



INGEA INGENIERIE

Etude de phénomènes dangereux sur un site agro-alimentaire

Rapport de calculs

Historique des révisions				
VERSION	DATE	COMMENTAIRES	Rédigé par	Vérifié par
B	Septembre 2024	Ajout d'explications complémentaires concernant l'explosion à l'intérieur de la torchère (paragraphe 5.3)	M. VACHON	Y. SERAL
A	Juillet 2024	Création de document	M. VACHON	Y. SERAL

Client : INGEA Ingénierie
Projet : Etude de phénomènes dangereux sur un site agro-alimentaire
Objet : Rapport de calculs

Référence document : N2400219-252-DE001-B
En date du : 13/09/2024

Approuvé par	VACHON Marc	Chef de Projet Maîtrise des Risques Industriels	
Vérifié par	SERAL Yann	Chef de Projet Maîtrise des Risques Industriels	
Rédigé par	VACHON Marc	Chef de Projet Maîtrise des Risques Industriels	
	Nom et Prénom	Fonction	Visa

Table des matières

1	CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT	4
2	DOCUMENTS DE REFERENCE	5
3	DONNEES ET HYPOTHESES DE CALCUL	6
3.1	Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel	6
3.2	Explosion du ciel gazeux du digesteur.....	7
3.3	Explosion au niveau de la torchère.....	7
4	METHODES DE CALCUL MISES EN ŒUVRE	8
4.1	Seuils d'effets retenus.....	8
4.1.1	Seuils des effets thermiques d'un feu de jet	8
4.1.2	Seuils des effets thermiques d'un feu flash	8
4.1.3	Seuils des effets de surpression	9
4.2	Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel	9
4.3	Explosion du ciel gazeux du digesteur.....	10
4.3.1	Calcul de l'énergie mise en jeu	10
4.3.2	Calcul des distances d'effets de surpression.....	10
4.4	Explosion au niveau de la torchère.....	10
5	RESULTATS OBTENUS	11
5.1	Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel	11
5.1.1	Rupture franche	11
5.1.2	Petite fuite	12
5.2	Explosion du ciel gazeux du digesteur.....	13
5.3	Explosion au niveau de la torchère.....	14
6	RECAPITULATIF DES DISTANCES D'EFFETS	15

1 CONTEXTE ET OBJET DU DOCUMENT

INGEA Ingénierie établit un dossier réglementaire pour un site agro-alimentaire (usine de production de pommes de terre frites). Ce site est alimenté en gaz naturel pour ses besoins de production d'énergie et dispose également d'un procédé de fabrication de biogaz (digesteur UASB¹).

Dans ce cadre, INGEA Ingénierie a sollicité NALDEO Technologies & Industries (NTI) pour évaluer les effets associés à diverses situations accidentelles :

- Perte de confinement (rupture franche ou brèche) sur la ligne d'alimentation en gaz naturel,
- Explosion du ciel gazeux du digesteur,
- Explosion au niveau de la torchère de biogaz.

¹ Upflow Anaerobic Sludge Blanket ou Digesteur Anaérobie à Flux Ascendant

2 DOCUMENTS DE REFERENCE

[DR.01]	INERIS Vers une méthanisation propre, sûre et durable Recueil de bonnes pratiques en méthanisation agricole	Rapport n°17-163622-11458A (février 2018)
[DR.02]	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	NOR : DEVP0540371A
[DR.03]	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	NOR : DEVP1013761C
[DR.04]	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	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (2008)

3 DONNEES ET HYPOTHESES DE CALCUL

3.1 Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel

Les données prises en compte sont les suivantes :

Diamètre de la canalisation	250 mm
Hauteur de rejet	1 m
Diamètre de fuite	250 mm (rupture franche) 25 mm (petite fuite)
Direction du rejet	Horizontale
Pression de service	4 bar relatifs (barg)

Tableau 1 – Données relatives à la perte de confinement de la ligne de gaz naturel

En prenant en compte une vitesse de l'ordre de 5 m/s dans la canalisation, le débit atteint 1 kg/s (puissance thermique de 40 MW). **Cette valeur est retenue pour évaluer les conséquences d'une rupture franche.**

Pour ce qui concerne la petite fuite, la pression de 4 barg est supposée maintenue en amont de l'orifice.

Les phénomènes dangereux envisagés sont :

- Le feu de jet (effets thermiques),
- L'explosion non confinée (Unconfined Vapour Cloud Explosion ou UVCE avec effets thermiques et de surpression).

3.2 Explosion du ciel gazeux du digesteur

Les parois et la toiture du digesteur sont en béton. Ses caractéristiques sont les suivantes.

Volume total du digesteur	4 247 m ³
Diamètre	26 m
Hauteur	8 m
Hauteur du lit d'effluents liquides	7 m
Pression de service	10-20 mbar
Température de service	30-35 °C
Composition attendue du biogaz produit	70% CH ₄ & 30 % CO ₂

Tableau 2 – Données relatives au digesteur

Il est fait l'hypothèse d'une entrée d'air dans le ciel gazeux. En présence d'une source d'inflammation, le mélange biogaz-air exploserait.

L'ordre de grandeur de la pression de tenue des parois est fixée à 0,4 barg ; pour une coque cylindrique en béton, cela correspond à une épaisseur de l'ordre de 15 à 20 cm. **Afin d'éviter les projections, la toiture du digesteur est supposée équipée de surfaces faibles [DR.01] permettant de maintenir la pression résiduelle interne à 0,1 barg en cas d'explosion.**

3.3 Explosion au niveau de la torchère

La torchère est utilisée pour brûler les excédents de biogaz.

Sur défaut d'allumage, du biogaz s'accumulerait dans le fût en se mélangeant avec l'air, ce qui conduirait à une explosion (effets de surpression).

Les caractéristiques de la torchère sont les suivantes.

Diamètre du fût	2,5 m
Hauteur de rejet des gaz brûlés	8 m
Hauteur du fût	6,5 m
Débit maximal de gaz	800 Nm ³ /h

Tableau 3 – Données relatives à la torchère

4 METHODES DE CALCUL MISES EN ŒUVRE

4.1 Seuils d'effets retenus

Les seuils d'effets retenus pour les phénomènes dangereux sont rappelés dans le présent paragraphe.

4.1.1 Seuils des effets thermiques d'un feu de jet

Les seuils des effets thermiques d'un feu de jet sont les suivants :

Seuil	Définition
Seuil des Effets Irréversibles (SEI) Flux thermique 3 kW/m ²	Dangers significatifs pour la vie humaine
Seuil des Premiers Effets Létaux (SPEL) Flux thermique 5 kW/m ²	Seuil des destructions de vitres significatives Dangers graves pour la vie humaine (1% de mortalité)
Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) Flux thermique 8 kW/m ²	Seuil des effets domino et dégâts graves sur les structures Dangers très graves pour la vie humaine

Tableau 4 - Seuils des effets thermiques

4.1.2 Seuils des effets thermiques d'un feu flash

Un feu flash correspond à la combustion rapide d'un mélange de gaz et d'air. Les distances d'effets sont définies par :

- Distance aux effets irréversibles égale à 1,1 fois la distance à la concentration limite inférieure d'inflammabilité (LII),
- Distance aux effets létaux égale à la distance à la concentration LII.

4.1.3 Seuils des effets de surpression

Les seuils des effets de surpression associés à une explosion ou un éclatement sont précisés ci-dessous :

Seuil	Définition
Seuil des Effets Indirects Surpression 20 mbar	Seuil des destructions significatives de vitres Effets indirects par bris de vitre sur l'homme
Seuil des Effets Irréversibles (SEI) Surpression 50 mbar	<u>Effets sur les structures :</u> Seuil des dégâts légers sur les structures <u>Effets sur l'homme :</u> Seuil des Effets Irréversibles : dangers significatifs pour la vie humaine
Seuil des Premiers Effets Létaux (SPEL) Surpression 140 mbar	<u>Effets sur les structures :</u> Seuil des dégâts graves sur les structures <u>Effets sur l'homme :</u> Seuil des Effets Létaux à 1% : dangers graves pour la vie humaine
Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) Surpression 200 mbar	<u>Effets sur les structures :</u> Seuil des effets domino <u>Effets sur l'homme :</u> Seuil des Effets Létaux à 5% : dangers très graves pour la vie humaine

Tableau 5 - Seuils des effets de surpression

4.2 Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel

Le calcul de la dispersion de gaz est effectué à l'aide du logiciel PHAST® version 8. Le gaz naturel est assimilé au méthane.

Les conditions atmosphériques retenues pour la dispersion sont les conditions 3F et 5D.

	Conditions 3F	Conditions 5D
Classe de stabilité	F (stable)	D (neutre)
Vitesse du vent	3 m/s	5 m/s
Température ambiante	15°C	20°C
Température du sol	15°C	20°C
Humidité relative de l'air	70%	70%

Tableau 6 - Détails des conditions atmosphériques 3F et 5D

Le modèle de feu de jet (Cone Model ou API) est sélectionné de façon à obtenir un pouvoir émissif physiquement acceptable (de l'ordre de la centaine à plusieurs centaines de kW/m²).

Le modèle d'explosion pris en compte est le modèle multi-énergies. La force d'explosion choisie est la force 5, le nuage pouvant se disperser dans des zones modérément encombrées.

4.3 Explosion du ciel gazeux du digesteur

Le modèle mis en œuvre est celui précisé dans le guide silo [DR.04].

4.3.1 Calcul de l'énergie mise en jeu

L'énergie mise en jeu est évaluée par la relation de BRODE :

$$E = \Delta p V / (\gamma - 1)$$

Δp : différence entre la pression d'explosion et la pression atmosphérique (Pa)

V : volume de l'enceinte (m³)

γ : rapport des chaleurs massiques du mélange air-gaz (fixé à 1,314)

En l'occurrence la toiture du digesteur est supposée disposer d'une surface d'évent suffisante pour que la pression résiduelle maximale n'excède pas 100 mbar relatifs (voir paragraphe 3.2) ; par conséquent $\Delta p = 10\,000$ Pa.

4.3.2 Calcul des distances d'effets de surpression

Connaissant l'énergie mise en jeu, le calcul des effets de surpression est basé sur la méthode multi-énergies.

Valeurs de référence relatives aux seuils d'effets de surpression	Définition
20 mbar	0,22 (E) ^{1/3} (2 fois la distance à 50 mbar)
50 mbar	0,11 (E) ^{1/3}
140 mbar	0,05 (E) ^{1/3}
200 mbar	0,032 (E) ^{1/3}

Tableau 7 - Distance des effets de surpression suivant la méthode multi-énergie indice 10

Les effets sont fonction de la surpression maximale. Ainsi, pour une surpression maximale de 100 mbar, seuls les effets à 50 mbar et 20 mbar sont à caractériser.

4.4 Explosion au niveau de la torchère

Il est fait l'hypothèse d'une accumulation de biogaz à la LII dans le volume du fût de la torchère. Les distances d'effets sont évaluées à l'aide de la méthode multi-énergies. Le volume étant ouvert et peu résistant à la surpression, une force d'explosion de 4 est retenue.

5 RESULTATS OBTENUS

5.1 Perte de confinement sur la ligne d'alimentation en gaz naturel

Les distances d'effets liées à cette situation accidentelle sont reportées ci-après.

5.1.1 Rupture franche

Feu de jet (effets thermiques)

Le feu de jet est caractérisé à l'aide du modèle API.

Débit de gaz	1 kg/s
Pouvoir émissif de la flamme	218 kW/m ²
Longueur de la flamme	16 m
Seuil d'effets	Distances
3 kW/m ² - SEI	23 m
5 kW/m ² - SPEL	19 m
8 kW/m ² - SELS	18 m

Tableau 8 – Rupture franche de la canalisation de gaz – Effets thermiques du feu de jet

UVCE (effets de surpression)

Condition atmosphérique	3F	5D
Masse de gaz accumulée	0,95 kg	0,55 kg
Force de l'explosion	5	
Seuil d'effets	Distances	
	3F	5D
20 mbar – Effets indirects par bris de vitres	41 m	34 m
50 mbar – SEI	23 m	19 m
140 mbar - SPEL	11 m	9 m
200 mbar - SELS	9 m	7 m

Tableau 9 – Rupture franche de la canalisation de gaz – Effets de surpression de l'UVCE

Feu flash (effets thermiques)

Condition atmosphérique	3F	5D
Distance à la LII	9 m	8 m
Seuil d'effets	Distances	
	3F	5D
SEI	10 m	9 m
SPEL	9 m	8 m
SELS	9 m	8 m

Tableau 10 – Rupture franche de la canalisation de gaz – Effets thermiques du feu flash

5.1.2 Petite fuite

Feu de jet (effets thermiques)

Le feu de jet est caractérisé à l'aide du modèle API.

Débit de gaz	0,36 kg/s
Pouvoir émissif de la flamme	98 kW/m ²
Longueur de la flamme	10 m
Seuil d'effets	Distances
3 kW/m ² - SEI	12 m
5 kW/m ² - SPEL	11 m
8 kW/m ² - SELS	11 m

Tableau 11 – Petite fuite sur la canalisation de gaz – Effets thermiques du feu de jet

UVCE (effets de surpression)

Compte tenu de la faible quantité de gaz accumulée dans les limites d'inflammabilité (de l'ordre de 10 grammes), le risque d'effets de surpression n'est pas à prendre en compte.

Feu flash (effets thermiques)

Condition atmosphérique	3F	5D
Distance à la LII	5 m	4 m
Seuil d'effets	Distances	
	3F	5D
SEI	6 m	5 m
SPEL	5 m	4 m
SELS	5 m	4 m

Tableau 12 – Petite fuite sur la canalisation de gaz – Effets thermiques du feu flash

5.2 Explosion du ciel gazeux du digesteur

Avec volume de ciel gazeux de 372 m³, une surpression de 10 000 Pa et un rapport des chaleurs massiques du mélange air-biogaz de 1,314, l'énergie mise en jeu vaut 11,8 MJ. Les distances d'effets sont les suivantes :

Seuils d'effets	Distances
20 mbar – Effets indirects par bris de vitres	50 m
50 mbar – SEI	25 m
140 mbar - SPEL	Non Atteint
200 mbar - SELS	Non Atteint

Tableau 13 – Explosion du ciel gazeux du digesteur - Effets de surpression

5.3 Explosion au niveau de la torchère

Le volume du fût de la torchère est de 32 m³. Il est fait l'hypothèse que ce volume se trouve rempli d'un mélange en limite inférieure d'inflammabilité (6,3%). Dans ces conditions, le volume de biogaz accumulé est de 2 m³. La masse volumique du biogaz vaut 1 kg/m³. La masse de biogaz accumulée dans le volume fût atteint donc 2 kg. Les gaz n'étant pas réellement confinés du fait que le fût débouche à l'air libre, le calcul est effectué à l'aide du modèle multi-énergie disponible logiciel PHAST® en retenant une force 4 (voir paragraphe 4.4). Les distances d'effets obtenues sont récapitulées ci-dessous :

Seuil d'effet	Distance
20 mbar – Effets indirects par bris de vitres	22 m
50 mbar – SEI	11 m
140 mbar - SPEL	Non Atteint
200 mbar - SELS	Non Atteint

Tableau 14 – Explosion au niveau de la torchère - Effets de surpression

6 RECAPITULATIF DES DISTANCES D'EFFETS

Les distances d'effets maximales sont reportées ci-dessous.

Situation accidentelle	Phénomène dangereux	Type d'effet	Distance aux effets indirects	Distances aux effets irréversibles	Distances aux premiers effets létaux	Distance aux effets létaux significatifs
Rupture franche de la canalisation de gaz naturel	Feu de jet	Thermique	/	23 m	19 m	18 m
	UVCE	Surpression	41 m	23 m	11 m	9 m
	Feu flash	Thermique	/	10 m	9 m	9 m
Petite fuite sur la canalisation de gaz naturel	Feu de jet	Thermique	/	12 m	11 m	11 m
	UVCE	Surpression	Pas d'effets de surpression (quantité de gaz trop faible dans les limites d'inflammabilité)			
	Feu flash	Thermique	/	6 m	5 m	5 m
Explosion du ciel gazeux du digesteur	/	Surpression	50 m	25 m	Non Atteint	Non Atteint
Explosion de gaz au niveau de la torchère	/	Surpression	22 m	11 m	Non Atteint	Non Atteint

Tableau 15 – Récapitulatif des distances d'effets maximales