et organo-halogénés. Ces dernières substances ont une concentration de l'ordre de plusieurs centaines de mg/m<sup>3</sup> et peuvent être à considérer comme potentiels de danger toxiques, en particulier pour le personnel d'exploitation. Toutefois, comme le but de cette étude vise plus spécifiquement le risque d'effets domino, ce type de phénomène dangereux n'est pas pertinent. La composition considérée ci-dessus est ainsi majorante.

Les dangers liés au biogaz et au bio-méthane sont l'incendie et l'explosion du fait de la présence de méthane.

En cas d'inflammation de biogaz/biométhane, les phénomènes dangereux seront, selon la configuration : le Flash-fire (propagation de la flamme dans le nuage), l'explosion confinée ou non : (UVCE/Unconfined Vapour Cloud Explosion et VCE/Vapour Cloud Explosion), Feu torche ou Jet enflammé.

Les principales propriétés du méthane sont présentées dans le tableau ci-après.

Substances (abréviations)		Biogaz - Biométhane – Méthane
N°CAS		74-82-8
Point éclair		Non Concerné
Température d'auto inflammation en °C		537°C
Limites d'inflammabilité en volume % ans mélange avec air	LIE	5
	LES	15
Température d'ébullition sous pression atmosph. en °C		Non Concerné
Densité de vap./air		0,6
Densité de liq./eau		Non Concerné
Solubilité dans l'eau O = oui N = Non		O
Etiquetage		
Mention de danger		H220
Principaux dangers		Combustibilité (explosion) Nota : les limites d'inflammabilité du biogaz varient peu avec la teneur en CO <sub>2</sub> Asphyxie par manque d'oxygène en milieu confiné

Les caractéristiques données dans le tableau sont celles du méthane. En effet, ces caractéristiques varient peu avec la proportion de CO<sub>2</sub> présente dans le mélange.



Notons également la présence de charbon actif qui, mis en suspension dans un environnement confiné, est susceptible de générer des explosions. Toutefois, compte tenu des quantités de substance en présence, de la granulométrie (quelques mm) et des conditions opératoires, ce risque est improbable. L'explosion d'un filtre à charbon résulterait davantage d'une explosion de biogaz résiduel dans le filtre mais dont les distances d'effets seraient limitées à la proximité immédiate du filtre (voir 4.2).

#### 4.2 Dangers liés aux installations

Les principaux dangers liés aux installations correspondent aux dangers du biogaz ou bio-méthane qu'elles traitent. Les phénomènes dangereux associés ont été identifiés dans le paragraphe précédent. Il convient toutefois de distinguer les installations entre elles afin d'identifier plus clairement les scénarios susceptibles de survenir.

Sous-unité / équipement	Potentiel de danger	Scénarios accidentels envisagé	Caractéristiques / Conditions opératoire
Unité de prétraitement	Biogaz / Charbon actif	Explosion confinée Fuite de biogaz	Bloc de désulfuration : 2 filtres entre 1,2 et 2,2 m <sup>3</sup> , à 0,2 barg équipé de soupapes tarées à 0,5 barg.
Compresseur biogaz et tuyauterie compresseur-container	Biogaz	Fuite ou rupture de tuyauterie de biogaz	Diamètre de tuyauterie : DN25 Deux configurations sont étudiées : <ul style="list-style-type: none"><li>• 702 Nm<sup>3</sup>/h de biogaz comprimé à 16 barg ;</li><li>• 768 Nm<sup>3</sup>/h de biogaz comprimé à 14 barg (cas majorant, débit plus important).</li></ul>
Container épuration (local process)	Biogaz/Méthane	Fuite, formation d'une ATEX et explosion confinée	Local process : 7,4 m x 2,3 m x 2,6 m
Tuyauterie vers la chaudière	Méthane	Fuite ou rupture de tuyauterie de biométhane	Diamètre de tuyauterie : DN32 Pression : 200 mbarg Débit max. : 400 Nm <sup>3</sup> /h
Chaudière	Méthane	Fuite, formation d'une ATEX et explosion confinée	Container chaudière : 5,9 m x 2,3 m x 2,4 m

Les potentiels de dangers en présence ainsi que les conditions opératoires au sein de l'unité de prétraitement sont minorants par rapport aux autres scénarios. Ainsi les scénarios associés ne feront pas l'objet d'une étude approfondis.

Les équipements électriques ne sont également pas considérés dans cette étude. Bien que le risque d'incendie soit existant, les distances d'effets de ce type de phénomène pour ces équipements sont limitées compte tenu de la faible charge calorifique disponible. Ces équipements ne sont, de plus, pas considéré comme des cibles potentiels d'effet domino car la conséquence des scénarios les concernant n'aggraverait pas les conséquences du scénario principale (explosion, jet enflammé, etc...). Toutefois, ces équipements peuvent être une cause (élément initiateur) des séquences accidentelle et les analyses de risques futurs pourraient avoir à prendre en compte ces équipements.

### 4.3 Scénarios et phénomènes dangereux retenus

Quatre scénarios sont retenus pour cette étude :

- L'explosion du container épuration (effet de surpression) ;
- La rupture de la tuyauterie en sortie du compresseur de biogaz pouvant causer :
  - Un jet enflammé (effets thermiques) ;
  - Un UVCE / Flash-fire (effets thermique et de surpression) ;
- L'explosion du container chaudière (effet de surpression) ;
- La rupture de la tuyauterie vers la chaudière pouvant causer :
  - Un jet enflammé (effets thermiques) ;
  - Un UVCE / Flash-fire (effets thermique et de surpression).

Ces scénarios sont cohérents à ceux identifiés dans l'étude de l'INERIS [R4].

## 5 SEUILS D'EFFETS CONSIDERES POUR LA DETERMINATION DES ZONES DE DANGERS

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

Les valeurs de ces seuils sont rappelées ci-dessous.

Les effets létaux correspondent à la survenue de décès. Les effets irréversibles correspondent à la persistance dans le temps d'une atteinte lésionnelle ou fonctionnelle, directement consécutive à l'exposition.

### 5.1 Seuils d'effets de surpression

	Valeurs	Commentaires
Effets sur l'homme	20 mbar	Seuil des effets délimitant la zone des effets indirects par bris de vitre sur l'homme.
	50 mbar	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine ». <b>SEI</b>
	140 mbar	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. <b>SPEL</b>
	200 mbar	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. <b>SELS</b>
Effets sur les structures	20 mbar	Seuil des destructions significatives de vitres.
	50 mbar	Seuil des dégâts légers sur les structures.
	140 mbar	Seuil des dégâts graves sur les structures.
	200 mbar	<b>Seuil des effets domino.</b>
	300 mbar	Seuil des dégâts très graves sur les structures.

Nota 1 : Le seuil des 20 mbar qui correspond au bris de vitres n'est pas contraignant.

Nota 2 : Le seuil de 200 mbar est le seuil à partir duquel on peut craindre la rupture des équipements industriels et, par suite, un sur-accident c'est-à-dire un effet domino. Pour les effets de projection, la circulaire du 10/05/2010 précise :

#### 1.2.2 Traitement spécifique des effets de projection

..., seuls les effets domino générés par les fragments sur des installations et équipements proches ont vocation à être pris en compte dans les études de dangers (une telle instruction est valable également pour les installations soumises à seule autorisation). »

## 5.2 Seuils d'effets thermiques

	Valeurs	Commentaires
Effets sur l'homme	3 kW/m <sup>2</sup> ou 600 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s ou 1,1 x distance à la LIE	Seuil des effets irréversibles délimitant la « zone des dangers significatifs pour la vie humaine ». <b>SEI</b>
	5 kW/m <sup>2</sup> ou 1 000 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s ou distance à la LIE	Seuil des effets létaux délimitant la « zone des dangers graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. <b>SPEL</b>
	8 kW/m <sup>2</sup> ou 1 800 (kW/m <sup>2</sup> ) <sup>4/3</sup> .s ou distance à la LIE	Seuil des effets létaux significatifs délimitant la « zone des dangers très graves pour la vie humaine » mentionnée à l'article L. 515-16 du code de l'environnement. <b>SELS</b>
Effets sur les structures	5 kW/m <sup>2</sup>	Seuil des destructions de vitres significatives.
	8 kW/m <sup>2</sup>	<b>Seuil des effets domino</b> et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures (risque de propagation du feu aux matériaux combustibles exposés de façon prolongé).
	16 kW/m <sup>2</sup>	Seuil d'exposition prolongée des structures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
	20 kW/m <sup>2</sup>	Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et correspondant au seuil des dégâts très graves sur les structures béton.
	200 kW/m <sup>2</sup>	Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes.

**Nota :** Les valeurs en kW/m<sup>2</sup> sont considérées pour les flux rayonnés en continu (durée supérieure à 2 minutes). Les valeurs en (kW/m<sup>2</sup>)<sup>4/3</sup>.s sont des doses, à considérer pour les flux rayonnés durant une durée inférieure à 2 minutes.

Pour le flash-fire, les effets sur l'homme sont dimensionnés par la distance à la LIE (limite inférieure d'inflammabilité).

Par ailleurs, le phénomène d'UVCE - flash-fire est très court. L'expérience montre que les effets thermiques du flash fire sur les structures se limitent à des dégâts superficiels (déformation des plastiques, décollement des peintures, ...), et, éventuellement, à une fragilisation possible de certaines structures métalliques légères. En revanche, les effets de suppression de l'UVCE peuvent être initiateurs d'un incendie, ou être suivi d'un feu torche, dont les effets thermiques sont à redouter.



### 5.3 Caractérisation des cibles ou enjeux potentiels

Pour les effets sur l'homme, la hauteur des cibles ou enjeux potentiels est prise égale à :

- 1,5 m de hauteur (= stature moyenne d'une personne située au sol, c'est-à-dire à la même altitude que le site industriel à l'origine du risque) ;
- la hauteur des bâtiments abritant des tiers, présents à proximité du site (immeubles, habitations sur colline proche, ...).

Dans tous les cas, les graphes donnant les coupes des effets en fonction de la distance jusqu'à 30 m de hauteur sont jointes avec les résultats des simulations.

**Pour les effets sur les structures** liés au rayonnement thermique en cas d'incendie, la hauteur de la cible est prise à la  $\frac{1}{2}$  hauteur des flammes sans dépasser la hauteur des structures susceptibles d'être exposées au flux thermique.

## 6 MODELES DE CALCUL

### 6.1 Logiciel de modélisation

Les calculs de dispersions atmosphériques de gaz, les jets enflammés et les UVCE sont réalisés à l'aide du logiciel PHAST 8.4.

Le paramétrage de PHAST est fait conformément au « Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation du logiciel PHAST à l'usage des industriels de l'industrie chimique » – UIC – DT 102 – Septembre 2012.

Pour modéliser les autres phénomènes dangereux, les outils utilisés sont essentiellement des feuilles de calcul reprenant les modèles reconnus, en vigueur

### 6.2 Débit de fuite en cas de rupture ou brèche sur un équipement ou une tuyauterie

Le débit à la brèche est :

- soit déterminé par le logiciel PHAST, compte tenu des conditions de pression et de température du fluide à la brèche, de la section de la brèche (prise en compte des pertes de charges) ;
- soit pris égal au débit imposé et limité par le process (compresseur ou pompe en amont de la brèche). Si le débit est imposé par une pompe ou un compresseur centrifuge, à défaut de connaître la courbe débit-pression, on prendra 1,5 fois le débit de service.

La longueur de la tuyauterie (lieu de la brèche) est prise de 1 m (ou x m si la rupture se produit à un endroit bien spécifique).

### 6.3 Direction et hauteur de la fuite

La direction du rejet est prise horizontale dans les autres cas (dimensionnant par rapport à la direction verticale).

La hauteur du rejet est prise :

- 1 m en cas de fuite sur un équipement au sol ;
- à la hauteur de l'équipement dans les autres cas.

### 6.4 Dispersion atmosphérique d'un gaz

La détermination des effets des phénomènes d'explosion retardée (UVCE / Flash fire) nécessite de modéliser la dispersion atmosphérique du rejet. Pour ce faire, le modèle de dispersion de PHAST est utilisé.

Les trois paramètres importants pour la phase de dispersion qu'intègre le logiciel PHAST sont :

- les conditions météorologiques ;
- les conditions orographiques (coefficient de rugosité du terrain uniforme) ;
- un facteur correctif de dispersion du nuage (averaging time).

#### Conditions météorologiques :

Les conditions météorologiques régissent la cinétique de la phase gaz après la phase de rejet.

Elles sont définies par une classe de stabilité (classe de Pasquill), la vitesse de vent à 10 mètres de hauteur et la température ambiante.



Conformément à la fiche n°2 de la circulaire du 10 mai 2010 (« La Dispersion atmosphérique), les conditions météorologiques considérées sont les suivantes :

Typologie de rejet	Stabilité atmosphérique	Vitesses de vent considérées à 10 m de hauteur (m/s)	Température ambiante (°C)
Rejet horizontal ou au niveau du sol	D (neutre)	5	20
	F (très stable)	3	15

Quelles que soient les conditions atmosphériques, l'humidité relative de l'air est considérée égale à 70%.

### **Conditions orographiques :**

Les conditions orographiques représentent l'état de rugosité du terrain environnant les installations étudiées. Elles sont traduites de la même manière qu'un coefficient de frottement du nuage sur le sol produisant deux effets antagonistes :

- elle augmente la turbulence favorisant la dilution ;
- elle freine le nuage, ce qui favorise l'effet d'accumulation et la concentration.

La rugosité varie selon le type d'environnement.

En pratique, en accord avec les pratiques en vigueur (guide DT102), une rugosité de 1 mètre est choisie dans le logiciel PHAST. Elle traduit un environnement du type zone industrielle. Toutefois, cette valeur peut être à modifier, par exemple si l'environnement du site est de type rural.

### **« Averaging time » et « core averaging time » ou durée de moyennage du nuage :**

Dans le logiciel PHAST, il existe deux paramètres distincts pour le temps de moyennage : l'averaging time et le core averaging time. Ces deux paramètres n'interviennent que dans la phase de dispersion passive.

L'averaging time correspond à une correction numérique des concentrations moyennes calculées sur l'axe du nuage en fonction de la durée effective d'observation du nuage (= durée d'exposition pour les toxiques), afin de tenir compte en particulier des fluctuations réelles de direction du vent autour de sa direction moyenne pendant la durée d'observation. Il est à noter que cette correction n'intervient que dans la phase de dispersion passive (emploi d'un modèle gaussien).

La valeur du core averaging time est utilisée lors du calcul de la dispersion du nuage, tandis que la valeur de l'averaging time est utilisée uniquement lors de la phase de post-traitement, pour certains résultats.

Le choix de l'averaging time (ou durée de moyennage du nuage) dans les logiciels faisant appel à des modèles de type gaussien peut impacter significativement les distances d'effet.

L'averaging time et le core averaging time sont fixés à la même valeur. Pour les rejets inflammables, cette valeur est de 18,75 secondes. Pour les rejets toxiques, cette valeur est égale à la durée d'exposition de la cible, elle-même prise égale à la durée du rejet pour les rejets de longue durée.

## 6.5 Feu torche (ou jet enflammé)

Le feu torche, ou jet enflammé, correspond à l'inflammation immédiate, sous l'action d'une source d'allumage, d'un jet de gaz ou de liquide inflammable sous pression, dans un environnement libre (non confiné).

Le feu torche, ou jet enflammé, prend naissance sous forme d'une flamme de diffusion, lorsqu'un jet liquide ou gazeux issu d'une fuite accidentelle s'enflamme, par l'intermédiaire d'une source d'inflammation quelconque (par exemple, une surface chaude). La fuite enflammée ou feu torche est un phénomène dangereux qui se caractérise par la présence d'une flamme conique de grande taille dont l'origine se situe au niveau d'une fuite de substance combustible.

Pour modéliser les effets thermiques de la feu torche, le modèle de Shell (modèles de Chamberlain (1987), Cook (1990) et Johnson (1994)), validé par des essais à grande échelle, est retenu.

Les calculs sont réalisés avec le logiciel PHAST.

## 6.6 Explosion non confinée (UVCE / Flash fire)

L'ignition retardée d'un jet de gaz inflammable génère :

- des effets de surpression (UVCE, Unconfined Vapour Cloud Explosion) ;
- des effets thermiques (Flash fire ou feu de nuage).

De manière générale, le terme UVCE s'applique lorsque des effets de pression sont observés, alors que le terme flash-fire est réservé aux situations où la combustion du nuage ne produit pas d'effets de pression. Cependant il s'agit dans les deux cas du même phénomène physique, à savoir la combustion d'un mélange gazeux inflammable.

### Calcul des distances aux effets thermiques :

Conformément à la fiche n°3 de la circulaire du 10 mai 2010 les effets thermiques du Flash fire (ou feu de nuage) sont définis comme suit :

- distance au seuil des effets létaux significatifs = distance à la LIE
- distance au seuil des effets létaux = distance à la LIE
- distance au seuil des effets irréversibles = 1,1 x distance à la LIE

### Calcul des distances aux effets de surpression :

Les distances sont calculées avec le logiciel PHAST en utilisant la méthode multi-énergie (TNO « Yellow Book »). Cette méthode nécessite de déterminer un indice de sévérité.

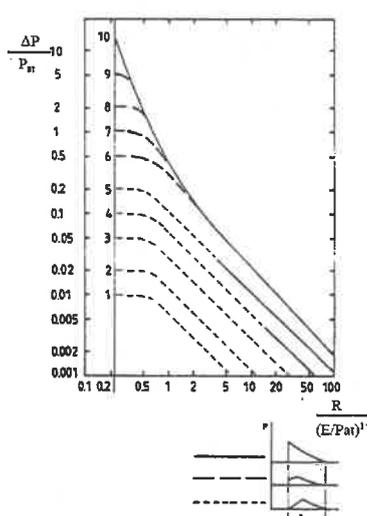
L'indice de sévérité d'explosion est compris entre 1 et 10.

Les indices 2 à 7 sont représentatifs de déflagrations et les indices 8, 9 et 10 caractérisent les détonations en champ libre.

Le tableau de Kinsella présenté ci-après permet d'orienter le choix de l'indice de sévérité de l'explosion étudiée.

Inflammation		Encombrement			Confinement		Classe / Sévérité
Basse	Haute	Haut	Bas	Aucun	Oui	Non	
	X	X			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
	X		X		X		5-7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X		X	4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

A chaque indice de sévérité d'explosion correspond une surpression maximale ( $\Delta P_{max}$ ) (cf. abaques multi-énergie ci-dessous).

Indice Multi-Energie	Seuil de surpression associé (bar)	Abaques de décroissance en fonction de la distance adimensionnée par l'énergie de l'explosion
1	0,01	 <p>Abaque relatif à la méthode Multi-Energie donnant les surpressions engendrées par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosibles hémisphériques posés au sol</p>
2	0,02	
3	0,05	
4	0,1	
5	0,2	
6	0,5	
7	1	
8	2	
9	5	
10	10	

Les abaques multi-énergie ont été établis sur la base de résultats de simulations numériques d'explosions de charges hémisphériques de gaz (typiques d'un mélange hydrocarbure – air) à vitesse de flamme constante. Ils donnent la distance réduite  $\bar{R}$ , en fonction de la surpression, à partir de

laquelle on déduit la distance d'effet R mesurée à partir du centre du nuage, du pic de pression considéré :

$$R = \bar{R} \left( \frac{Ex}{Pa} \right)^{1/3}$$

avec :

R : distance d'effet, observée à partir du centre du nuage, en fonction de la surpression (m)

$\bar{R}$  : distance réduite (m)

Pa : pression atmosphérique (Pa)

Ex : énergie d'explosion (J) –  $Ex = \Delta Hc \times Vg$

$\Delta Hc$  est la chaleur de combustion à la stœchiométrie ( $J/m^3$ ) = 3,5 MJ/m<sup>3</sup> pour les hydrocarbures.

Vg est le volume du nuage gazeux à la stœchiométrie (m<sup>3</sup>).

$Vg = \frac{\text{Masse inf lammable}}{\rho_g \times C_{\text{stoechio}}}$  où Masse inflammable est la masse de gaz ou de vapeur inflammable en concentration supérieure à la LIE

Les distances R sont calculées avec le logiciel PHAST.

**A noter :** Dans le cas des nuages dérivant en champ libre, le nuage peut s'enflammer à différentes distances de sa source d'émission et conduire à des distances d'effets plus ou moins grandes, en fonction de la taille du nuage et sa distance par rapport aux cibles potentielles, au point d'ignition considéré. Dans ce cas, le logiciel PHAST utilisé, et présenté ci-dessous, considère un ensemble de position pour l'allumage du nuage, tout au long de sa dispersion, et retient la position de la source d'ignition conduisant aux distances d'effets les plus grandes. Le centre de l'explosion est pris au centre du nuage.

## 6.7 Explosion confinée (VCE) dans un local

Pour modéliser les effets de surpression en cas de formation d'une atmosphère explosive (ATEX) dans une enceinte ou un local, et l'inflammation de cette ATEX, aussi appelé VCE : Vapor Cloud Explosion, plusieurs méthodes existent. Ces méthodes diffèrent selon les dispositions constructives de l'enceinte où se produit l'explosion. En effet, en fonction des caractéristiques dimensionnelles et mécaniques de la structure, le bâtiment va pouvoir encaisser ou non la surpression.

**Nota :** Les effets thermiques d'une explosion confinée sont mineurs par rapport aux effets de surpression. Par conséquent, seuls les effets de surpression sont modélisés.

Dans le cas des containers utilisés dans les installations AROL, compte tenu des importantes modifications apportées aux containers et en l'absence d'évents ou de surfaces soufflables, on considère :

- Une explosion primaire dans le conteneur avec la méthode Bode-ME10 en considérant les pressions de rupture suivante :
  - Pour un conteneur 20 pieds, Prupture dynamique = 0,542 bar
  - Pour un conteneur 40 pieds, Prupture dynamique = 0,325 bar
- Une explosion secondaire avec 90% du volume et en utilisant la méthode multi-énergie (voir 6.6) et l'indice multi-énergie 5.



Les pressions de rupture statique des containers sont déterminées, sur base des charges uniformes admissibles par les containers définis par le Code de bonnes pratiques OMI/OIT/GEE-ONU pour le chargement des cargaisons dans des engins de transport (dit Code CTU), des dimensions des containers et des hypothèses usuelles relatives aux explosions confinées [R6][R8].

### **Méthode de Brode / Multi énergie 10 :**

La démarche de calcul consiste :

- à calculer l'énergie d'explosion à l'aide du modèle de Brode ;
- à déterminer les distances d'effets des surpressions seuils à partir de l'abaque indice 10 de la méthode multi énergie représentatif de la propagation d'une onde de choc liée à l'éclatement de l'enceinte.

### **Formule de Brode :**

La formule de Brode permettant d'évaluer l'énergie d'explosion est la suivante :

$$Ex = \Delta P \cdot V / (\gamma - 1)$$

avec :

Ex : énergie d'explosion (J)

V : volume du local (m<sup>3</sup>)

$\Delta P$  : pression de rupture ou d'explosion relative =  $P_{ex} - P_a$  (Pa)

$\gamma$  : rapport des capacités calorifiques du gaz (sans unité)

( $\gamma = 1,3$  pour le méthane ;  $1,10$  pour le butane ;  $1,07$  pour le propane ;  $= 1,41$  pour l'hydrogène ;  $= 1,149$  pour l'éthanol (source PHAST) ;  $= 1,314$  pour la plupart des hydrocarbures)

### **Surpression en fonction de la distance selon l'abaque multi énergie 10 :**

Les formules correspondant au profil de la courbe multi énergie indice 10 sont données ci-dessous ([R6]) :

Seuil de surpression (mbar)	Formule pour déterminer la distance au seuil d'effet recherché
20 mbar (seuil des effets indirects)	$d_{20} = 0,22 \times E^{(1/3)}$
50 mbar (SEI)	$d_{50} = 0,11 \times E^{(1/3)}$
140 mbar (SPEL)	$d_{140} = 0,05 \times E^{(1/3)}$
200 mbar (SELS et effets dominos)	$d_{200} = 0,032 \times E^{(1/3)}$
300 mbar	$d_{300} = 0,028 \times E^{(1/3)}$

Distances comptées à partir du centre de l'explosion.

E = énergie d'explosion en Joules.

Cette approche est conservatrice car elle considère que tout le volume est occupé par un nuage gaz ou de vapeur inflammable en concentration explosible.

## 7 MODELISATION DE L'EXPLOSION DU CONTAINER EPURATION

### 7.1 Phénomène dangereux modélisé

Nous considérons le scénario de fuite de biogaz dans le local process du container épuration, la formation d'une ATEX puis l'explosion du nuage entraînant la rupture mécanique du container puis l'explosion du nuage

- Données – Hypothèses de calcul

<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	44 m <sup>3</sup> 7,4 m x 2,3 m x 2,6 m On néglige les équipements présents dans le container
<b>Pression de rupture (bar)</b>	0,325 Rupture dynamique pour un container 40 pieds
<b>Rapport des capacités calorifiques du gaz <math>\gamma</math></b>	1.3 (Méthane)
<b>Chaleur de combustion stœchiométrique (J/m<sup>3</sup>)</b>	3.23.10 <sup>6</sup>
<b>Indice multi-énergie</b>	5

**Seuils d'effets :** cf §5.1 pour les seuils d'effet de surpression.

**Méthode de calcul :** cf §6.7 pour la modélisation des explosions confinées dans un local.

### 7.2 Résultats

#### **Distances des effets de surpression de l'explosion primaire :**

La pression de rupture dynamique est prise égale 325 mbar soit une énergie d'explosion de (calculée avec la formule de Brode) de 4.8 MJ.

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets indirects 20 mbar</b>	37
<b>Effets irréversibles 50 mbar</b>	19
<b>Premiers effets létaux 140 mbar</b>	8
<b>Effets létaux significatifs / Effets domino 200 mbar</b>	5

*Distances comptées à partir du centre du local process du container épuration*

#### **Distances des effets de surpression de l'explosion secondaire :**

L'énergie du mélange air + méthane à la stœchiométrie est de 3,23 MJ/m<sup>3</sup>. L'énergie d'explosion du nuage air-méthane à la stœchiométrie, de volume égal à 90% du volume libre du local, est donc de 94 MJ.

L'indice multi-énergie choisie pour l'explosion secondaire est 5.

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets indirects 20 mbar</b>	46
<b>Effets irréversibles 50 mbar</b>	23
<b>Premiers effets létaux 140 mbar</b>	8
<b>Effets létaux significatifs 200 mbar</b>	5

*Distances comptées à partir du centre du container.*

#### **8.4 Conclusion**

Le seuil des effets domino (200 mbar) est atteint à 5 m à compter du centre du container.

Notons que le seuil des dommages graves sur les structures (140 mbar) est atteint à 8 m à compter du centre du container.

## 9 MODELISATION D'UNE FUITE DE BIOGAZ EN AVAL DU COMPRESSEUR

Nous considérons le scénario de rupture guillotine de la tuyauterie en aval du compresseur conduisant à :

- Un jet enflammé (effets thermique) ;
- Un flash-fire/UVCE (effets thermiques et de surpression).

### 9.1 Données – Hypothèses de calcul

<b>Masse considérée</b>	Non limitée
<b>Pression opératoire</b>	16 barg
<b>Température</b>	20 °C
<b>Substance</b>	Biogaz (65 % méthane, 35 % CO <sub>2</sub> )
<b>Diamètre</b>	25 mm
<b>Débit limité</b>	768 Nm <sup>3</sup> /h soit 0,246 kg/s
<b>Indice multi-énergie</b>	5
<b>Hauteur</b>	1 m

**Note indice Multi-énergie** : Encombrement modéré, sans confinement et avec une source d'ignition courante.

**Seuils d'effets** : cf §5.1 pour les seuils d'effet de surpression et §5.2 pour les seuils d'effets thermiques ;

**Méthode de calcul** : cf §6.5 pour le calcul du jet enflammé et §6.6 pour le flash-fire/UVCE.

### 9.2 Résultats

**Distance des effets thermiques du jet enflammé :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets irréversibles</b> 3 kW/m <sup>2</sup>	4
<b>Premiers effets létaux</b> 5 kW/m <sup>2</sup>	4
<b>Effets létaux significatifs et effets domino</b> 8 kW/m <sup>2</sup>	Non atteint

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*



**Distance des effets thermiques du flash-fire :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets irréversibles 1,1 x LIE</b>	1,7
<b>Effets létaux / létaux significatifs LIE</b>	1,6

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*

**Distance des effets de surpression de l'UVCE :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets indirects 20 mbar</b>	5
<b>Effets irréversibles 50 mbar</b>	2
<b>Premiers effets létaux 140 mbar</b>	1
<b>Effets létaux significatifs 200 mbar</b>	1

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*

### 9.3 Conclusion

Le seuil des effets domino (200 mbar) est atteint à proximité immédiate de la tuyauterie (1 m).

## 10 MODELISATION D'UNE FUITE DE METHANE SUR LA TUYAUTERIE D'ALIMENTATION DE LA CHAUDIERE

Nous considérons le scénario de rupture guillotine de la tuyauterie alimentant la chaudière et conduisant à :

- Un jet enflammé (effets thermique) ;
- Un flash-fire/UVCE (effets thermiques et de surpression).

### 10.1 Données – Hypothèses de calcul

<b>Masse considérée</b>	Non limité
<b>Pression opératoire</b>	0,2 barg
<b>Température</b>	20 °C
<b>Substance</b>	Biogaz (65 % méthane, 35 % CO <sub>2</sub> )
<b>Diamètre</b>	32 mm
<b>Débit limité</b>	400 Nm <sup>3</sup> /h soit 0,095 kg/s Notons que le débit de fuite ne dépasse ce débit limite.
<b>Indice multi-énergie</b>	5
<b>Hauteur</b>	1 m

**Note indice Multi-énergie :** Encombrement modéré, sans confinement et avec une source d'ignition courante.

**Seuils d'effets :** cf §5.1 pour les seuils d'effet de surpression et §5.2 pour les seuils d'effets thermiques ;

**Méthode de calcul :** cf §6.5 pour le calcul du jet enflammé et §6.6 pour le flash-fire/UVCE.

### 10.2 Résultats

**Distance des effets thermiques du jet enflammé :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets irréversibles</b> 3 kW/m <sup>2</sup>	4
<b>Premiers effets létaux</b> 5 kW/m <sup>2</sup>	4
<b>Effets létaux significatifs et effets domino</b> 8 kW/m <sup>2</sup>	4

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*



**Distance des effets thermiques du flash-fire :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets irréversibles 1,1 x LIE</b>	1,9
<b>Effets létaux / létaux significatifs LIE</b>	1,7

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*

**Distance des effets de surpression de l'UVCE :**

	Distance d'effet (en m)
<b>Effets indirects 20 mbar</b>	11
<b>Effets irréversibles 50 mbar</b>	4
<b>Premiers effets létaux 140 mbar</b>	2
<b>Effets létaux significatifs 200 mbar</b>	1

*Distances comptées à partir de la tuyauterie*

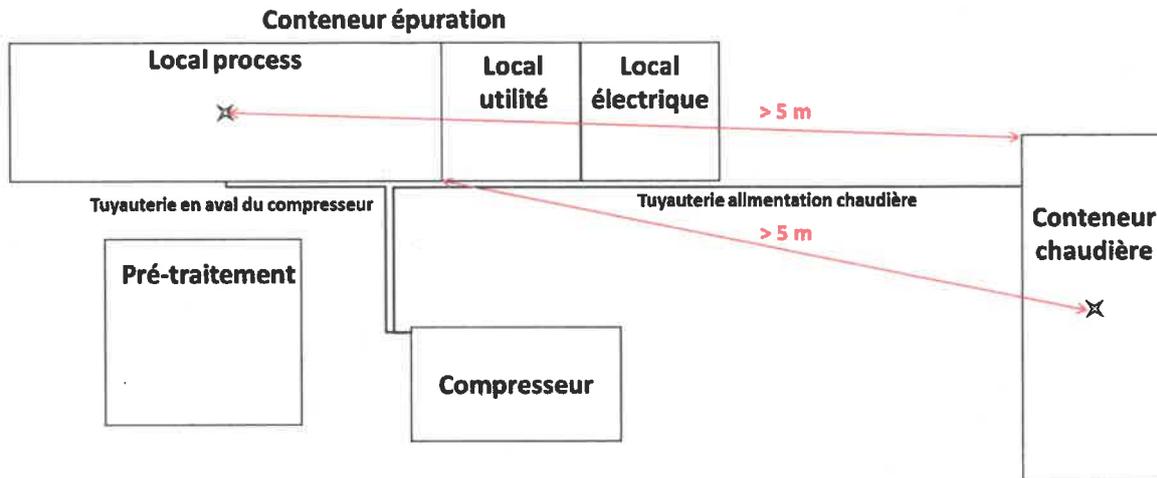
### 10.3 Conclusion

Le seuil des effets domino associés aux effets de surpression (200 mbar) sont limité à l'environnement immédiat de la conduite (1 m).

Le seuil des effets domino associés aux effets thermiques est atteint à 4 m de la tuyauterie.

## 11 CONCLUSION

Les installations du local process d'épuration et du container chaufferie sont susceptibles de générer des effets domino (200 mbar) l'un envers l'autre s'ils sont distants **de moins de 5 m** (distance comptée depuis le centre de équipement source à la bordure de l'équipement cible).



Notons qu'ils sont susceptibles de causer des dommages majeurs l'un envers l'autre s'ils sont distants de moins de 8 m.

La conduite de biogaz en aval du compresseur ne présente pas de risque significatif envers les équipements.

La conduite de biogaz alimentant la chaudière est susceptible de causer des effets thermiques jusqu'à 4 m dans le sens du jet enflammé.

Les mesures de maîtrise des risques pouvant permettre de réduire la gravité des scénarios dans le cas où ceux-ci seraient inacceptable selon l'environnement d'implantation des équipements sont :

- Pour les containers chaudière et process, la mise en place de détecteur de gaz inflammable contrôlant les vannes de coupures d'alimentation en biogaz (généralement après un seuil d'alarme) ;
- Pour la chaudière, coupures d'alimentation en biogaz en cas de non détection de flamme.
- Pour la tuyauterie, la mise en place de pressostat contrôlant les vannes de coupures d'alimentation en biogaz en cas de chute brutale de pression ;
- De manière préventive, sur les tuyauteries (mais aussi sur les autres équipements), un contrôle périodique semble également pertinent.

Ces recommandations sont naturellement à moduler en fonction de chaque implantation.