

RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRA-09-101660-12814A

18/01/2010

Scénarios accidentels et modélisation des distances d'effets associés pour des installations de méthanisation de taille agricole et industrielle

INERIS

Scénarios accidentels et modélisations des distances d'effets associés pour des installations de méthanisation de taille agricole et industrielle

Paris (La Défense)

Client : MEEDDM

Liste des personnes ayant participé à l'étude : S. EVANNO, J. DAUBECH, J. HEBRARD

PRÉAMBULE

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.


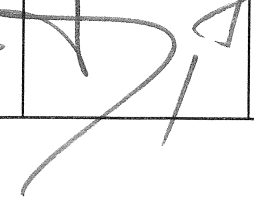
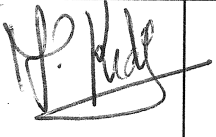

	Rédaction	Vérification	Vérification	Approbation
NOM	S. EVANNO	L. DUPONT	M. A. KORDEK	M. DEMISSY
Qualité	Responsable Etude et Recherche Pg DRA DRC 93 Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Procédés et Energies Propres et Sûrs Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui Administration Direction des Risques Accidentels	Chef de Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

1. GLOSSAIRE	5
2. INTRODUCTION	6
3. RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE ET AU BIOGAZ ET RETOUR D'EXPERIENCE	7
3.1 Rappel des risques liés au méthane	7
3.2 Rappel des risques liés au biogaz.....	7
3.3 Retour d'expérience sur des activités de méthanisation	10
4. EVALUATION DE L'INTENSITE DES POTENTIELS DE DANGERS ET DES PHENOMENES DANGEREUX	12
4.1 Seuils réglementaires.....	12
- Effets sur les personnes	13
- Effets sur les structures	14
4.2 Hypothèses et principes de modélisations	14
4.3 Résultats des calculs de modélisation.....	16
4.3.1 Rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'extérieur.....	17
4.3.1.1 Généralités sur les fuites d'une canalisation de biogaz située à l'extérieur.....	17
4.3.1.2 Résultats des calculs de modélisation de fuite de canalisation de biogaz à l'extérieur	18
4.3.1.2.1 Résultats des calculs de modélisation d'effets d'explosion	18
4.3.1.2.2 Résultats des calculs de modélisation d'effets thermiques	20
4.3.1.2.3 Résultats des calculs de modélisation d'effets toxiques.....	21
4.3.2 Explosion dans un local de compression de biogaz liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local (site industriel)	23
4.3.3 Explosion dans un local de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local	25
4.3.3.1 Résultats des calculs de modélisation pour un site industriel.....	25
4.3.3.2 Résultats des calculs de modélisation pour un site agricole (ou de taille semi industrielle)	26

4.3.4	Explosion dans un local de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de gaz de ville située à l'intérieur de ce local (site agricole ou de taille semi industrielle).....	27
4.3.5	Explosion dans un digesteur en fonctionnement normal et à vide	28
4.3.6	Explosion de l'ATEX interne dans un gazomètre.....	30
4.3.7	Explosion de l'ATEX formée suite à la ruine du gazomètre	30
5.	CONCLUSION	32
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	34
7.	LISTE DES ANNEXES	35

1. GLOSSAIRE

AFSSET : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail,

ATEX : ATmosphère Explosive,

DN : Diamètre Nominal,

DRA : Direction des Risques Accidentels,

DRC : Direction des Risques Chroniques,

H₂S : Hydrogène sulfuré,

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement,

Kg : Violence d'explosion de gaz,

LIE : Limite Inférieure d'Explosibilité,

LSE : Limite Supérieure d'Explosibilité,

m : mètre,

mésophile : Se dit d'un microorganisme qui peut vivre à des températures variant de 20 à 45 °C et dont le développement est optimal à 37 °C,

P : Pression,

P_{max} : Pression maximale d'une explosion (mesurée en chambre de 20 l selon la norme PR NF EN 15967),

MEEDDM : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer,

SEI : Seuil des Effets Irréversibles,

SEL : Seuil des Effets Létaux,

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs,

SEL 1% : Seuil des Effets Létaux 1 %,

SEL 5% : Seuil des Effets Létaux 5 %,

STEP : Station d'épuration,

Taux d'expansion : il s'agit d'un paramètre fondamental "intrinsèque" et ne dépend que de la composition du mélange. Il traduit la dilatation thermique et volumique des produits de combustion,

Thermophile : Microorganisme qui peut vivre à des températures variant de 40 à 70 °C et dont le développement est optimal à 55 °C.

Vitesse fondamentale de combustion laminaire : il s'agit d'une propriété intrinsèque du mélange et représente la vitesse de progression de la flamme par rapport au mélange,

VLE : Valeur Limite d'Exposition,

VME : Valeur Moyenne d'Exposition.

2. INTRODUCTION

En s'appuyant sur l'expertise transversale de la DRA et de la DRC, l'opération A du programme DRA – DRC 93 qui porte sur les risques liés aux procédés de méthanisation de la biomasse et des déchets, a notamment pour objectif de recenser et de produire des données de sécurité nécessaires à la maîtrise des risques d'explosion et des risques sanitaires des différents procédés de méthanisation.

Dans le cadre de projets d'implantation d'une unité de méthanisation, de production et de stockage de biogaz, il est intéressant de pouvoir estimer, dès les premières étapes de la conception, les principales conséquences accidentelles en fonction des installations envisagées afin de pouvoir sélectionner les emplacements des futures installations, les technologies à retenir et les principales contraintes de sécurité à prendre en compte. Ces données seront alors particulièrement utiles aux pouvoirs publics et aux industriels.

Pour cela, l'INERIS a réalisé des calculs de modélisation des distances d'effets (explosion et dispersion toxique) des scénarios majorants pour les principaux cas types rencontrés sur des sites de taille agricole et industrielle.

Les scénarios accidentels sont calqués sur trois équipements principaux mettant en œuvre du biogaz d'une unité de méthanisation : un digesteur (méthaniseur), un gazomètre (stockage de biogaz) et des canalisations de transfert de biogaz en aérien et dans des locaux.

La réglementation ICPE a été modifiée en 2009 par la parution du décret 2009-1341 le 31 octobre 2009 au Journal Officiel modifiant la nomenclature ICPE et ajoutant une nouvelle rubrique spécifique à la méthanisation (Rubrique ICPE n°2781 relative aux installations de méthanisation de déchets non dangereux ou matière végétale brute à l'exclusion des installations de stations d'épuration urbaines) : les arrêtés de déclaration et d'autorisation suivront cette parution.

Cette opération A du programme DRA – DRC 93 propose des distances d'effets (explosion, incendie, dispersion toxique) qui serviront d'aide à la décision pour de nombreux industriels ou les pouvoirs publics, d'où l'importance de bien définir les conditions d'apparition des types de scénarios accidentels retenus et les hypothèses prises en compte dans la modélisation.

3. RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE ET AU BIOGAZ ET RETOUR D'EXPERIENCE

3.1 RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE

Le méthane est un gaz extrêmement inflammable et non toxique.

Désignation	CAS	FDS	Symbole	Risques
Méthane (CH ₄)	74-82-8	/	F+ (Extrêmement inflammable)	R12
Caractéristiques				
Masse volumique à 20°C (kg/m ³)	0,7	Vitesse de propagation de flamme (m/s) en mode calme		0,39
Densité / air	0,54	LSE (% volume)		15
LIE (%volume)	4,4 à 5	Kg (bar.m.s ⁻¹)		55
Pmax (bar)	7,1	Energie Minimale d'Inflammation (mJ)		0,28
Température d'Auto-Inflammation (°C)	535 à 650	Pouvoir Calorifique Inférieur (kWh/m ³)		10,7 à 12,8

Tableau 1 : Principales caractéristiques du méthane

Une fuite sur une canalisation de méthane peut conduire à un feu-torche en cas d'inflammation immédiate.

En cas d'inflammation retardée, une explosion du nuage de gaz formé est possible.

3.2 RAPPEL DES RISQUES LIES AU BIOGAZ

La composition du biogaz et la structure de chaque installation (matériau, volume, forme,...) sont les principales variables d'ajustement sur le dimensionnement des distances d'effets. De plus, le confinement lié à la résistance de structure du type d'installation est notamment important car ce paramètre influe sur la violence d'une explosion [digesteur à enveloppe souple, à enveloppe rigide (structure béton), à enveloppe semi-rigide (structure métallique)].

Les compositions de plusieurs biogaz d'origines variées (agricole, ordure ménagère, boues de station d'épuration) sont présentées dans le tableau 2 ci-après. Trois types de biogaz ont été retenus selon leur provenance et selon le rapport de l'AFFSET [1]. La teneur en H₂S de chaque type de biogaz dépend principalement de l'origine de celui-ci (selon l'origine de la matière organique qui a été méthanisée et s'il s'agit de biogaz brut ou de biogaz épuré).

Type de biogaz	Teneur en CH ₄ (%)	Teneur en CO ₂ (%)	Teneur moyenne résiduelle en H ₂ S (ppm)
Biogaz issu de la méthanisation agricole 1A	80	20	8 000 (brut) < 100 (épuré)
1B	60	40	
Biogaz issu de la méthanisation d'ordures ménagères 2A	80	20	1 000 (brut) < 100 (épuré)
2B	60	40	
Biogaz issu de la méthanisation de boues de stations d'épuration 3A	80	20	2 500 (brut) < 100 (épuré)
3B	60	40	

Tableau 2 : Définition des six configurations de composition de biogaz brut et épuré retenues

Les principaux risques de ces différents types de biogaz sont liés à leurs principaux composants :

- Inflammabilité / explosibilité (méthane, hydrogène, sulfure d'hydrogène),
- Toxicité aigüe par inhalation (sulfure d'hydrogène),
- Anoxie (CO₂, N₂).

Enfin, outre le sulfure d'hydrogène, le biogaz contient, à l'état de traces, des gaz odorants (composés soufrés dont mercaptans, azotés, aldéhydes, acides gras volatils) pouvant entraîner des nuisances olfactives.

Inflammabilité / Explosibilité du biogaz

Le biogaz formé contient une forte proportion de gaz combustible, le méthane (CH₄), et d'un gaz inerte, le dioxyde de carbone (CO₂). Les autres composés formés sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'explosivité ou de violence d'explosion du biogaz.

Nous considérerons donc dans ce paragraphe que le biogaz est assimilé à un mélange constitué majoritairement de CO₂ et de CH₄. Les autres composés étant suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'explosivité ou de violence d'explosion du biogaz.

Cependant, il convient de préciser que le biogaz, de par les conditions de température des procédés de méthanisation (mode mésophile et mode thermophile) contient de la vapeur d'eau à la pression de vapeur mais dont le pourcentage volumique est insuffisant pour le rendre inerte.

Pour une composition majoritaire en CH₄ et en CO₂, les limites inférieures et supérieures d'explosivité du biogaz sont présentées dans le tableau 3 suivant [2] :

CH ₄ - CO ₂ (%v/%v)	LIE (%v/vCH ₄)	LSE (%v/vCH ₄)	Densité (air = 1)
100 - 0	5	15	0,54
60 - 40	5,1	12,4	0,92
55 - 45	5,1	11,9	0,97
50 - 50	5,3	11,4	1,02

Tableau 3 : Limites d'inflammabilité relatives à quatre compositions différentes de biogaz

Le biogaz contenant une concentration en CO₂ supérieure à 50 % est plus dense que l'air et peut, en zone confinée non ventilée, provoquer l'anoxie.

La présence du CO₂ tend à diminuer la réactivité du méthane. De plus, la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère présente à l'intérieur d'un digesteur ou post-digesteur est relativement importante. En matière d'explosivité, la vapeur d'eau peut atténuer la réactivité du biogaz : la plage d'explosivité de l'atmosphère mise en œuvre à l'intérieur d'un digesteur ou d'un post-digesteur dépendra de sa teneur en vapeur d'eau et donc de sa température d'autant plus quelle sera élevée.

La variation de la composition du biogaz (c'est-à-dire une teneur en méthane variant de 50 % à 100 %) ne modifie pas de façon significative la violence d'explosion et le domaine d'inflammabilité (la LIE reste à peu près constante avec cependant une légère augmentation de la LSE lorsque la teneur en CH₄ augmente).

Des essais conduits par l'INERIS en 2006 [2] ont conduit aux résultats suivants :

- pour une composition volumique CH₄ - CO₂ de 60 %-40 % (proche de ce qui est attendu dans les digesteurs), **le domaine d'explosivité du mélange est compris entre 4,4 % vol. et 12,4 % vol.** La présence du CO₂ tend donc à diminuer le domaine d'explosivité du méthane ;
- pour une composition volumique CH₄-CO₂ de 60 %-40 % à 55°C, en présence de vapeur d'eau à saturation (conditions dans les digesteurs), **Pmax est de l'ordre de 3,2 bar relatif et la constante d'explosion de gaz (Kg) est de l'ordre de 4 bar.m/s.** La vapeur d'eau tend à limiter la violence de l'explosion par rapport au méthane ;
- **l'énergie minimale d'inflammation du biogaz** n'a pas pu être mesurée. Elle est nécessairement supérieure à celle du méthane, à cause de la présence de CO₂ et de la vapeur d'eau, mais reste vraisemblablement **suffisamment faible** pour ne pas écarter des sources d'inflammation faibles telles que des étincelles d'origine électrostatique ;
- la **température d'auto-inflammation** du biogaz n'a pas pu être mesurée, on retiendra par défaut celle du **méthane**.

Pour la modélisation, la vitesse de flamme varie d'un facteur 10 selon que le biogaz est au repos (V_f = 0,3 à 0,4 m/s) ou en phase turbulente (V_f = 3 à 4 m/s).

Toxicité aiguë par inhalation du biogaz

La toxicité du biogaz est due essentiellement à la présence de sulfure d'hydrogène (H₂S), qui est un gaz présentant un risque important de toxicité aiguë par inhalation, comme le montrent les seuils d'effets dans le tableau 4 suivant.

Durée d'exposition (min)	SEI (ppm)	SEL1% (ppm)	SEL5% (ppm)
1	320	1 521	1 720
10	150	688	769
20	115	542	605
30	100	472	526
60	80	372	414

Tableau 4 : Concentrations seuils du H₂S en fonction de la durée d'exposition

On notera également les valeurs seuils suivantes pour le H₂S :

- seuil de détection olfactive : 1 à 5 µg/m³ ;
- VME et VLE : 5 ppm et 10 ppm ;
- seuil d'anesthésie olfactive : 100 ppm (très dépendant des personnes).

Anoxie (CO₂, N₂)

L'air est composé principalement d'azote et d'oxygène dans des proportions très précises. La diminution du taux d'oxygène, due à une augmentation du taux d'un **autre** composé présent ou non dans la composition de base de l'air, entraîne le risque d'anoxie. Le risque d'anoxie apparaît lorsque le taux d'oxygène est inférieur à 19 % d'oxygène.

3.3 RETOUR D'EXPERIENCE SUR DES ACTIVITES DE METHANISATION

Une synthèse des accidents survenus sur des méthaniseurs agricoles a été conduite par l'INERIS dans le cadre d'une étude des risques liés à l'exploitation des méthaniseurs agricoles pour le MEEDDM [3], sur la base des installations présentes en Europe (notamment en Allemagne qui possède plus de 3000 installations). Les méthaniseurs agricoles ont un fonctionnement similaire à celui des digesteurs industriels, bien que la matière traitée soit de nature différente (déchets organiques agricoles au lieu de boues de STEP). Cette synthèse met en lumière les incidents présentés ci-après.

Débordement du méthaniseur :

Ce type d'incidents se produit assez régulièrement en Allemagne (estimation de 3 à 4 incidents par an). Il peut être dû à une accumulation de sable par exemple.

Ce risque peut être prévenu par :

- le procédé de production des substrats avant leur digestion qui permet un certain contrôle de leur qualité (notamment dessablage des effluents),

- le brassage des digesteurs,
- le système d'alimentation du digesteur (vasque avec trop-plein) qui assure de façon passive un niveau constant dans le digesteur.

Gel des soupapes du méthaniseur

Il est plusieurs fois arrivé que les soupapes d'un méthaniseur gèlent et ne soient donc plus en état de fonctionner. Le non fonctionnement d'une mesure de maîtrise des risques (soupape par exemple) est pris en compte dans la méthode d'analyse des risques retenue pour cette étude.

Envol de la membrane souple d'un méthaniseur industriel

La membrane souple d'un méthaniseur industriel (équipé d'une membrane simple) s'est envolée libérant ainsi le biogaz stocké à l'intérieur. Une violente tempête a provoqué la sortie du boudin de fixation de sa gorge et donc l'envol de la membrane. Cet événement est à considérer pour les gazomètres.

Surpression à l'intérieur du méthaniseur

Deux événements, survenus en Allemagne et en Espagne, ont impliqué la formation d'une surpression interne responsable du déversement à l'extérieur du méthaniseur. Dans l'un des cas, des matières plastiques s'étaient accumulées à l'intérieur du méthaniseur jusqu'à former une couche étanche à la surface de la phase liquide. La réaction de fermentation s'est poursuivie sous cette couche. La surpression engendrée par cette accumulation est responsable de l'éclatement du méthaniseur, avec émission de projectiles et épandage des matières présentes. Les soupapes, situées en partie haute, sont inutiles pour prévenir ce type d'incident. Ce risque peut être prévenu par :

- le procédé de production des substrats avant leur digestion qui empêche l'accumulation de matières plastiques (notamment dégrillage des effluents),
- le brassage des digesteurs qui empêche la formation d'une croûte.

4. EVALUATION DE L'INTENSITE DES POTENTIELS DE DANGERS ET DES PHENOMENES DANGEREUX

Ce chapitre a pour objet de déterminer les conditions dans lesquelles les accidents envisagés peuvent se produire, et d'évaluer leurs conséquences sur les personnes et l'environnement.

La démarche menée au cours de l'identification des risques a consisté à répertorier l'ensemble des événements redoutés susceptibles de se produire sur les installations. La combinaison des événements redoutés avec leurs causes et leurs conséquences potentielles permet d'identifier les scénarios d'accidents majorants.

Pour mémoire, un scénario d'accident majeur est défini par :

- un produit associé à un équipement (par exemple du biogaz dans une canalisation),
- une hypothèse de défaillance ou événement redouté (à titre d'exemple, la rupture guillotine d'une canalisation),
- un phénomène physique : explosion de vapeurs, incendie de type feu de torche, feu de cuvette...

Il est le résultat d'un enchaînement d'évènements conduisant d'un événement initiateur à un accident majeur, dont la séquence et les liens logiques découlent de l'analyse des risques. Il est envisageable que plusieurs scénarios mènent à un même phénomène dangereux pouvant conduire à l'accident majeur.

4.1 SEUILS REGLEMENTAIRES

Les grandeurs retenues pour caractériser les risques majeurs sont :

- les niveaux de surpression aérienne,
- les flux thermiques ou la dose thermique,
- les seuils d'effets toxiques ou la dose toxique.

Pour chaque grandeur, des seuils d'effets sont définis pour les personnes et pour les structures, conformément aux instructions de l'arrêté du 29 septembre 2005 [4].

Ces seuils d'effets sont des valeurs limites d'une grandeur représentative d'un effet sur les personnes, les biens ou l'environnement, correspondant à un niveau d'intensité de l'effet.

Les effets irréversibles sur les personnes correspondent à des blessures dont les victimes garderont des séquelles ultérieures, tandis que les effets létaux correspondent au décès.

- **EFFETS SUR LES PERSONNES**

	Seuils des effets de surpression	Seuils des effets thermiques (pour une exposition de plus d'1 à 2 minutes avec un terme source constant)	Seuils des doses thermiques (pour une exposition courte avec un terme source non constant)	Seuils des effets toxiques*
Effets irréversibles par effets indirects	20 mbar : effets irréversibles par projection de vitres	/	/	/
Dangers significatifs ou effets irréversibles	50 mbar : effets irréversibles par mise en mouvement des individus ou projection de fragments de décoration diverses.	3 kW/m² : effets irréversibles par rayonnement thermique	600 (kW/m²)^(4/3).s : effets irréversibles par rayonnement thermique	Seuil des Effets Irréversibles (SEI) SEI _{10min} (H ₂ S) = 150 ppm SEI _{30min} (H ₂ S) = 100 ppm
Dangers graves ou premiers effets létaux	140 mbar : effets létaux par risque d'écrasement ou de choc de fragments massifs de maçonnerie ou de béton non renforcé	5 kW/m² : premiers effets létaux par rayonnement thermique	1000 (kW/m²)^(4/3).s : premiers effets létaux par rayonnement thermique	Seuil des Effets Létaux (SEL) effets létaux pour 1% de la population exposée SEI _{10min} (H ₂ S) = 688 ppm SEI _{30min} (H ₂ S) = 472 ppm
Dangers très graves ou effets létaux significatifs	200 mbar : effets létaux par effet direct (hémorragie pulmonaire)	8 kW/m² : effets létaux par rayonnement thermique	1800 (kW/m²)^(4/3).s : effets létaux par rayonnement thermique	Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS) effets létaux pour 5% de la population exposée SEI _{10min} (H ₂ S) = 769 ppm SEI _{10min} (H ₂ S) = 526 ppm

Tableau 5 : Seuils d'effets sur les personnes

(*) Pour les effets toxiques, ces seuils correspondent à des concentrations volumiques dans l'air (en ppm ou mg/m³). Ils sont spécifiques à chaque gaz et disponibles sur le Portail Substances Chimiques de l'INERIS (www.ineris.fr). Le gaz toxique de référence du biogaz est l'H₂S (cf tableau 4).

- **EFFETS SUR LES STRUCTURES**

	Seuils des effets de surpression	Seuils des effets thermiques
Seuil des destructions de vitres significatives (plus de 10% des vitres)	20 mbar	5 kW/m²
Seuil des dégâts légers	50 mbar : Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	/
Seuil des dégâts graves	140 mbar : Effondrement partiel des murs et tuiles des maisons	8 kW/m²
Seuil des effets dominos	200 mbar : Destruction des murs en parpaings Destruction de plus de 50 % des maisons en briques	8 kW/m²
Seuil d'exposition prolongée et seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton	300 mbar	16 kW/m²
Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et seuil des dégâts très graves sur les structures béton	/	20 kW/m²
Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes	/	200 kW/m²

Tableau 6 : Seuils d'effets sur les structures

4.2 HYPOTHESES ET PRINCIPES DE MODELISATIONS

De façon générale, les principes suivants ont été retenus :

1. Etant donné la configuration de l'établissement (distance d'au moins 50 mètres entre les installations de procédé et la limite de propriété), et son régime administratif (déclaration ou autorisation), et en application du principe de proportionnalité au risque évoqué dans la réglementation [5], les modélisations ont été réalisées en utilisant des modèles fiables et des hypothèses conservatives, notamment :

- * pour les rejets de biogaz ou de gaz de ville, les distances affichées dans la suite de ce rapport correspondent aux conditions météorologiques les plus pénalisantes ;
- * pour les explosions dans les locaux, la formation de l'ATEX air/ CH₄ à la suite d'une fuite d'une canalisation de biogaz est identifiée comme un mélange à la stœchiométrie (combustion totale du mélange libérant l'énergie maximale de la réaction de combustion).

2. Le dimensionnement des futurs locaux et installations n'est pas précisé, ce qui a conduit l'INERIS à proposer les données d'entrée des scénarios de modélisation sur la base de son expertise sur des installations de même type (local de compression, digesteur, gazomètre, locaux de séchage) et à partir des plans et des informations fournies pour des installations industrielles et agricoles en sa possession (clients commerciaux de l'INERIS).

Les résultats des calculs sont donc donnés à titre indicatif pour pouvoir obtenir une estimation des conséquences accidentelles des principaux scénarios redoutés.

Dans cette étude, nous considérons le cas le plus répandu, à savoir les méthaniseurs semi-continus. Les risques encourus dans les autres types d'installation ne diffèrent pas de ceux qui seront traités au cours de cette étude.

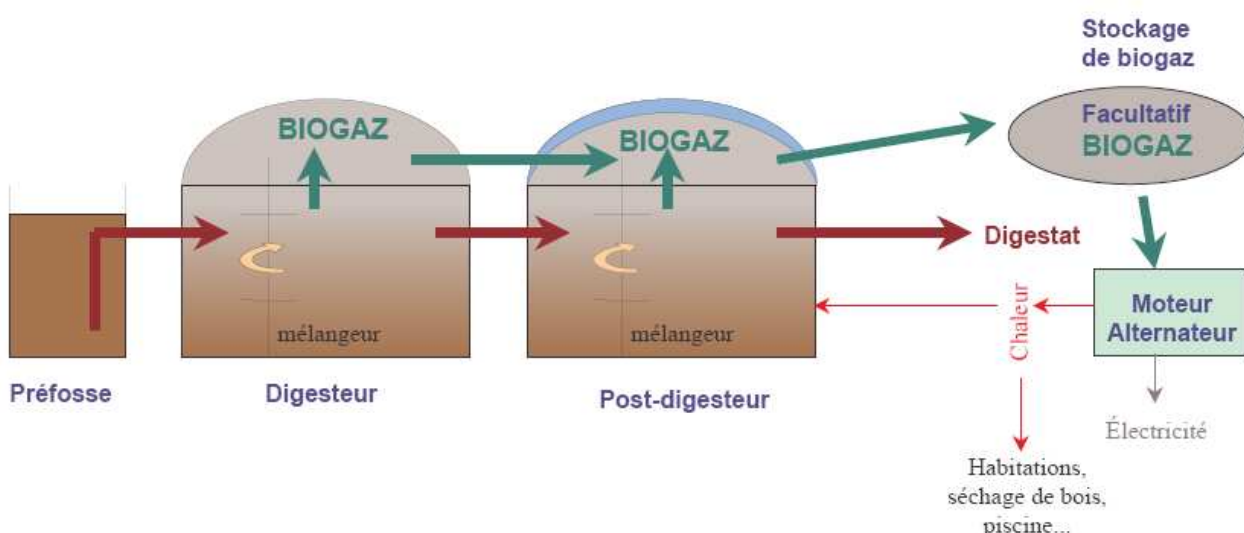


Schéma 1 : Schéma simplifié d'un méthaniseur semi continu

Les scénarios accidentels retenus pour une configuration de taille industrielle et agricole sont présentés dans le tableau 7 suivant :

Description du scénario accidentel	Spécificité de la configuration de taille industrielle	Spécificité de la configuration de taille agricole (ou semi-industrielle)
Rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'extérieur	DN = 300 mm P = 1,8 bar rel Tp = 15°C	DN = 250 mm P = 300 mbar rel Tp = 15°C
Explosion dans un local de compression de biogaz liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local	V = 9 000 m ³ DN = 300 mm P = 1,8 bar rel Tp = 15°C	/

Description du scénario accidentel	Spécificité de la configuration de taille industrielle	Spécificité de la configuration de taille agricole (ou semi-industrielle)
Explosion dans un local de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local	V = 9 000 m ³ DN = 250 mm P = 300 mbar rel Tp = 15°C	V = 6 000 m ³ DN = 150 mm P = 300 mbar rel Tp = 15°C
Explosion dans un local de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de gaz de ville située à l'intérieur de ce local	/	V = 6 000 m ³ DN = 150 mm P = 300 mbar rel Tp = 15°C
Explosion dans un digesteur en fonctionnement normal	V = 1 500 m ³	V = 500 m ³
Explosion dans un digesteur à vide	V = 9 000 m ³	V = 3 000 m ³
Explosion de l'ATEX interne dans un gazomètre	V = 2 000 m ³ V = 4 600 m ³	V = 660 m ³
Explosion de l'ATEX formée suite à la ruine du gazomètre	V = 2 000 m ³ V = 4 600 m ³	V = 660 m ³

Tableau 7 : Scénarios accidentels retenus pour une configuration de taille industrielle et agricole

Pour le premier scénario du tableau 7 (rupture guillotine d'une canalisation de biogaz à l'extérieur), les distances d'effets de surpression, d'effets thermiques et d'effets toxiques ont été modélisées.

Pour les autres scénarios, seules les distances d'effets d'explosion primaires ont été déterminées dans la mesure où la liste des scénarios dans le cadre de cette étude était limitée à quelques scénarios. Cependant, des calculs de modélisation liés aux effets thermiques et aux explosions secondaires suite à l'ouverture du local sont à prévoir : ces calculs devront alors être évalués dans le cadre d'une étude de dangers réglementaire plus spécifique.

Pour le dernier scénario relatif à la ruine du gazomètre, on prend comme hypothèse l'inflammation de l'ATEX formée à l'issue de sa rupture. En cas de non inflammation de l'atmosphère libérée, des effets toxiques seront alors générés s'il s'agit de biogaz brut ou seront négligeables dans le cas de biogaz épuré (cas le plus probable dans la mesure où à terme dans le cadre de l'injection proche du biométhane dans le réseau GrdF, le gazomètre servira à stocker du biogaz épuré).

4.3 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION

Ce sous chapitre présente les résultats des modélisations des scénarios accidentels présentés dans le tableau 7.

4.3.1 RUPTURE GUILLOTINE D'UNE CANALISATION DE BIOGAZ SITUEE A L'EXTERIEUR

On considère la fuite d'une canalisation horizontale de biogaz à l'extérieur de deux types :

- DN = 300 mm, P = 1,8 bar rel, T_p = 15°C (configuration industrielle),
- DN = 250 mm, P = 300 mbar rel, T_p = 15°C (configuration agricole).

4.3.1.1 GENERALITES SUR LES FUITES D'UNE CANALISATION DE BIOGAZ SITUEE A L'EXTERIEUR

Lorsqu'un gaz est contenu sous pression dans une capacité et lorsque, par suite d'une perte d'étanchéité, un élément de cette capacité présente un orifice de fuite, le gaz s'en échappe et se mélange à l'air ambiant.

Les conditions dans lesquelles le gaz déchargé et l'air se mélangent dépendent de nombreux paramètres.

Toutefois, si la fuite se produit à l'air libre et tant qu'elle débite, il est possible d'affirmer que :

- c'est toujours du gaz pur qui est présent dans le plan de l'orifice de fuite,
- au contraire, il existe toujours une zone de l'espace suffisamment éloignée de l'orifice de fuite où la concentration de l'air en gaz déchargé reste très faible voire nulle,
- la fuite génère donc un champ de concentration,
- à cause de ce champ de concentration et dans l'hypothèse où le gaz déchargé est inflammable, il existe toujours une zone de l'espace où la concentration du gaz dans l'air appartient au domaine d'explosivité et où le mélange air-gaz constitue donc une ATEX.

Les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au biogaz [2] ont été retenus :

- une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s,
- un taux d'expansion de 6.

La modélisation a été réalisée avec la méthode multi-énergie présentée en annexe 1.

Le schéma 2 suivant indique l'évolution de la fuite de biogaz à partir de l'orifice de fuite de la canalisation, la distance d'atteinte de la LIE et le volume de l'ATEX de biogaz en mélange avec l'air constitué.

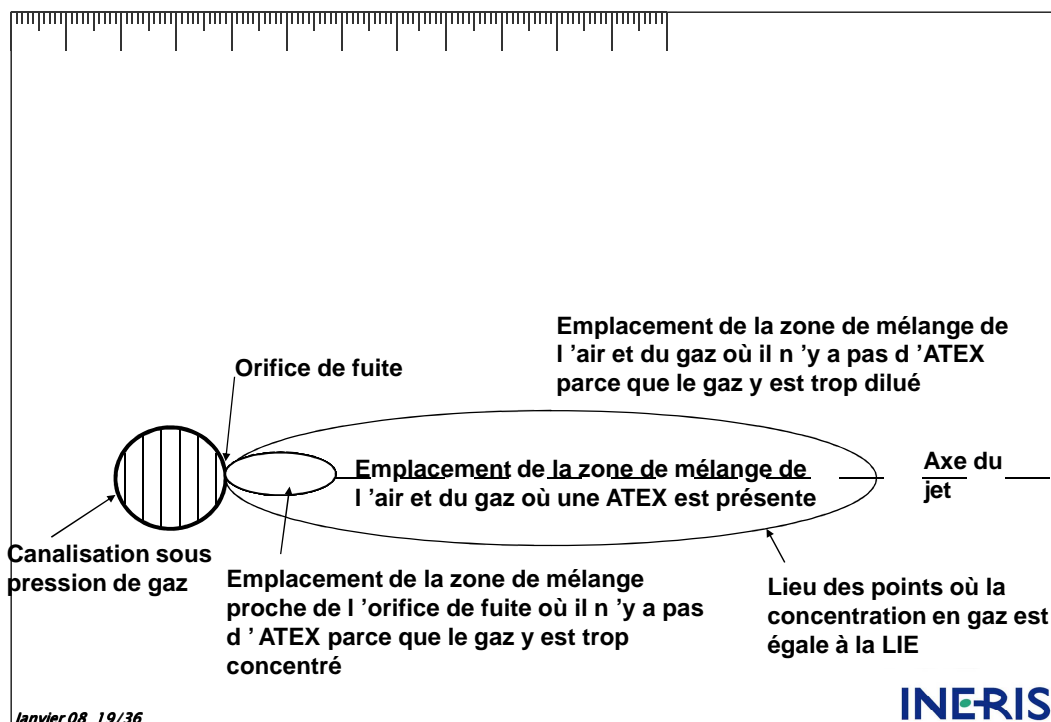


Schéma 2 : Fuite de canalisation de biogaz

4.3.1.2 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION DE FUITE DE CANALISATION DE BIOGAZ A L'EXTERIEUR

Le calcul d'explosion dans le jet horizontal suite à une rupture guillotine d'une canalisation horizontale de biogaz (de deux compositions CH₄/CO₂ différentes 60/40 et 80/20) à l'extérieur a été réalisé pour :

- une canalisation sur un site industriel (DN = 300 mm, P = 1,8 bar rel, T_p = 15°C),
- une canalisation sur un site agricole (DN = 250 mm, P = 300 mbar rel, T_p = 15°C).

4.3.1.2.1 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION D'EFFETS D'EXPLOSION

Les distances d'effets d'explosion pour chaque composition de biogaz sont reportées dans les tableaux 8 et 9.

- Effets de pression liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site industriel :

	Débit (kg/s)	Distance à la LIE (m)	Distance à 200 mbar (m)	Distance à 140 mbar (m)	Distance à 50 mbar (m)	Distance à 20 mbar (m)
Biogaz 80/20	33	27	25	30	50	95
Biogaz 60/40	37	19	17	20	31	60

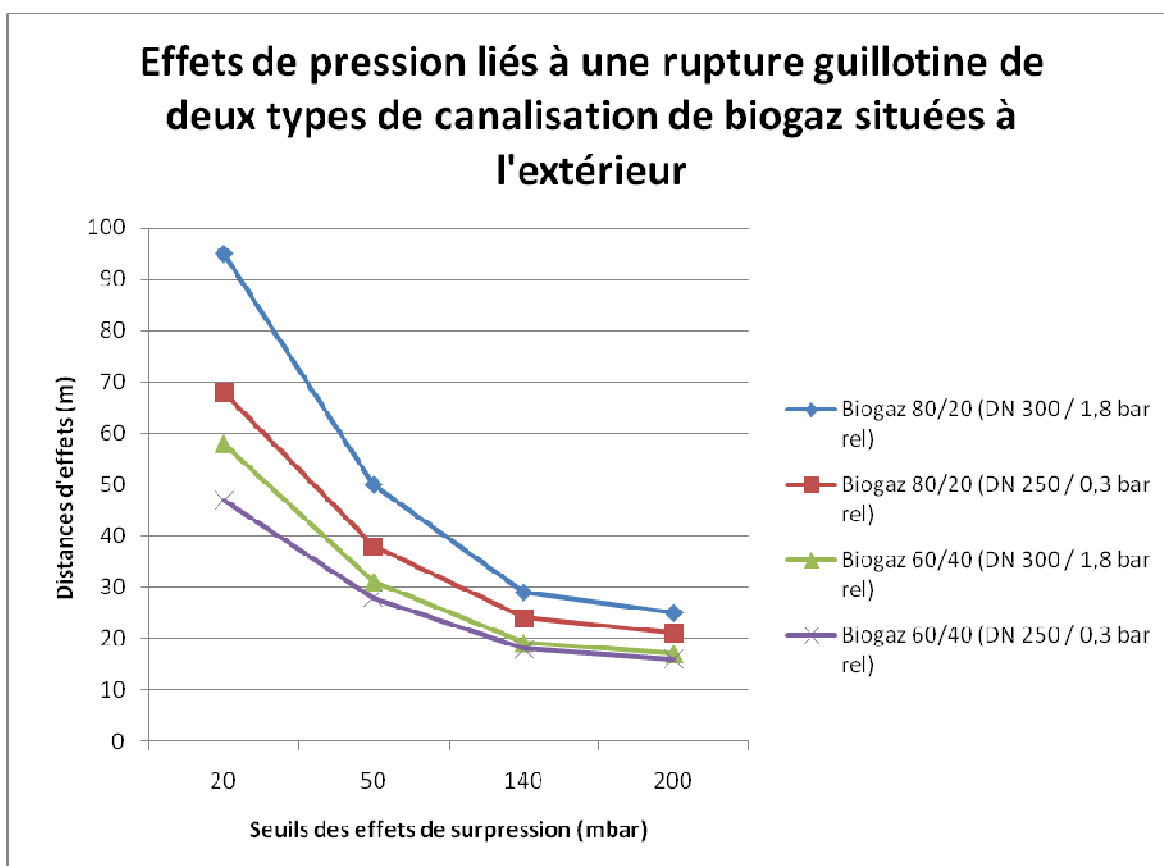
Tableau 8 : Calculs de modélisation des distances d'effets de pression de rupture de canalisation de biogaz (DN = 300 mm, P = 1,8 bar rel, T_p = 15°C)

- Effets de pression liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site agricole (ou de taille semi industrielle) :

	Débit (kg/s)	Distance à la LIE (m)	Distance à 200 mbar (m)	Distance à 140 mbar (m)	Distance à 50 mbar (m)	Distance à 20 mbar (m)
Biogaz (80/20)	33	21	21	25	40	70
Biogaz (60/40)	37	15	16	20	30	50

Tableau 9 : Calculs de modélisation des distances d'effets de pression de rupture de canalisation de biogaz (DN = 250 mm, P = 300 mbar rel, Tp = 15°C)

Le graphique 1 ci-après illustre les effets de pression liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz situées à l'extérieur.



Graphique 1: Effets de pression liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz situées à l'extérieur

4.3.1.2.2 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION D'EFFETS THERMIQUES

Les distances d'effets thermiques pour chaque composition de biogaz sont reportées dans les tableaux 10 et 11.

- Effets thermiques liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site industriel :

	Classe de stabilité	débit (kg/s)	Vitesse (m/s)	Distances Feux torches (m)		
				SELS (8 KW/m ²)	SEL (5 KW/m ²)	SEI (3 KW/m ²)
Biogaz (80/20)	D5 / F3	33	353	75	85	95
Biogaz (60/40)	D5 / F3	37	315	70	80	90

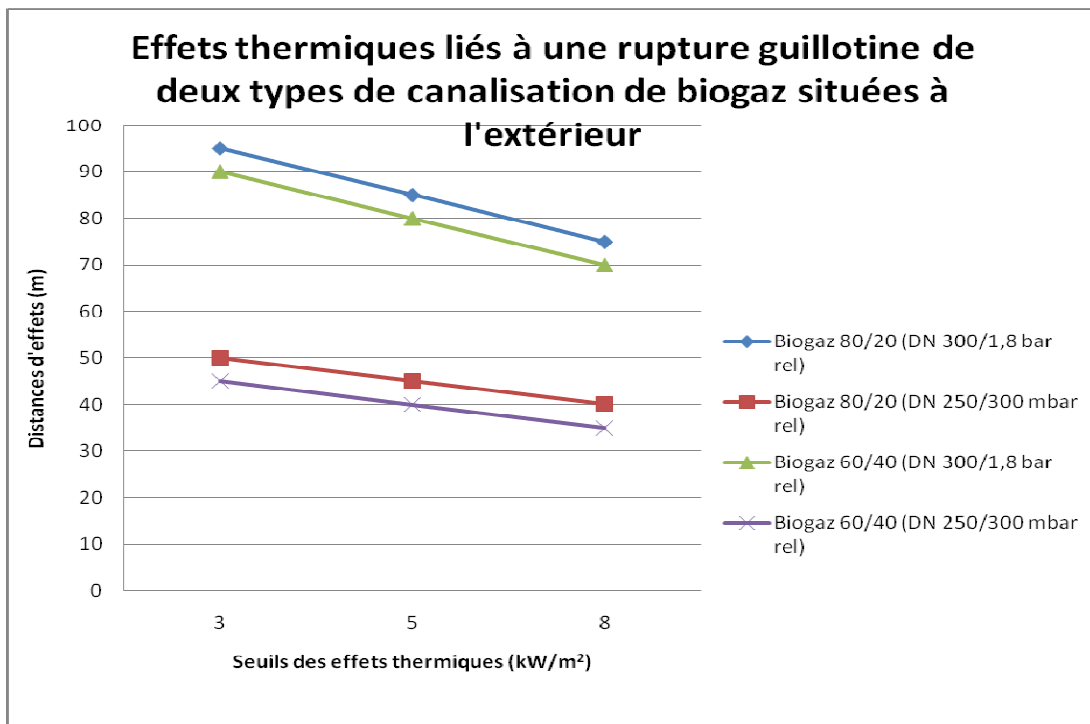
Tableau 10 : Calculs de modélisation des distances d'effets torche de rupture de canalisation de biogaz (DN = 300 mm, P = 1,8 bar rel, Tp = 15°C)

- Effets thermiques liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site agricole (ou de taille semi industrielle) :

	Classe de stabilité	débit (kg/s)	Vitesse (m/s)	Distances Feux torches (m)		
				SELS (8 KW/m ²)	SEL (5 KW/m ²)	SEI (3 KW/m ²)
Biogaz (80/20)	D5 / F3	33	235	40	45	50
Biogaz (60/40)	D5 / F3	37	210	35	40	45

Tableau 11 : Calculs de modélisation des distances d'effets torche de rupture de canalisation de biogaz (DN = 250 mm, P = 300 mbar rel, Tp = 15°C)

Le graphique 2 ci-après illustre les effets thermiques liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz situées à l'extérieur.



Graphique 2: Effets thermiques liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz situées à l'extérieur

4.3.1.2.3 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION D'EFFETS TOXIQUES

Les distances d'effets toxiques (gaz de référence H₂S pour le biogaz brut non épuré) pour chaque composition de biogaz brut et chaque canalisation sont reportées dans les tableaux 12 et 13.

Pour rappel, les définitions des six configurations de composition de biogaz brut et épuré retenues sont indiquées dans le tableau 2 ci-avant. Il existe en général des traitements simples de gaz bruts (par introduction d'air) qui ramènent la composition du biogaz épuré en H₂S à quelques dizaines de ppm.

La teneur en H₂S du biogaz épuré (< 100 ppm) reste en deçà des seuils des effets toxiques SEI (150 ppm / 100 ppm), SEL (688 ppm / 472 ppm) et SELS (769 ppm / 526 ppm) pour une durée d'exposition de 10 minutes ou de 30 minutes (cf tableau 4) : en conséquence, les modélisations des distances d'effets toxiques pour le biogaz épuré ne sont pas réalisées.

Les distances d'effets toxiques pour chaque composition de biogaz brut non épuré sont reportées dans les tableaux 12 et 13.

- Effets toxiques liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site industriel :

	Classe de stabilité	débit (kg/s)	Vitesse (m/s)	Distances toxiques (m)		
				SELS	SEL	SEI
Biogaz 1A / 1B (8 000 ppm)	D5	32,5 / 36,3	353 / 315	20 / 15	25 / 20	220 / 170
	F3	32,5 / 36,3	353 / 315	20	25	300 / 210
Biogaz 2A / 2B (1 000 ppm)	D5	32,5 / 36,3	353 / 315	< 5	< 5	10 / 8
	F3	32,5 / 36,3	353 / 315	< 5	< 5	10 / 9
Biogaz 3A / 3B (2 500 ppm)	D5	32,5 / 36,3	353 / 315	< 10 / < 5	< 10 / < 5	40 / 25
	F3	32,5 / 36,3	353 / 315	< 10 / < 5	< 10 / < 5	45 / 30

Tableau 12 : Calculs de modélisation des distances d'effets toxiques de rupture de canalisation de biogaz brut (DN = 300 mm, P = 1,8 bar rel, Tp = 15°C)

- Effets toxiques liés à une rupture guillotine d'une canalisation sur un site de taille agricole (ou de taille semi industrielle) :

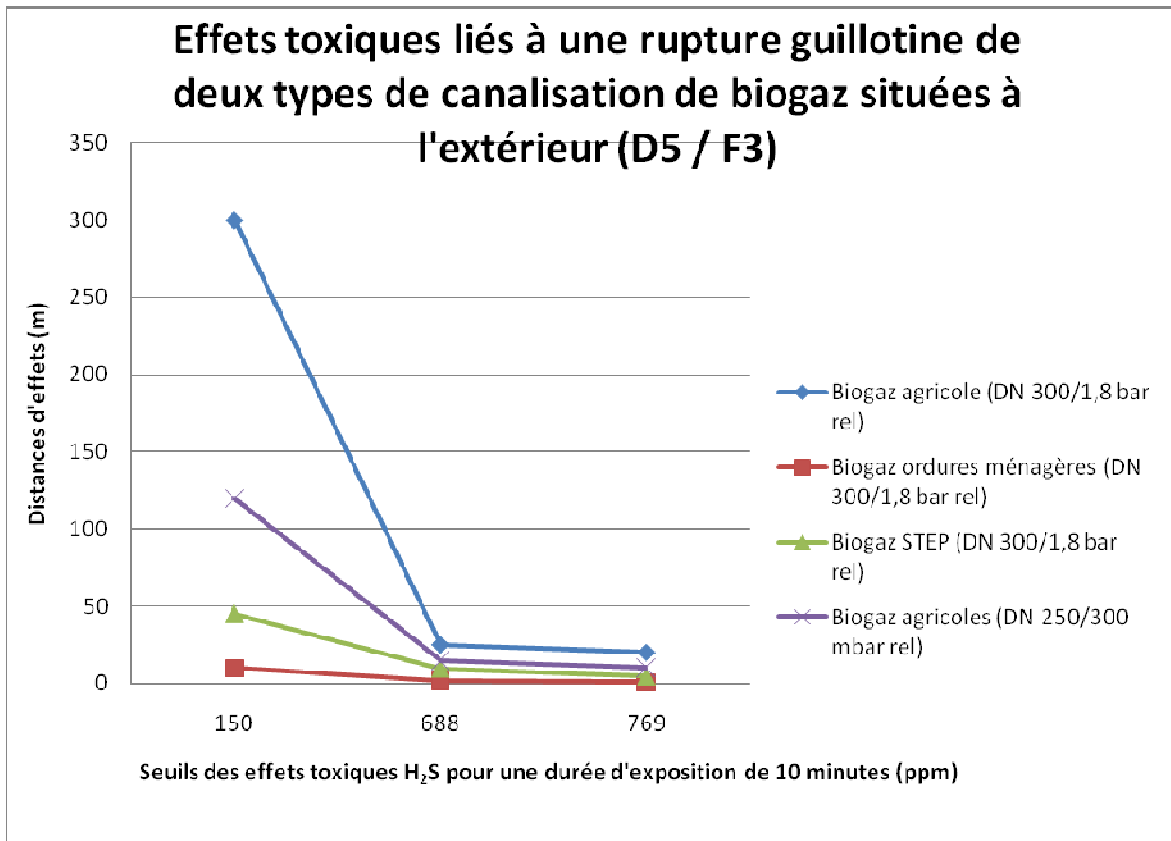
	Classe de stabilité	débit (kg/s)	Vitesse (m/s)	Distances toxiques (m)		
				SELS	SEL	SEI
Biogaz 1A / 1B (8 000 ppm)	D5	7,4 / 8,2	235 / 210	10 / 10	15 / 15	70 / 85
	F3	7,4 / 8,2	235 / 210	10 / 10	15 / 15	65 / 120
Biogaz 2A / 2B (1 000 ppm)	D5	7,4 / 8,2	235 / 210	< 5	< 5	< 10
	F3	7,4 / 8,2	235 / 210	< 5	< 5	< 10
Biogaz 3A / 3B (2 500 ppm)	D5	7,4 / 8,2	235 / 210	< 5	< 5	20 / 12
	F3	7,4 / 8,2	235 / 210	< 5	< 5	20 / 15

Tableau 13 : Calculs de modélisation des distances d'effets toxiques de rupture de canalisation de biogaz brut (DN = 250 mm, P = 300 mbar rel, Tp = 15°C)

Les biogaz bruts issus de la méthanisation agricole peuvent générer des distances d'effets toxiques bien supérieures à celles occasionnées par les biogaz bruts issus de la méthanisation d'ordures ménagères ou de boues de station d'épuration puisque leurs teneurs moyennes résiduelles en H₂S est de l'ordre de 3 à 8 fois supérieur.

Il existe en général des traitements simples de gaz bruts (par introduction d'air) qui ramènent la composition du biogaz épuré en H₂S à quelques dizaines de ppm.

Le graphique 3 ci-après illustre les effets toxiques H₂S pour une durée d'exposition de 10 minutes liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz brut situées à l'extérieur.



Graphique 3 : Effets toxiques H₂S pour une durée d'exposition de 10 minutes liés à une rupture guillotine de deux types de canalisation de biogaz brut situées à l'extérieur

4.3.2 EXPLOSION DANS UN LOCAL DE COMPRESSION DE BIOGAZ LIEE A UNE RUPTURE GUILLOTINE D'UNE CANALISATION DE BIOGAZ SITUEE A L'INTERIEUR DE CE LOCAL (SITE INDUSTRIEL)

On considère la formation d'une atmosphère explosive (dénommée ci après ATEX) à la stœchiométrie dans le local de compression suite à une fuite de canalisation de biogaz sous une pression de 1,8 bar rel et un diamètre de 300 mm, sans tenir compte de la ventilation du local de dimension suivante : 45 m x 20 m x 10 m ($V = 9\ 000\ m^3$).

Lorsque la fuite se produit en milieu confiné (par exemple dans un local), un champ de concentration apparaît également, mais son évolution temporelle, de même que l'accroissement éventuel du volume d'ATEX formée dépendent :

- au moins du volume du local comparé au volume de gaz (a priori limité) qui est susceptible d'être déchargé par l'orifice de fuite,
- et éventuellement aussi de l'existence d'un équipement de ventilation du local qui y introduit de l'air frais à un certain débit.

Dans l'hypothèse d'une fuite de biogaz dans un local, le problème n'est donc pas tant de savoir si une ATEX se formera, mais plutôt de savoir si le volume de cette ATEX est tel que son inflammation amorcerait son explosion et produirait des effets significatifs. L'évaluation des risques d'explosion liés à l'ATEX formée en cas de fuite est donc directement liée à celle du volume maximal de l'ATEX formée.

Les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au biogaz ont été retenus :

- une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s,
- un taux d'expansion de 6.

Le local est en bardage considéré simple peau dont la densité de surface est supposée de l'ordre 8 kg/m². La résistance à l'explosion est supposée de l'ordre de 30 mbar. Toutes les parois peuvent donc être considérées comme soufflables (30 mbar, 8 kg/m²).

Le calcul d'explosion réalisé avec le logiciel de modélisation EFFEX (présenté en annexe 2) est précisé dans le tableau 14 suivant qui indique les valeurs suivantes :

- la surpression maximale dans le local en fonction du pourcentage de surface d'évent en toiture et du pourcentage de gaz brûlé à l'intérieur du local,
- des distances d'effets de pression en fonction du pourcentage de gaz expulsé à l'extérieur du local.

% Surface d'évent toiture	Surpression maximale dans le local (mbar)	% gaz brûlé à l'intérieur du local	% gaz non brûlé et expulsé à l'extérieur du local	Volume CH ₄ brûlé à l'extérieur du local (m ³)	Distance à 200 mbar (m)	Distance à 140 mbar (m)	Distance à 50 mbar (m)	Distance à 20 mbar (m)
10	2210	100	0	0	65	85	200	445
20	637	72	28	216	70	90	215	485
30	370	30	70	542	90	125	230	660
40	332	26	74	573	95	125	300	675
50	305	25	75	581	95	125	300	675

Tableau 14 : Seuils d'effets de pression suite à une fuite canalisation de biogaz dans un local de séchage (DN 300, P = 1,8 bar rel)

L'explosion primaire suite à l'inflammation de l'ATEX à la stœchiométrie dans le local de compression éjecte à l'extérieur un volume inflammable initial à travers les parois soufflées du local. Plus la surface d'évent est importante, mieux le local en lui-même est protégé contre l'explosion.

Le nuage inflammable éjecté est fortement turbulent sous l'impulsion de la surpression de l'explosion primaire (le local devient largement ventilé).

Dans ces conditions, les effets de pression sont largement supérieurs à l'extérieur qu'à l'intérieur du local de par l'explosion secondaire. Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 6 (système turbulent).

Les distances d'effets de pression indiquées dans le tableau 14 correspondent aux effets de l'explosion secondaire à l'extérieur du local.

Des projections de débris (bardage,...) sont possibles sur quelques dizaines de mètres.

4.3.3 EXPLOSION DANS UN LOCAL DE SECHAGE LIEE A UNE RUPTURE GUILLOTINE D'UNE CANALISATION DE BIOGAZ SITUEE A L'INTERIEUR DE CE LOCAL

On considère la formation d'une ATEX à la stœchiométrie dans le local de séchage suite à une fuite de canalisation de biogaz selon la configuration du site :

- **Site industriel** : canalisation sous une pression de 300 mbar rel et un diamètre de 250 mm, sans tenir compte de la ventilation du local de dimension suivante : 45 m x 20 m x 10 m ($V = 9\ 000\ m^3$). Le local est en bardage considéré simple peau dont la densité de surface est supposée de l'ordre 8 kg/m². La résistance à l'explosion est supposée de l'ordre de 30 mbar. Toutes les parois peuvent donc être considérées comme soufflables (30 mbar, 8 kg/m²).
- **Site agricole** (ou de taille semi industrielle) : canalisation sous une pression de 300 mbar rel et un diamètre de 150 mm, sans tenir compte de la ventilation du local de dimension suivante : 30 m x 20 m x 10 m ($V = 6\ 000\ m^3$). Le local est en bardage considéré simple peau dont la densité de surface est supposée de l'ordre 15 kg/m². La résistance à l'explosion est supposée de l'ordre de 50 mbar. Toutes les parois peuvent donc être considérées comme soufflables (50 mbar, 15 kg/m²).

Lorsque la rupture guillotine se produit en milieu confiné (par exemple dans un local), un champ de concentration apparaît également, mais son évolution temporelle, de même que l'accroissement éventuel du volume d'ATEX formée dépendent :

- au moins du volume du local comparé au volume de gaz (a priori limité) qui est susceptible d'être déchargé par l'orifice de fuite,
- et éventuellement aussi de l'existence d'un équipement de ventilation du local qui y introduit de l'air frais à un certain débit.

Dans l'hypothèse d'une fuite de biogaz dans un local, le problème n'est donc pas tant de savoir si une ATEX se formera, mais plutôt de savoir si le volume de cette ATEX est tel que son inflammation amorcerait son explosion et produirait des effets significatifs. L'évaluation des risques d'explosion liés à l'ATEX formée en cas de fuite est donc directement liée à celle du volume maximal d'ATEX formée.

Les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au biogaz ont été retenus :

- une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s,
- un taux d'expansion de 6.

Le calcul d'explosion a été réalisé avec le logiciel de modélisation EFFEX.

4.3.3.1 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION POUR UN SITE INDUSTRIEL

Le calcul d'explosion réalisé avec le logiciel de modélisation EFFEX est présenté dans le tableau 15 qui indique les valeurs suivantes :

- la surpression maximale dans le local en fonction du pourcentage de surface d'évent en toiture et du pourcentage de gaz brûlé à l'intérieur du local,
- les distances d'effets de pression en fonction du pourcentage de gaz expulsé à l'extérieur du local.

% Surface d'évent toiture	Surpression maximale dans le local (mbar)	% gaz brûlé à l'intérieur du local	% gaz non brûlé et expulsé à l'extérieur du local	Volume CH ₄ brûlé à l'extérieur du local (m ³)	Distance à 200 mbar (m)	Distance à 140 mbar (m)	Distance à 50 mbar (m)	Distance à 20 mbar (m)
10	951	100	0	0	50	65	150	335
20	338	55	45	348	80	110	250	570
30	246	20	80	619	100	130	310	690
40	221	18	82	635	100	130	310	700
50	202	17	83	643	100	130	310	700

Tableau 15 : Seuils d'effets de pression suite à une fuite canalisation de biogaz dans un local de séchage (DN 250, P = 300 mbar)

L'explosion primaire suite à l'inflammation de l'ATEX à la stœchiométrie dans le local de compression éjecte à l'extérieur un volume inflammable initial à travers les parois soufflées du local. Plus la surface d'évent est importante, mieux le local est protégé contre l'explosion.

Le nuage inflammable éjecté est fortement turbulent sous l'impulsion de la surpression de l'explosion primaire (le local devient largement ventilé).

Dans ces conditions, les effets de pression sont largement supérieurs à l'extérieur qu'à l'intérieur du local de par l'explosion secondaire. Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 6 (système turbulent).

Les distances d'effets de pression indiquées dans le tableau 15 correspondent aux effets de l'explosion secondaire à l'extérieur du local de compression.

Des projections de débris (bardage,...) sont possibles sur quelques dizaines de mètres.

4.3.3.2 RESULTATS DES CALCULS DE MODELISATION POUR UN SITE AGRICOLE (OU DE TAILLE SEMI INDUSTRIELLE)

Le calcul d'explosion avec le logiciel de modélisation EFFEX indique une surpression maximale dans le local de 100 mbar (pression résiduelle). La surface soufflable du local est de 1 600 m² et n'est pas équipé d'évent de protection contre l'explosion.

L'explosion primaire dans le local suite à l'inflammation de l'ATEX à la stœchiométrie dans le local de compression éjecte à l'extérieur 90 % du volume inflammable initial à travers les parois soufflées du local. La surface soufflable du local est de 1 600 m².

Le nuage inflammable éjecté est fortement turbulent sous l'impulsion de la surpression de l'ordre de 100 mbar de l'explosion primaire (le local devient largement ventilé).

Dans ces conditions, les effets de pression sont largement supérieurs à l'extérieur du local qu'à l'intérieur de par l'explosion secondaire. Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 5 (système turbulent).

Les distances d'effets de pression indiquées dans le tableau 16 correspondent aux effets de l'explosion secondaire à l'extérieur du local de compression.

Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	-
140	50
50	135
20	190

Tableau 16 : Seuils d'effets de pression

Des projections de débris (bardage,...) sont possibles sur quelques dizaines de mètres.

4.3.4 EXPLOSION DANS UN LOCAL DE SECHAGE LIEE A UNE RUPTURE GUILLOTINE D'UNE CANALISATION DE GAZ DE VILLE SITUEE A L'INTERIEUR DE CE LOCAL (SITE AGRICOLE OU DE TAILLE SEMI INDUSTRIELLE)

On considère la formation d'une ATEX à la stœchiométrie dans le local de séchage suite à une rupture guillotine de canalisation de gaz de ville (méthane) sous une pression de 300 mbar et un diamètre de 150 mm, sans tenir compte de la ventilation du local de dimension suivante : 30 m x 20 m x 10 m ($V = 6\ 000\ m^3$).

Les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au méthane ont été retenus :

- une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,42 m/s,
- un taux d'expansion de 7,2.

Le local est un local en bardage considéré simple peau dont la densité de surface est supposée de l'ordre 15 kg/m². La résistance à l'explosion est supposée de l'ordre de 50 mbar. Toutes les parois peuvent donc être considérées comme soufflables (50 mbar, 15 kg/m²). La surface soufflable du local est de 1 600 m².

Le calcul d'explosion avec le logiciel de modélisation EFFEX indique une surpression maximale dans le local de 100 mbar (pression résiduelle). La surface soufflable du local est de 1 600 m².

L'explosion primaire dans le local suite à l'inflammation de l'ATEX à la stœchiométrie dans le local de compression éjecte à l'extérieur 90 % du volume inflammable initial à travers les parois soufflées du local.

Le nuage inflammable éjecté est fortement turbulent sous l'impulsion de la surpression de l'ordre de 100 mbar de l'explosion primaire (le local devient largement ventilé).

Dans ces conditions, les effets de pression sont largement supérieurs à l'extérieur qu'à l'intérieur du local de par l'explosion secondaire. Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 5 (système turbulent).

Les distances d'effets de pression indiquées dans le tableau 17 correspondent aux effets de l'explosion secondaire à l'extérieur du local de compression.

Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	-
140	60
50	170
20	400

Tableau 17 : Seuils d'effets de pression

Des projections de débris (bardage,...) sont possibles sur quelques dizaines de mètres.

4.3.5 EXPLOSION DANS UN DIGESTEUR EN FONCTIONNEMENT NORMAL ET A VIDE

On considère la formation d'une ATEX à la stœchiométrie d'un mélange d'air et de biogaz dans le digesteur (volume supposé en fonctionnement normal du digesteur) selon la configuration du site :

- **Site industriel** : digesteur de 30 m de diamètre, dont le volume du ciel en fonctionnement normal est de 1 500 m³ et à vide de 9 000 m³. Le digesteur est un cylindre métallique, la résistance mécanique est de l'ordre de 100 mbar (muni d'évent contre l'explosion). La densité surfacique est considérée égale à 50 kg/m². La surface soufflable correspond au toit métallique du digesteur (pression statique d'ouverture à 100 mbar).
- **Site agricole** (ou de taille semi industrielle) : digesteur de 15 m de diamètre, dont le volume du ciel en fonctionnement normal est de 500 m³ et à vide de 3 000 m³. Le digesteur est un cylindre métallique à toit conique d'une hauteur de 2 m. La résistance mécanique est de l'ordre de 150 mbar. La densité surfacique est considérée égale à 50 kg/m². La surface soufflable correspond au toit du digesteur (pression statique d'ouverture à 150 mbar).

Les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au biogaz ont été retenus :

- vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s,
- taux d'expansion de 6.

L'ATEX étant au repos, une vitesse de combustion turbulente égale à 10 fois la vitesse de combustion laminaire a été retenue pour tenir compte des instabilités de flamme.

L'explosion dans le digesteur éjecte à l'extérieur 75% du volume inflammable initial à travers les parois soufflées. Le nuage formé est fortement turbulent sous l'impulsion de la pression résiduelle de l'explosion primaire.

Le digesteur devient largement ventilé. Dans ces conditions, les effets de pression sont largement supérieurs à l'extérieur du digesteur qu'à l'intérieur. Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 5.

Lorsque le digesteur fonctionne normalement, le calcul d'explosion avec le logiciel de modélisation EFFEX indique une surpression maximale dans le digesteur industriel de 150 mbar (pression résiduelle) et dans le digesteur agricole de 275 mbar (pression résiduelle), entraînant la projection de fragments métalliques de 50 kg/m² à environ 60 m.

L'éclatement du digesteur industriel à 100 mbar et du digesteur agricole à 150 mbar entraîne les effets de pression présentés dans le tableau 18 suivant :

	Digesteur industriel en fonctionnement normal	Digesteur agricole (ou de taille semi industrielle) en fonctionnement normal
Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	/	12
140	/	20
50	52	60
20	117	145

Tableau 18 : Seuils d'effets de pression suite à l'éclatement du digesteur industriel ou du digesteur agricole en fonctionnement normal

Les distances d'atteinte sont calculées à partir du toit du digesteur.

Lorsque le digesteur fonctionne à vide, le calcul d'explosion avec le logiciel de modélisation EFFEX indique une surpression maximale dans le digesteur industriel de 130 mbar (pression résiduelle) et dans le digesteur agricole de 200 mbar (pression résiduelle), entraînant la projection de fragments métalliques de 50 kg/m² à environ 70 m.

L'éclatement du digesteur industriel à 100 mbar et du digesteur agricole à 150 mbar entraîne les effets de pression présentés dans le tableau 19 suivant :

	Digesteur industriel à vide	Digesteur agricole (ou de taille semi industrielle) à vide
Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	/	22
140	/	37
50	66	105
20	148	255

Tableau 19 : Seuils d'effets de pression suite à l'éclatement du digesteur industriel à vide ou du digesteur agricole à vide

Les distances d'atteinte sont calculées à partir du toit du digesteur.

4.3.6 EXPLOSION DE L'ATEX INTERNE DANS UN GAZOMETRE

Nous considérons la formation d'une ATEX à la stœchiométrie d'un mélange d'air et de biogaz dans le gazomètre industriel de deux tailles distinctes ($V = 2\,000\text{ m}^3$ / $V = 4\,600\text{ m}^3$) ou dans le gazomètre agricole ($V = 660\text{ m}^3$). Les gazomètres (ou post digesteur) sont constitués d'une membrane en PVC résistant à 30 mbar.

En première approche, ce scénario peut-être assimilé à l'explosion à l'air libre d'un mélange stœchiométrique de biogaz et d'air.

Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 4 (surpression maximale de 100 mbar). L'éclatement du digesteur entraîne les effets de pression présentés dans le tableau 20 suivant :

	Gazomètre industriel	Gazomètre agricole (ou de taille semi industrielle)
	$V = 2\,000\text{ m}^3$ / $V = 4\,600\text{ m}^3$	$V = 660\text{ m}^3$
Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	-	-
140	-	-
50	50 / 70	35
20	130 / 175	90

Tableau 20 : Seuils d'effets de pression suite à l'explosion de l'ATEX interne dans un gazomètre

4.3.7 EXPLOSION DE L'ATEX FORMEE SUITE A LA RUINE DU GAZOMETRE

La ruine du gazomètre industriel ($V = 2\,000\text{ m}^3$, $V = 4\,600\text{ m}^3$) ou du gazomètre agricole ($V = 660\text{ m}^3$) contenant du biogaz entraîne la libération du volume de biogaz dans l'atmosphère. Le nuage inflammable prend approximativement la forme d'une sphère puis, le nuage se déplace dans le sens du vent, tout en s'élevant et en se diluant.

L'inflammation du nuage entraîne la formation d'une boule de feu de l'ordre d'une vingtaine de mètres de diamètre. La combustion rapide du nuage, à une vitesse de plusieurs dizaines de m/s, produit une onde de pression susceptible de se propager dans l'environnement sur de grandes distances. Les effets de pression de l'explosion du nuage sont déterminés à l'aide de la méthode Multi-Energie.

Pour cette raison, l'évaluation des effets de pression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence de 4 (surpression maximale de 100 mbar). L'éclatement du digesteur à 100 mbar entraîne les effets de pression présentés dans le tableau 21 suivant :

	Gazomètre industriel	Gazomètre agricole (ou de taille semi industrielle)
	V = 2 000 m ³ / V = 4 600 m ³	V = 660 m ³
Seuil de surpression (mbar)	Distance d'atteinte du seuil (m)	Distance d'atteinte du seuil (m)
200	-	-
140	-	-
50	110 / 155	55
20	280 / 390	200

Tableau 21 : Seuils d'effets de pression suite à la ruine d'un gazomètre libérant le biogaz et à l'explosion de l'ATEX

Pour ce scénario relatif à la ruine du gazomètre, on prend comme hypothèse l'inflammation de l'ATEX formée à l'issue de la ruine du gazomètre. En cas de non inflammation de l'atmosphère libérée, des effets toxiques seront alors générés s'il s'agit de biogaz brut ou seront négligeables dans le cas de biogaz épuré (cas le plus probable dans la mesure où à terme dans le cadre de l'injection proche du biométhane dans le réseau GrdF, le gazomètre servira à stocker du biogaz épuré).

5. CONCLUSION

La présente étude a consisté à réaliser les calculs des distances d'effets (thermiques, surpressions, toxiques) des principaux phénomènes dangereux représentatifs des installations type industrielles et agricoles.

Les scénarios accidentels suivants ont été retenus pour une configuration industrielle et/ou agricole :

- Rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'extérieur ;
- Explosion dans un local industriel de compression de biogaz liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local ;
- Explosion dans un local de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'intérieur de ce local ;
- Explosion dans un local agricole de séchage liée à une rupture guillotine d'une canalisation de gaz de ville située à l'intérieur de ce local ;
- Explosion dans un digesteur industriel ou agricole en fonctionnement normal et à vide ;
- Explosion de l'ATEX interne dans un gazomètre agricole ou industriel ;
- Explosion de l'ATEX formée suite à la ruine du gazomètre.

Pour le premier scénario, les distances d'effets de surpression, d'effets thermiques et d'effets toxiques ont été modélisées. Pour les autres scénarios, seules les distances d'effets d'explosion primaires ont été déterminées dans la mesure où la liste des scénarios dans le cadre de cette étude était limitée à quelques scénarios. Cependant, des calculs de modélisation liés aux effets thermiques et aux explosions secondaires suite à l'ouverture du local sont à prévoir : ces calculs devront alors être évalués dans le cadre d'une étude de dangers réglementaire plus spécifique.

Pour le dernier scénario relatif à la ruine du gazomètre, on prend comme hypothèse l'inflammation de l'ATEX formée à l'issue de la ruine du gazomètre. En cas de non inflammation de l'atmosphère libérée, des effets toxiques seront alors générés s'il s'agit de biogaz brut ou seront négligeables dans le cas de biogaz épuré (cas le plus probable dans la mesure où, à terme dans le cadre de l'injection proche du biométhane dans le réseau GrdF, le gazomètre servira à stocker du biogaz épuré).

Les résultats des calculs sont donc donnés à titre indicatif pour pouvoir obtenir une estimation des conséquences accidentelles des principaux scénarios redoutés.

Les biogaz bruts issus de la méthanisation agricole peuvent générer des distances d'effets toxiques bien supérieures à celles occasionnées par les biogaz bruts issus de la méthanisation d'ordures ménagères ou de boues de station d'épuration puisque leurs teneurs moyennes résiduelles en H₂S est de l'ordre de 3 à 8 fois supérieur.

Il existe en général des traitements d'épuration d'H₂S simples de gaz bruts (par introduction d'air) qui ramènent la composition résiduelle en H₂S à quelques dizaines de ppm. La teneur en H₂S du biogaz épuré (< 100 ppm) reste en deçà des seuils des effets toxiques pour une durée d'exposition de 10 minutes ou de 30 minutes ; leurs modélisations d'effets toxiques ne sont pas réalisées.

La modélisation de leurs conséquences accidentelles adaptée à la physique du phénomène (ou par une approche plus qualitative) a permis d'évaluer les différentes distances d'effets correspondant aux seuils réglementaires.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel (AFSSET, 29/10/2008), www.afsset.fr.
2. L. DUPONT (INERIS), *Explosion characteristics of synthesised biogas at various temperatures*, Journal of Hazardous Materials, 2006.
3. INERIS, Janvier 2008, N° DRA-07-88414-10586B, Etude des risques liés à l'exploitation des méthaniseurs agricoles (MEEDDM).
4. 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 (JO du 7 octobre 2005).
5. Circulaire n°DPPR/SEI2/MM-05-0316 du 7 octobre 2005 relative aux Installations classées - Diffusion de l'arrêté ministériel 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 (BOMEDD n°05/21 du 15 novembre 2005).

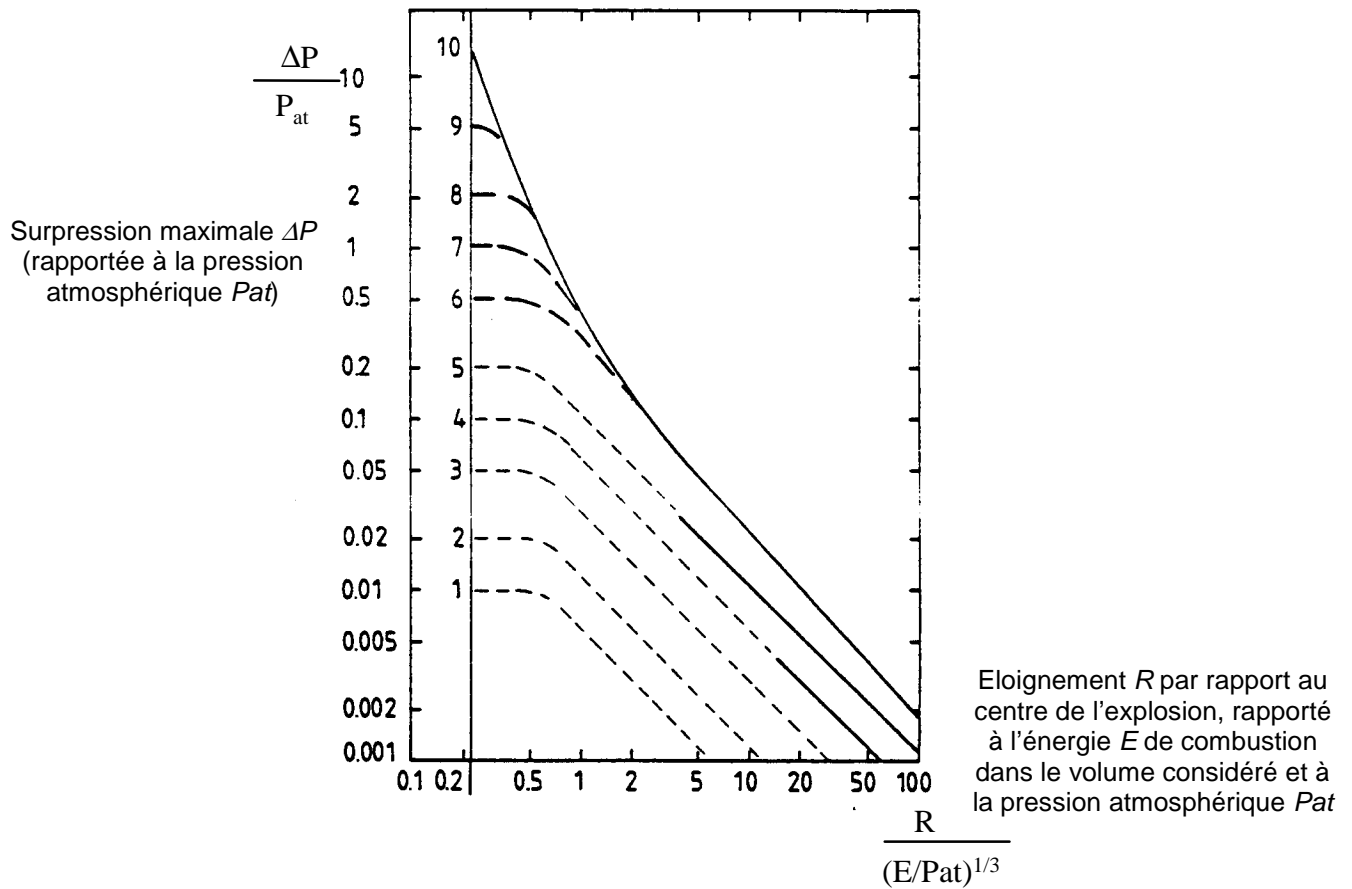
7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Présentation de la méthode multi-énergie	2
Annexe 2	Présentation du logiciel de modélisation EFFEX	4

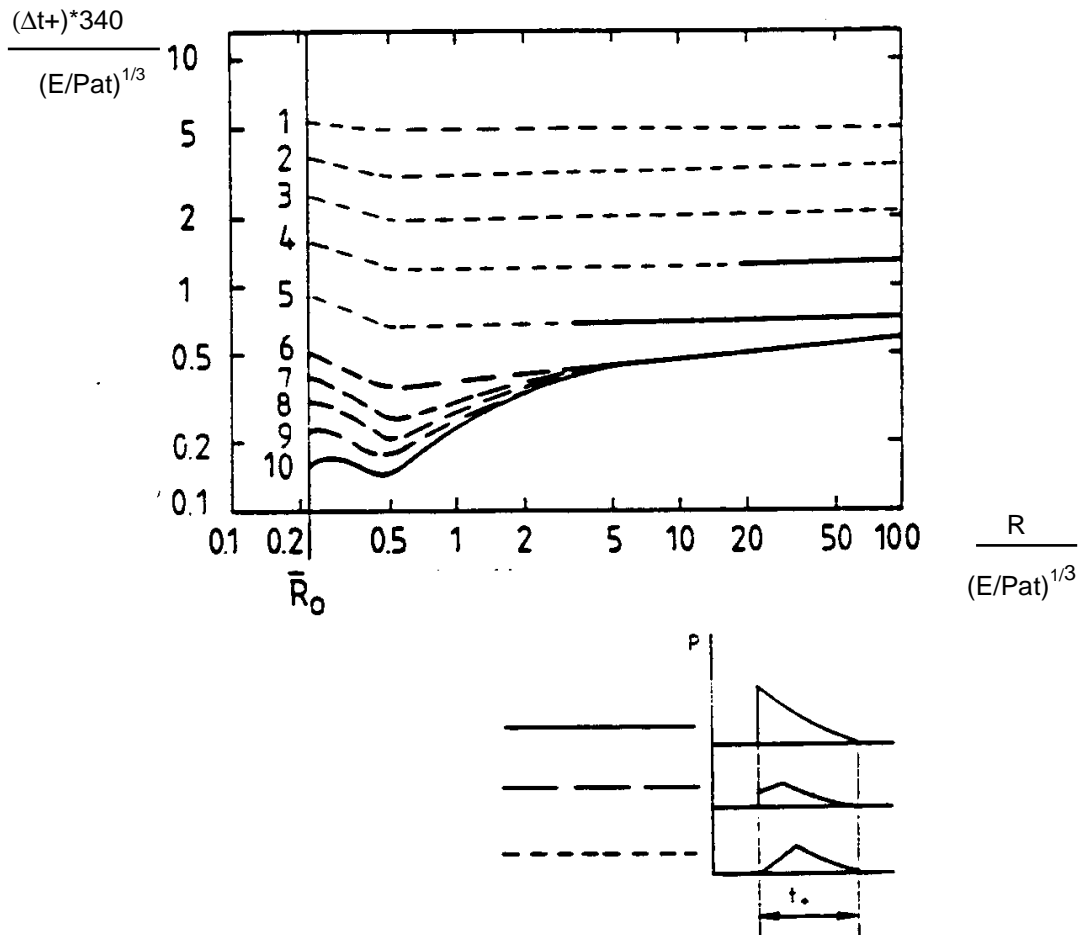
ANNEXE 1 :
Présentation de la méthode MULTI ENERGIE

PRESENTATION DE LA METHODE MULTI-ENERGIE

Une méthode couramment employée et bien acceptée (Mouilleau et Lechaudel, 1999) pour évaluer les effets d'une explosion de gaz aérienne a été mise au point dans les années 1980 (Van den Berg, 1984) et constamment améliorée depuis. Il s'agit de la méthode dite « Multi-Energy ». L'idée centrale est qu'une explosion de gaz produit des effets d'autant plus importants qu'elle se développe dans un environnement encombré ou turbulent dans lequel la flamme peut se propager rapidement, et qu'en dehors de ces zones, les effets de pression associés à la propagation de la flamme sont minimes. Pour une situation réelle où la dimension maximum du nuage explosif a été préalablement estimée, on repère les endroits où la densité d'obstacles ou le degré de turbulence du nuage sont susceptibles d'être importants et on modélise l'explosion globale par une succession d'impulsions de pression engendrées par la propagation de la flamme à travers ces zones. En fait, tout se passe comme s'il n'y avait pas une, mais plusieurs explosions. On associe à chaque explosion « élémentaire » un indice de violence sur une échelle de 1 à 10 qui représente la surpression maximum qui peut être obtenue dans la zone associée (voir figure page suivante). Outre ces considérations géométriques la réactivité propre du gaz inflammable doit être prise en considération.



Abaque de la méthode Multi-Energy, donnant les surpressions ΔP engendrées par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosifs hémisphériques posés au sol (Van den Berg, 1984).



Abaque de la méthode Multi-Energy, donnant la durée de phase positive du signal de pression engendré par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosifs hémisphériques posés au sol (Van den Berg, 1984).

Références :

Mouilleau, Lechaudel, 1999 : Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre, rapport INERIS DRA YMo/YMo 1999-20433.

Van den Berg, 1984 : The Multi-Energy Method, a framework for vapour cloud explosion blast prediction, Rapport TNO-PML n°1984 -C72.

ANNEXE 2

Présentation du logiciel de modélisation EFFEX.

Introduction

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

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

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

EFFEX est développé par l'INERIS depuis le début des années 1990. Initialement dédié aux explosions de poussières, son extension aux explosions de gaz est en cours.

Caractéristiques principales

Principe de la modélisation des explosions en enceinte :

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

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

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

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

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

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

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

On considère à l'heure actuelle que la « portance » des fragments est négligeable et que ces débris ne sont pas animés d'un mouvement de rotation significatif. On tient compte de l'évolution de la force de poussée en fonction de la position des fragments par rapport au jet de produits de l'explosion.

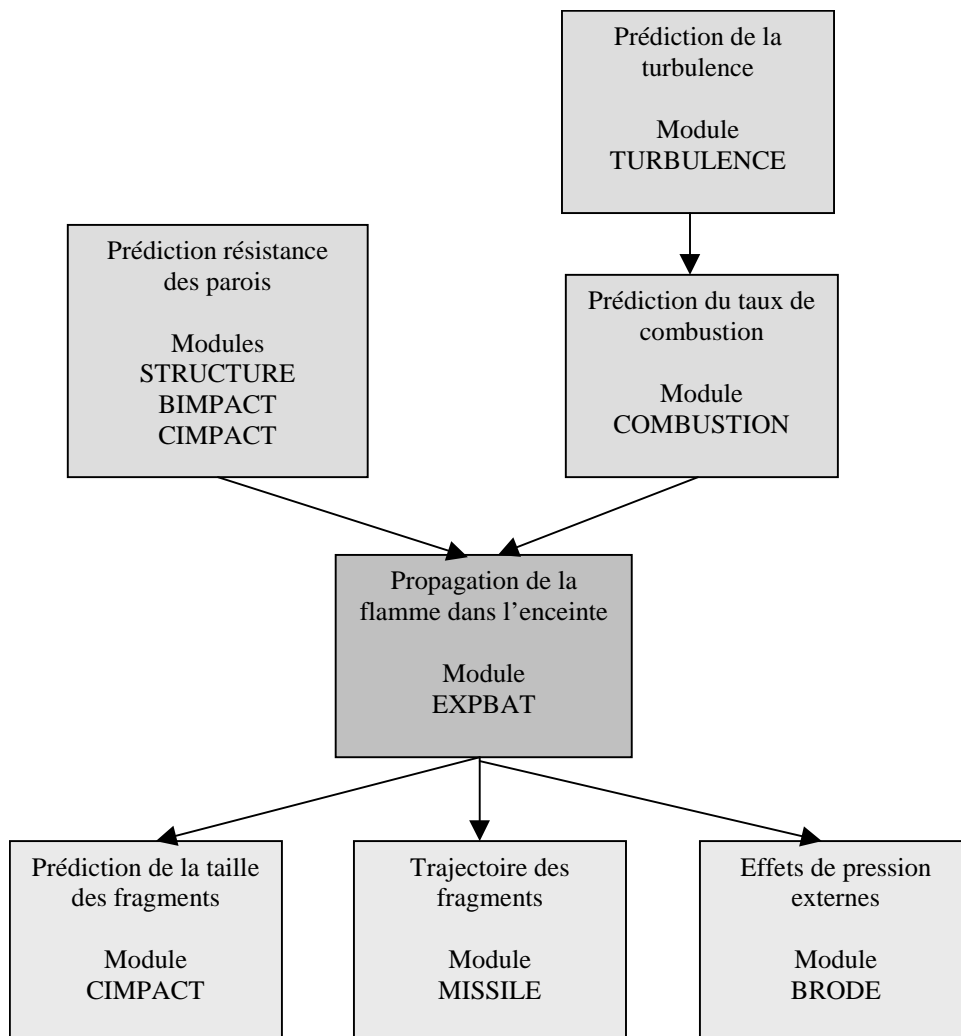
La trajectoire des fragments et ses caractéristiques (vitesse, orientation) sont calculées à partir des équations de bilan des forces.

Architecture et méthodes de résolution :

EFFEX est composé de huit modules qui permettent d'évaluer et de prédire :

- la résistance des structures,
- les propriétés du mélange inflammable dans l'enceinte (réactivité, turbulence, taux de combustion)
- les caractéristiques de la propagation de la flamme dans l'enceinte,
- la balistique des fragments.

L'organigramme qui suit présente schématiquement l'enchaînement de ces modules.



Les modules EXPBAT, MISSILE et CIMPACT sont des exécutables en langage compilé. Les autres modules se présentent sous la forme de feuilles de calcul EXCEL. Le tout fonctionne dans un environnement Windows.

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

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

Données d'entrée et de sortie :

Les données d'entrées du module STRUCTURE sont :

- les dimensions de l'enceinte,
- les surfaces ouvertes,
- la nature des parois (matériau, densité, épaisseur)

Les données d'entrées des modules COMBUSTION et TURBULENCE sont :

- les caractéristiques de la fuite (pression, diamètre de l'orifice)
- la localisation de la fuite dans le bâtiment,
- la vitesse fondamentale de combustion

Les résultats de calcul sont :

- l'évolution temporelle de la pression dans l'enceinte (module EXPBAT)
- la trajectoire et la vitesse des fragments (module MISSILE)
- la surpression externe en fonction de la distance (module BRODE)

Types d'applications

Le logiciel EFFEX peut être utilisé pour la résolution de tous les problèmes d'explosions en enceinte. Il permet le calcul des effets externe de l'explosion, le dimensionnement d'événements, le calcul de l'explosion externe s'il y a lieu.

A l'heure actuelle, les principales limitations du logiciel sont :

- la non prise en compte des obstacles présents dans l'enceinte,
- la non prise en compte des gradients de concentration.

Le logiciel n'est pas adapté au calcul d'explosion d'un très petit volume inflammable dans un grand bâtiment.

Exemples d'applications réalisées à l'inertis

Le logiciel est utilisé de manière industrielle dans le domaine des explosions de poussières en enceintes, en particulier pour les études réglementaires des silos de céréales.

Dans le domaine des explosions de gaz, il est fréquemment utilisé pour évaluer la tenue à l'explosion des bâtiments susceptible d'être le siège d'une fuite de gaz.

EFFEX peut également être utilisé de manière itérative pour calculer la propagation d'une explosion d'une enceinte à une autre.

Eléments de VALIDATION

Le logiciel EFFEX n'a pas été développé sous assurance qualité.

Les performances du code ont été testées par rapport :

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

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

Les cas de validations sont décrits dans le rapport de présentation et de validation du logiciel (Proust, 2000). On peut citer :

- l'accident de Boiry-Ste-Rictrude (1982),
- l'accident de Blaye (1997).

L'utilisation d'EFFEX est appropriée pour résoudre les problèmes d'explosions en enceinte, avec les limites suivantes :

- non prise en compte d'obstacles dans l'enceinte,
- non prise en compte des éventuels gradients de concentration dans l'enceinte. En particulier, EFFEX est inadapté au calcul d'explosion d'un très petit volume inflammable dans un grand bâtiment.

References bibliographiques

- PROUST Ch., 2000 : Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement : EFFEX, un outil de simulation, rapport INERIS-DRA CPr/CPr 00-22751, disponible sur www.ineris.fr.
- LEPRETTE E., PROUST Ch. 2005 : Phénoménologie des explosions secondaires, rapport INERIS-DRA.