(ID Modèle = 454913)

Ineris - 201652 - 2437679 - v2.0

26/01/2021

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

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction des Risques Accidentels

Rédaction : EVANNO Sebastien - HEBRARD JEROME

Vérification : LEPRETTE EMMANUEL; STOUVENEL MICKAEL; GENTILHOMME OLIVIER; DUPLANTIER STEPHANE

Approbation : Document approuvé le 26/01/2021 par PIQUETTE BERNARD

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Membres du Groupe de travail animé par l'Ineris en 2019 et 2020 (Bionerval, Bureau Veritas, Cabinet Merlin, Club Biogaz, OTV, SENG, SUEZ, VEOLIA Water).

Table des matières

1 Glossaire 6
2 Introduction 8
3 Présentation des installations et définition des scénarios 10
3.1 Description succincte des installations de méthanisation 10
3.1.1 Stockage et préparation des substrats 10
3.1.2 Prétraitement et préparation (mélange) 11
3.1.3 Digestion 11
3.1.4 Post digestion 12
3.1.5 Stockage et valorisation du digestat 12
3.1.6 Stockage du biogaz brut 12
3.1.7 Prétraitement du biogaz brut 12
3.1.8 Valorisation du biogaz brut prétraité 13
3.2 Retour d'expérience lié aux activités de méthanisation 14
3.3 Réglementation ICPE applicable aux installations de méthanisation 20
3.4 Dangers liés au biogaz et aux installations de méthanisation 21
3.4.1 Dangers liés au biogaz 21
3.4.2 Risques principaux liés aux installations de méthanisation 24
3.5 Définition des scénarios 27
4 Modélisation des phénomènes dangereux 28
4.1 Composition du biogaz retenue pour la modélisation des phénomènes dangereux 30
4.2 Modèles utilisés 30
4.2.1 Dispersion atmosphérique 30
4.2.2 Effets de surpression des UVCE 33
4.2.3 Modélisation des jets enflammés 35
4.2.4 Effets de pression dus aux explosions de bâtiments et digesteurs 38
4.3 Seuils réglementaires 38
4.3.1 Effets sur les personnes 39
4.3.2 Effets sur les structures 40
4.4 Modélisations des scénarios de rupture de canalisations 41
4.4.1 Données d'entrée 41
4.4.2 Distances d'effets 42
4.5 Modélisations des scénarios liés aux digesteurs 44
4.5.1 Description du phénomène physique 44
4.5.2 Définitions des scénarios 45
4.5.3 Données d'entrée 46
4.5.4 Modélisations 46
4.6 Modélisations des scénarios liés aux gazomètres 50
4.6.1 Explosion du gazomètre 51
4.6.2 Ruine du gazomètre 52
4.7 Explosion dans un local technique 54

5 Conclusion 56
6 Annexes 58

Résumé

En 2019 et en 2020, l'Ineris a animé trois réunions d'un groupe de travail (GT), rassemblant plusieurs professionnels de la méthanisation (VEOLIA, SUEZ, Bureau Véritas, OTV, Cabinet Merlin, Club Biogaz…), afin d'échanger sur les pratiques de modélisation du scénario d'explosion du digesteur et d'homogénéiser celles-ci. En effet, certaines méthodes ne sont pas toujours complètement adaptées aux cas traités, rendant la tâche des inspecteurs des installations classées plus délicate et pouvant désavantager certains industriels par rapport à d'autres dans la conception de leurs installations. Par exemple, le calcul des effets de l'explosion externe du nuage inflammable éjecté par les évents lors de l'explosion du digesteur (explosion secondaire) n'est pas toujours réalisé par les industriels ou les bureaux d'étude, le plus souvent par manque de modèles adaptés.

Sur la base de ces échanges et en accord avec la profession, les travaux menés ont abouti à la mise à jour du rapport n° DRA-09-101660-12814A et intitulé « Scénarios accidentels et modélisation des distances d'effets associés pour des installations de méthanisation de taille agricole et industrielle ». Ce document reprend donc les éléments présentés dans la version A, avec une première partie consacrée à la présentation succincte des installations, la réglementation applicable, une présentation des dangers liés au biogaz et une analyse du retour d'expérience, et une seconde partie traitant des modélisations des phénomènes dangereux des principaux scénarios accidentels généralement étudiés (scénarios majeurs), en considérant un plus large éventail de configurations (en particulier pour les scénarios impliquant les équipements de transferts de flux et de stockages). Cette partie inclut la méthode de calcul simplifiée pour traiter le cas des digesteurs et qui a été l'un des principaux sujets d'échange du groupe de travail.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Opération Biocombustible_Scénarios accidentels et modélisation des distances d'effets, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 201652 - 2437679 - v2.0,

Mots-clés :

Biogaz, distances d'effets, explosion, incendie, H_2S, modélisation.

1 Glossaire

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

ATEX : ATmosphère EXplosive,

Distance à la LIE : La distance à la LIE (limite inférieure d'explosibilité) correspond à la distance maximale atteinte par le nuage de gaz dont la concentration est supérieure à la LIE. Elle est comptée à partir du point de rejet,

BP : Basse Pression,

C : Compresseur,

CIVE : Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique,

D : Digesteur,

DLF : Dynamic Load Factor,

DN : Diamètre nominal,

DRA : Direction des Risques Accidentels,

DRC : Direction des Risques Chroniques,

G : Gazomètre,

H_2S : Hydrogène sulfuré,

HP : Haute Pression,

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

Kg : Vitesse maximale de montée en pression d'une explosion de gaz à volume constant (déterminée selon la norme PR NF EN 15967),

LIE : Limite Inférieure d'Explosibilité,

LSE : Limite Supérieure d'Explosibilité,

Masse inflammable (kg) : Il s'agit de la masse de produit inflammable contenue dans le nuage inflammable,

Mésophile : Microorganisme qui peut vivre à des températures variant de 20 à 45 °C et dont le développement est optimal à 37 °C,

MTES : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire,

P : Pression,

Pmax : Pression maximale d'une explosion,

Rp : Réservoir sous pression,

SEI : Seuil des Effets Irréversibles,

SEL : Seuil des Effets Létaux,

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs,

SPAn : Sous-Produits Animaux qui sont classés en trois catégories selon les risques qu'ils représentent pour la santé publique et animale,

STEP : STation d'ÉPuration des eaux usées,

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[1] : Microorganisme qui peut vivre à des températures variant de 40 à 65 °C et dont le développement est optimal à 55 °C,

T : Température,

TNT : Trinitrotoluène,

UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion : explosion de gaz ou de vapeur en l'absence de confinement,

Vitesse fondamentale de combustion : 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.

[1] Mésophile : entre 20°C et 40°C

2 Introduction

Dès les premières étapes de conception d'une unité de méthanisation, il s'avère utile pour les porteurs de projet de disposer d'une première évaluation des distances d'effets (thermique, explosion, toxique) liées aux conséquences de plusieurs situations accidentelles afin de sélectionner les emplacements des futures installations et les principales contraintes de sécurité à prendre en compte. Ces données peuvent être aussi particulièrement utiles aux pouvoirs publics et aux industriels. En effet, selon le contexte local, les distances d'effets génériques présentées dans le cadre d'un avant-projet peuvent sortir du périmètre du site. Ainsi, il est important que les calculs de modélisation de distances d'effets (thermique, explosion, toxique) soient réalisés à partir de données d'entrée précises.

En 2009, l'Ineris a réalisé, dans le cadre de l'opération A du programme DRA–DRC 93, des modélisations des distances d'effets d'explosion et de dispersion toxique des scénarios majorants pour les principaux cas types rencontrés sur des sites de taille agricole et industrielle (cf. rapport Ineris-DRA-09-101660-12814A[2]). Les scénarios accidentels concernaient alors trois équipements principaux d'une unité de méthanisation mettant en œuvre du biogaz :

- le digesteur (aussi appelé méthaniseur),
- le gazomètre (organe de stockage de biogaz),
- et les canalisations de transfert de biogaz en aérien et dans des locaux.

Depuis ces dix dernières années, les unités de méthanisation se sont développées en France (passant de quelques unités à plusieurs centaines) avec des technologies de digesteurs se diversifiant de façon importante (matériaux utilisés, techniques de mélange, techniques de récupération du biogaz, présence d'équipement de mitigation, etc.).

Lors d'échanges avec des bureaux d'études et des industriels sur les techniques de modélisation d'une explosion de digesteur, l'Ineris a constaté une grande hétérogénéité dans les méthodes de calculs utilisées. Certaines méthodes ne sont pas toujours complètement adaptées aux cas traités, rendant la tâche des inspecteurs des installations classées plus délicate, pouvant désavantager certains industriels par rapport à d'autres dans la conception de leurs installations. Par exemple, le calcul des effets de l'explosion externe du nuage inflammable éjecté par les évents lors de l'explosion du digesteur (explosion secondaire) n'est pas toujours réalisé par les industriels ou les bureaux d'étude, le plus souvent par manque de modèles adaptés.

A noter que la version A de ce rapport est utilisée par les DREALs comme un document de référence durant les instructions réglementaires de dossiers d'autorisation d'exploiter. Or, les distances d'effets affichées dans ce rapport par l'Ineris étaient basées sur des données d'entrée majorantes car peu d'informations étaient alors disponibles sur les procédés ; ne permettant de prendre en compte ni la diversité des configurations, ni les évolutions technologiques, ni les nouveaux moyens de protections.

En 2019 et en 2020, dans le cadre de l'opération C du programme DRA 06 qui porte sur les risques liés aux procédés production de biocombustible de méthanisation de la biomasse et des déchets, l'Ineris a animé trois réunions d'un groupe de travail[3], rassemblant plusieurs professionnels et associations du domaine de la méthanisation (VEOLIA, SUEZ, Bureau Véritas, OTV, Cabinet Merlin, Club Biogaz, etc…), afin d'échanger sur les technologies et sur les pratiques de modélisation du scénario d'explosion du digesteur. Il s'agissait notamment d'identifier :

- les configurations de digesteur les plus courantes et/ou les plus problématiques,
- les paramètres les plus critiques (géométrie, type d'évent ou de surface soufflable, etc.),
- les écarts dans les méthodes de modélisation.

---

[2] « Scénarios accidentels et modélisation des distances d'effets associés pour des installations de méthanisation de taille agricole et industrielle », Ineris-DRA-09-101660-12814A (version A), 2009. Rapport accessible sur le site www.ineris.fr.

[3] Homogénéisation des pratiques de calcul des distances d'effets d'explosion d'un digesteur (Ineris - 179180 - 2022239 - v1.0)

La réactualisation de la version A du livrable n° Ineris-DRA-09-101660-12814A a également été discutée et unanimement validée, sous réserve d'adopter une démarche moins générique et en essayant de considérer un éventail plus large de configurations.

Ce document reprend donc les éléments présentés dans la version A, avec une première partie consacrée à la présentation succincte des installations, la réglementation applicable, une présentation des dangers liés au biogaz et une analyse du retour d'expérience, et une seconde partie traitant des modélisations des phénomènes dangereux des principaux scénarios accidentels généralement étudiés (scénarios majeurs), en considérant un plus large éventail de configurations (en particulier pour les scénarios impliquant les équipements de transferts de flux et de stockages). Les résultats des calculs présentés sont des ordres de grandeur de distances d'effet pour les principaux scénarios accidentels associés aux installations de méthanisation. Ils sont donnés à titre indicatif pour estimer les conséquences accidentelles des principaux scénarios redoutés. Des calculs plus affinés pourraient être réalisés au cas par cas.

Cette partie inclut la méthode de calcul simplifiée pour traiter le cas des digesteurs et qui a été l'un des principaux sujets d'échange du groupe de travail.

3 Présentation des installations et définition des scénarios

3.1 Description succincte des installations de méthanisation

La méthanisation a pour objectifs :

- le traitement d'effluents ou de déchets organiques ;
- et une double valorisation énergétique et de la matière des produits qui en sont issus : le biogaz et le digestat.

L'installation de méthanisation est décomposée ci-après par grandes étapes de production, à savoir : le stockage et la préparation des substrats, l'étape de digestion proprement dite, la gestion et la valorisation du digestat produit d'une part et le traitement et la valorisation du biogaz d'autre part.

La Figue 1 présente un schéma de fonctionnement des opérations unitaires d'une unité de méthanisation qui sont décrites ci-après.

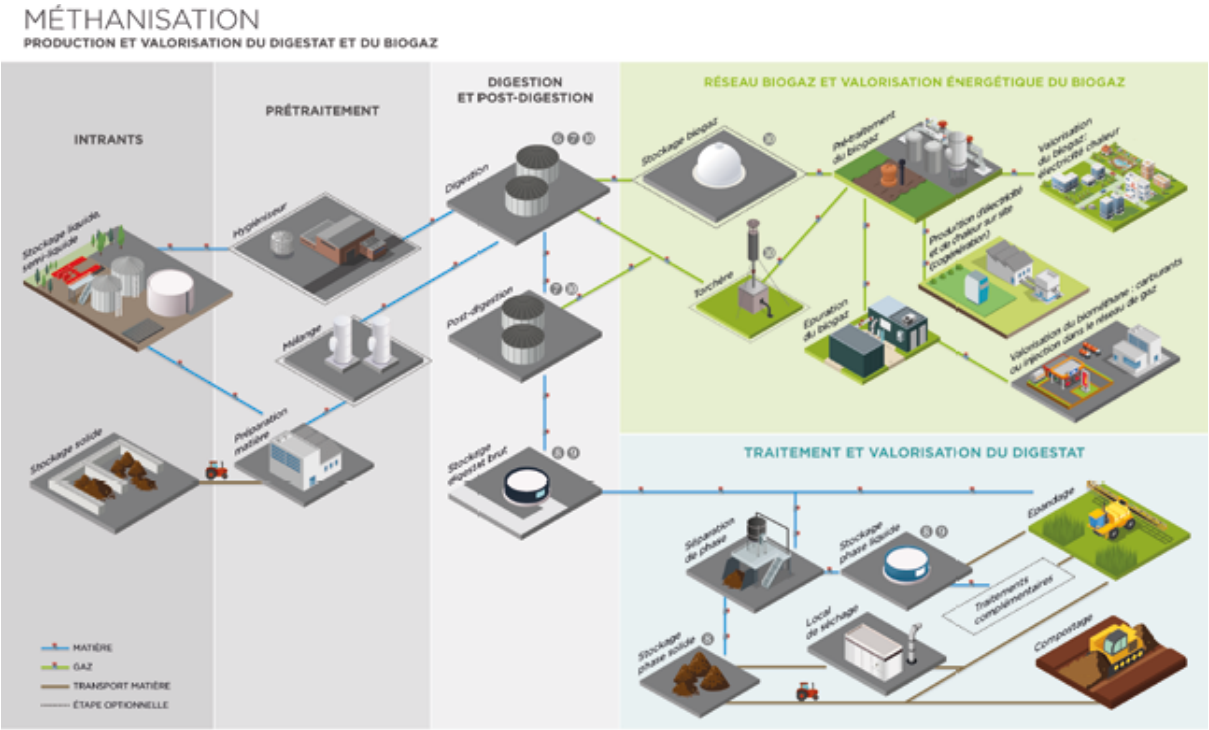


Figure 1 : Schéma de fonctionnement des opérations unitaires d'une unité de méthanisation

3.1.1 Stockage et préparation des substrats

Différents substrats sont utilisés dans la méthanisation agricole, territoriale, industrielle ou dans les stations d'épuration d'eaux usées (digestion de boues de STEP). Ils peuvent être classés en trois catégories : solides (biodéchets, ordures ménagères résiduelles, résidus agricoles dont CIVE[4] et résidus de cultures, fumiers, …), liquides (boues de STEP, lisier, déchets agro-alimentaires, lactosérum…) et graisseux (huiles végétales, graisses de flottation, etc.).

---

[4] Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique : culture implantée et récoltée entre deux cultures principales dans une rotation culturale.

Les substrats sont choisis de manière à garantir une qualité et une production suffisante de biogaz et de digestat. Pour ce faire, certains intrants à fort pouvoir méthanogène présentent un intérêt pour la rentabilité de l'installation (optimisation de la valorisation énergétique). De même, la présence de certains substrats est nécessaire pour faciliter la digestion elle-même (matières fibreuses, graisses, etc.).

3.1.2 Prétraitement et préparation (mélange)

Avant la phase d'introduction des intrants dans le digesteur, les substrats, en fonction de leur nature, sont soumis à des étapes de prétraitement avec différents objectifs :

- faciliter l'alimentation du digesteur (viscosité, prémélange solide / liquide),
- limiter l'introduction de corps étrangers (concassage, puits à cailloux...),
- faciliter la digestion en divisant la structure de la matière (broyage…),
- hygiéniser les sous-produits animaux (SPAn) pour des raisons sanitaires (étape mise en œuvre uniquement pour certains types de déchets),
- réduire la génération d'H2S dans le digesteur par ajout en amont du digesteur de chlorure ferrique, de sulfate ferreux, etc. dans les intrants.

Une fois prétraitées, ces matières sont envoyées en continu soit directement en digestion soit vers une étape de mélange. Cette dernière permet d'homogénéiser le mélange et de tester différentes recettes avant son introduction dans le digesteur. Elle garantit la stabilité du processus de digestion malgré la variabilité des substrats (qualité, quantité) potentiellement utilisés au cours de la vie de l'installation. Elle permet également de tester la compatibilité et la réactivité de nouveaux substrats au mélange, réactivité pouvant conduire par exemple à des phénomènes de moussage. Cette étape limite ainsi l'apparition de tels phénomènes dans le digesteur et permet d'adapter le dosage des différents substrats dans la ration pour garantir l'équilibre nutritionnel.

3.1.3 Digestion

Cette étape correspond à la transformation biologique des matières organiques introduites dans le digesteur et permet la production de biogaz et de digestat.

En fonction de la conception et de la technologie choisies, et notamment de la présence ou non de l'étape de mélange, plusieurs configurations d'alimentation du digesteur existent.

Une alimentation séparée des matières solides et liquides implique des équipements de type bols d'alimentation et trémies pour les solides, et pompes pour les liquides. L'alimentation du digesteur après mélange des substrats peut se faire par l'intermédiaire de pompes.

L'alimentation se fait en respectant les rations admissibles par le digesteur. La conduite du procédé par un logiciel de supervision se développe actuellement.

Plusieurs techniques de digestion en voie liquide ou semi-liquide existent. Elles sont classées en fonction de la température (mésophile, thermophile) et du mode de mélange (mécanique (axial, latéral), recirculation du digestat, réinjection du biogaz) pour assurer l'homogénéité au sein du digesteur.

Le mode mésophile (35-42°C) avec une agitation mécanique (mélangeur principal à axe vertical et brasseurs axiaux) est le plus courant en milieu agricole.
La composition du biogaz dépend principalement de la nature des intrants digérés et il est principalement constitué de méthane et de dioxyde de carbone et d'hydrogène sulfuré.
Par exemple, le biogaz agricole est constitué de méthane (50-65% vol.), de dioxyde de carbone (35 – 45% vol.), de vapeur d'eau (2-7 %v vol.) et d'éléments en traces tels que l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré (jusqu'à 8 000 ppm/ 12 000 mg/m^3), les composés organiques volatils, …

Le digestat conserve les éléments nutritifs des matières premières. Il est notamment constitué d'azote, de phosphore, de potassium, de soufre, de calcium, de magnésium. Il conserve également les éléments traces introduits par les substrats (tous les éléments traces métalliques et certains composés organiques) ou encore certains microorganismes présents initialement ou qui se sont développés au cours du processus.

3.1.4 Post digestion

L'étape de post-digestion est une étape essentielle pour stabiliser et améliorer l'innocuité du digestat et est notamment utilisée en méthanisation agricole. Elle permet aussi la production de biogaz supplémentaire obtenu par la digestion de la matière fermentescible résiduelle. La part de biogaz produite au niveau de la post-digestion correspond environ à 5 à 15 % du biogaz total. Cette étape est conçue sur le même principe que la digestion : elle est maintenue en température. La post-digestion constitue également une première étape de stockage du digestat.

3.1.5 Stockage et valorisation du digestat

En installation agricole, le digestat est majoritairement valorisé par épandage du digestat brut ou des différentes phases obtenues après séparation de phases. Il s'avère donc nécessaire de stocker le digestat brut ou les différentes phases plusieurs mois sur le site.

La séparation de phases du digestat brut permet de produire deux types de digestats : liquide et solide. Ces deux phases peuvent être directement épandues à des périodes différentes sur les terres cultivées ou les cultures, ou subir des traitements complémentaires en fonction des secteurs géographiques et des excédents potentiels en azote des sols.

Le digestat solide peut dans ce cas subir un traitement complémentaire par séchage (diminution du volume et des coûts de transport) ou par compostage.

Le digestat liquide peut également subir un traitement poussé (filtration membranaire, osmose inverse, évapo-concentration, traitement biologique, etc.). L'eau ainsi produite est rejetée en station d'épuration urbaine. Ce traitement est généralement coûteux donc applicable uniquement sur des installations de capacité relativement importante.

3.1.6 Stockage du biogaz brut

Le biogaz est normalement valorisé en continu. Le stockage du biogaz, soit au niveau du système digesteur / postdigesteur, soit dans un gazomètre (simple membrane, double membrane, à cloche, etc.), permet notamment de réguler l'équilibre entre la production du biogaz et son utilisation. Il sert ainsi à absorber le surplus de production ou à conserver le biogaz en cas d'arrêt des dispositifs de valorisation (chaudière, moteur cogénération, épuration, injection réseaux etc.). Il permet également de limiter les émissions de biogaz à l'atmosphère et les quantités brûlées (torchage).

3.1.7 Prétraitement du biogaz brut

Le prétraitement du biogaz brut (via des procédés physiques ou chimiques) permet de diminuer en grande partie sa teneur en vapeur d'eau (par condensation), en H_2S (injection d'un filet d'air ou ajouts $FeCl_3$, etc.) et en éléments polluants en trace (H_2S résiduel, COV, NH_3) par adsorption sur filtre à charbon afin :

- de limiter la corrosion chimique (eau + H_2S = H_2SO_4),
- d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz traité avant valorisation énergétique,
- d'optimiser le rendement énergétique de la valorisation,
- de préparer le biogaz avant l'étape d'épuration.

3.1.8 Valorisation du biogaz brut prétraité

Différents modes de valorisation du biogaz brut prétraité sont présentés succinctement ci-dessous :

- Production de chaleur (chaudière), production d'électricité et de chaleur par cogénération (moteur, turbine)

Le biogaz brut prétraité est généralement valorisé sur le site, soit par combustion directe (chaudière), soit par cogénération (production d'électricité et de chaleur).

Le module de cogénération est constitué d'un moteur à gaz et d'un alternateur pour produire l'électricité, et d'un système de récupération de chaleur perdue par le bloc moteur et dans les fumées. La cogénération permet de valoriser 35 % de l'énergie primaire du biogaz sous forme d'électricité, et jusqu'à 85 % du total, en tenant compte de la récupération de la chaleur produite et des pertes du système.

- Epuration du biogaz brut prétraité et injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel ou pour un usage carburant (GNV Vert)

Une valorisation alternative du biogaz se développe : l'épuration du biogaz en biométhane destiné à être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme carburant (GNV vert).

L'épuration du biogaz consiste à éliminer le CO_2 du biogaz brut prétraité afin d'augmenter la teneur en méthane, ce qui produit du biométhane, doté d'un pouvoir calorifique équivalent à celui du gaz naturel.

L'installation est généralement constituée d'un surpresseur, d'un groupe froid, de filtres à charbon actif (prétraitement), de compresseur et de l'équipement d'épuration.

Les trois principales technologies d'épuration du biogaz sont les suivantes :

- la perméation (procédé par séparation membranaire),
- l'absorption (procédé d'absorption physique par lavage à l'eau, procédé d'absorption physique avec solvant organique, procédé d'absorption chimique par lavage aux amines),
- l'adsorption (procédé PSA « Pressure Swing Adsorption »).

- Destruction du biogaz : torchère, chaudière d'appoint ou tout autre système équivalent

Une torchère est un équipement de sécurité permettant de brûler le biogaz en cas d'excès de production ou d'indisponibilité des équipements de valorisation. Elle est encore peu utilisée dans la filière de méthanisation agricole. Elle peut être à allumage automatique ou manuel.

Une torchère permet de ne pas rejeter directement du biogaz à l'atmosphère en cas d'indisponibilité temporaire des équipements de valorisation du biogaz (panne ou arrêt de la cogénération, épuration, injection, …ou en cas de production intensive de biogaz). Il s'agit d'un dispositif de sécurité et de protection environnementale. A noter qu'une chaudière d'appoint (de faible puissance) est parfois utilisée à la place de la torchère.

Réseau biogaz : ensemble de capacités, de tuyauteries et de dispositifs de régulation (vannes, purges…) qui transfère le biogaz entre les unités fonctionnelles de l'unité de méthanisation.

Réseau matières solides et liquides : système de capacités, de tuyauteries et de dispositifs de régulation (vannes, purges…) qui transfert les matières solides et liquides (intrants, digestats, eau de nettoyage…) entre les unités fonctionnelles de l'unité de méthanisation.

3.2 Retour d'expérience lié aux activités de méthanisation

Selon l'inventaire des incidents et accidents technologiques du BARPI[5] réalisé pour l'année 2019 :

« La filière méthanisation connaît, dans le cadre de la transition énergétique, un développement important au regard du double intérêt qu'il présente : le traitement de déchets, de sous-produits ou d'effluents allié à la production de biométhane. Les secteurs d'activité concernés sont divers et variés (production d'énergie, agriculture, stations d'épuration des eaux résiduaires, traitement des biodéchets et des boues d'épuration…)[6]. L'exploitation de la base ARIA montre que le traitement des déchets et des boues d'épuration a été un secteur accidentogène en 2019.

En effet, en 2019, les installations de méthanisation ont été à l'origine de 17 événements enregistrés, dont 8 accidents. Ce nombre d'événements, en léger repli par rapport à l'année 2018 (23), reste en cohérence avec la moyenne sur les trois dernières années (19 cas). Le nombre d'accidents reste lui-aussi similaire (9 en 2018, 10 en 2017).

35 % des phénomènes survenus sur les sites de méthanisation, recensés en 2019, sont des incendies. Des nuisances olfactives générées par des fuites de gaz ont également été recensées.

Des défauts matériels sont à l'origine de deux tiers des événements. Ils peuvent notamment être associés à des pertes de contrôle de procédé, qui provoquent la moitié des événements.

71 % des événements sont causés par des facteurs organisationnels et, pour la très grande majorité d'entre eux, à un défaut de maîtrise des risques.

L'ensemble des installations de méthanisation est concerné : installations de méthanisation agricole, installations de méthanisation en sortie des stations d'épuration et installations de méthanisation industrielle. Le développement de cette filière requiert une parfaite maîtrise des risques. Les exploitants doivent notamment s'assurer de la qualité de la conception de l'installation, veiller aux conditions d'exploitation et à leur pertinence mais aussi assurer un suivi et une maintenance rigoureuse des installations. »

En 2020, l'Ineris a réalisé un nouveau recensement des incidents et accidents survenus dans les unités de méthanisation sur une période allant de 1992 à 2017. Ce recensement a été effectué en utilisant la base ARIA et à partir des mots clefs suivants : digestat, méthanisation, biogaz et H_2S. A l'issue de ce travail, 137 évènements ont été identifiés, dont 116 en France et 21 à l'étranger (14 en Allemagne, 2 en Italie, 2 en Suisse, 2 en Autriche et 1 en Grande Bretagne). Les figures 2 à 5 suivantes présentent les principaux enseignements.

Les figures 2, 3, 4 et 5 présentent une synthèse graphique de l'analyse de la base ARIA du BARPI.

---

[5] https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/synthese/inventaire-des-incidents-et-accidents-technologiques-survenus-en-2019/

[6] Une synthèse des accidents survenus sur des méthaniseurs agricoles a été réalisée par l'Ineris dans le cadre d'une étude des risques liés à l'exploitation des méthaniseurs agricoles pour le MTES [Ineris, Janvier 2008, N° DRA-07-88414-10586B, Etude des risques liés à l'exploitation des méthaniseurs agricoles (MTES)], sur la base des installations présentes en Europe (notamment en Allemagne qui possède plus de 3 000 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).

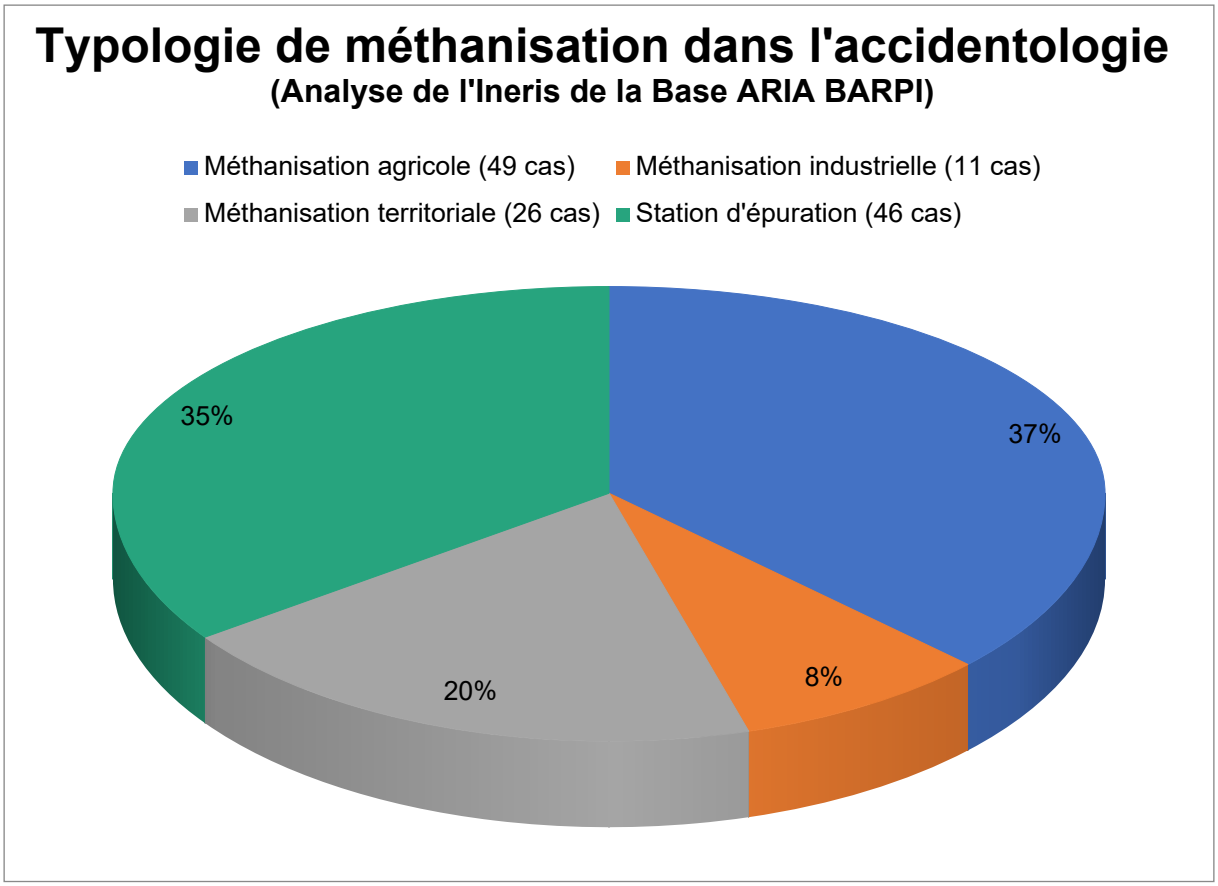


Figure 2 : Typologie de méthanisation dans l'accidentologie (Analyse de l'Ineris de la base ARIA BARPI)

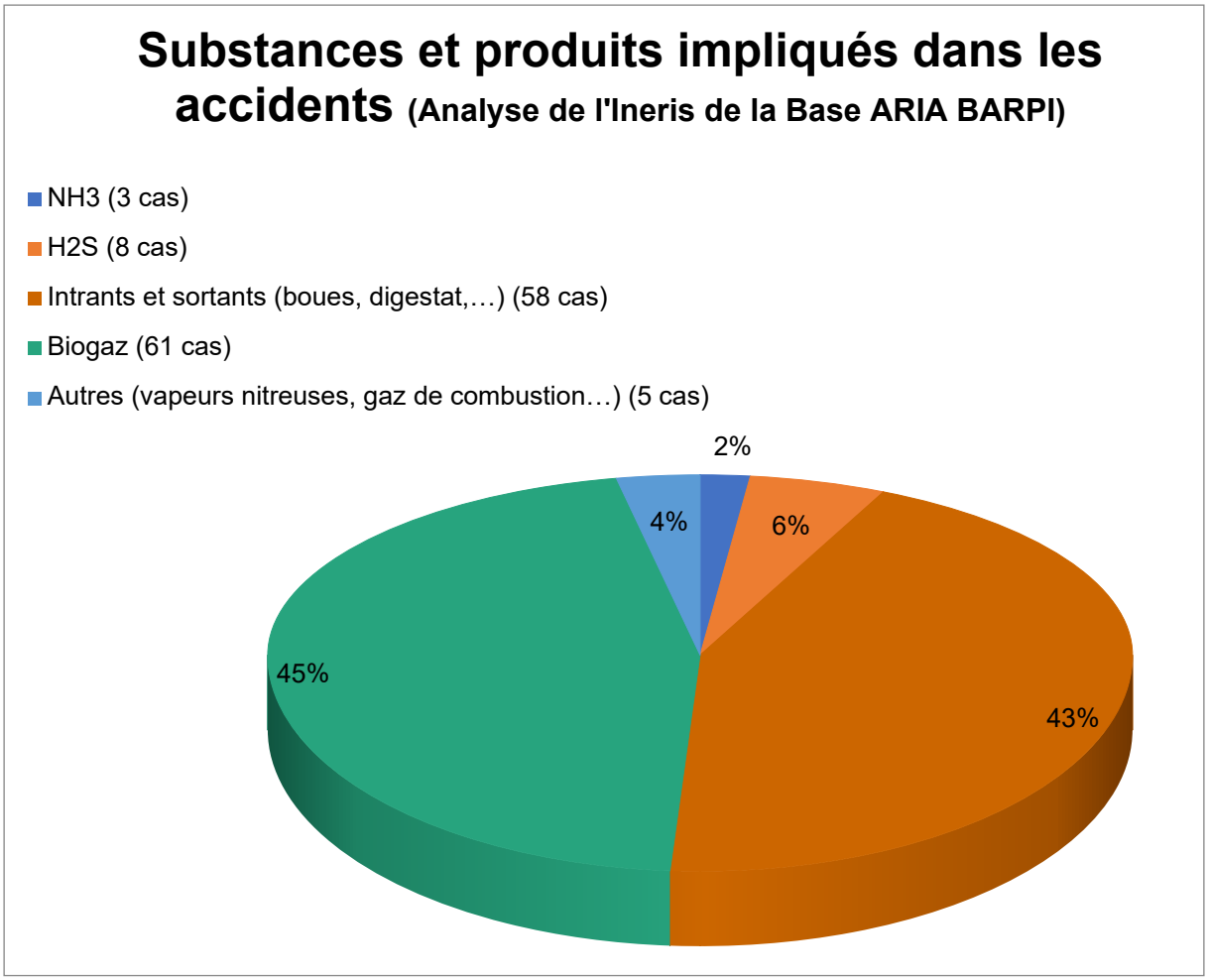


Figure 3 : Substances et produits impliqués dans les accidents en méthanisation (Analyse de l'Ineris de la base ARIA BARPI)

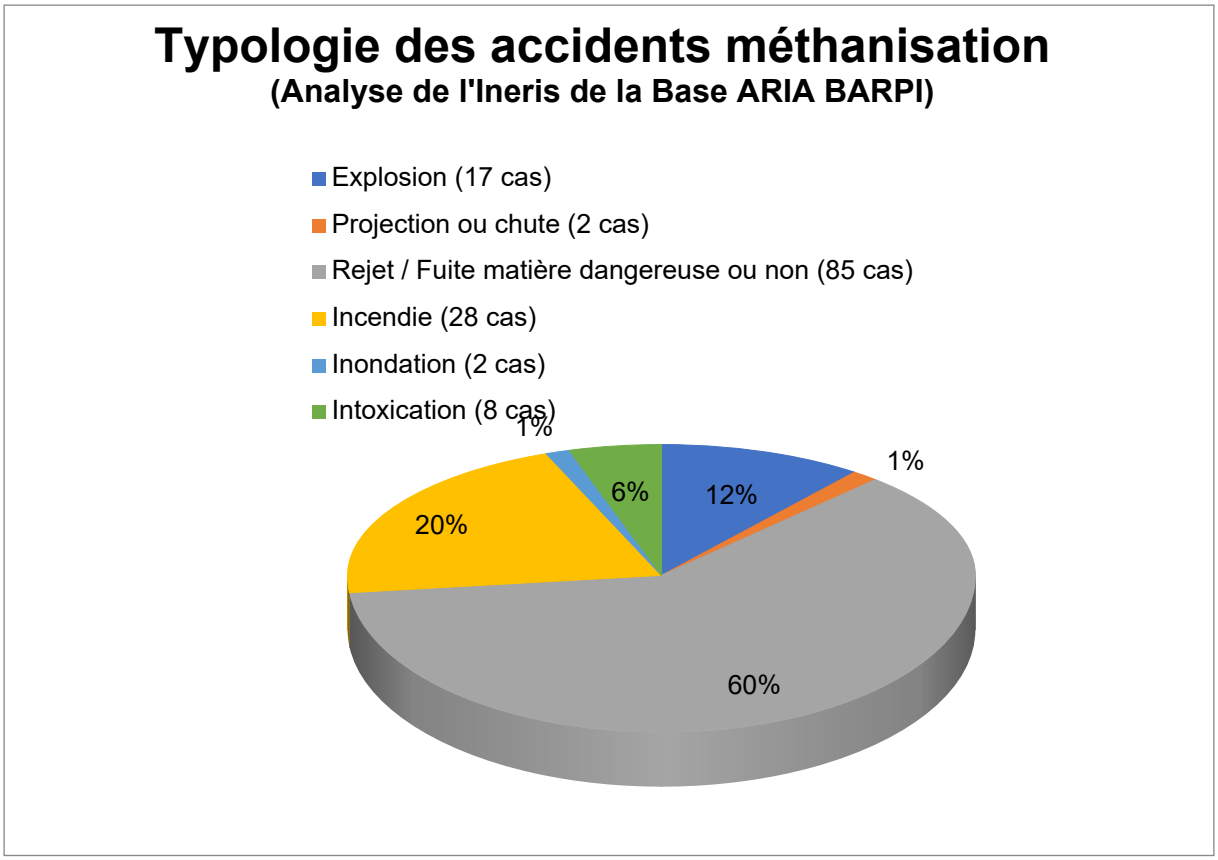


Figure 4 : Typologie des accidents en méthanisation (Analyse de l'Ineris de la base ARIA BARPI)

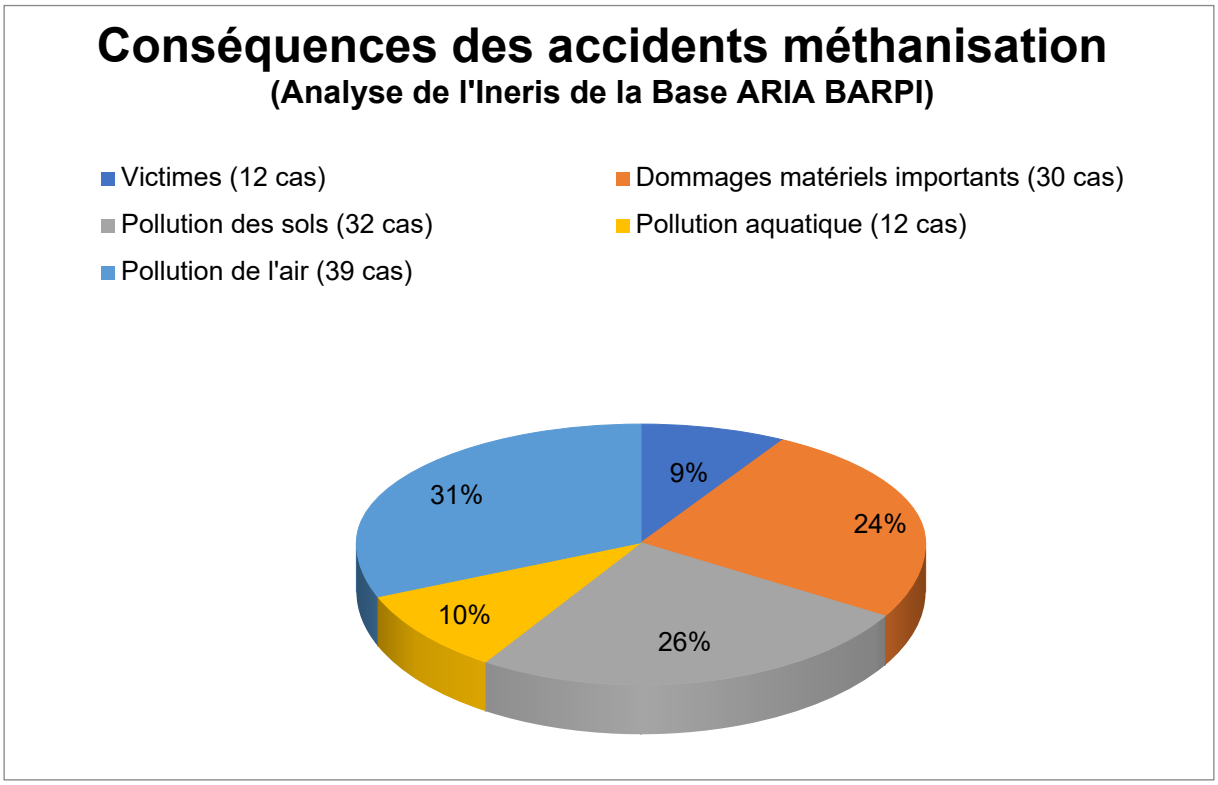


Figure 5 : Conséquence des accidents en méthanisation (Analyse de l'Ineris de la base ARIA BARPI)

Ces 137 évènements ont eu lieu dans des types variés d'unités de méthanisation : agricole, territoriale, industrielle et station d'épuration urbaine. Ces différents évènements sont listés dans l'encart suivant.

- Emissions gazeuses ou fuite de biogaz / rejet ou fuite de matières :

Quelques exemples de cas recensés : Fuites de biogaz sur une canalisation (N°44662), de vannes / joint (N°43522, N°44307, N°47799). Arrachement de conduite de biogaz (N°42731). Fuite de biogaz du digesteur (N°29407, 42923). Débâchage ou déchirure de membrane souple (N°40476, N°47764). Relargage de biogaz à la soupape de sécurité du digesteur suite à dysfonctionnement de la torchère (N°42739, N°47808). Emissions de NH_3 lors de la phase de stockage et de maturation du digestat (N°48883). Fuite de digestat et pollution de ruisseau (N°42341). Pollution aquatique suite à déversement de 400 000 l de lisier (N°42315). Déversement au sol de 5 000 L de lisiers suite à une défaillance d'une pompe par trop plein de remplissage d'une cuve à lisier (N°42317). Pollution aquatique suite à un écoulement de jus d'intrants (N°46437), suite à rupture d'un réservoir de lisier (N°42319). Débordement lié à un moussage dans un digesteur agricole (N°49169). Défaillance d'un joint sur une vanne provoquant le déversement de 1 600 m³ de substrat de fermentation de maïs d'une unité de production de biogaz (N°42320). Perte d'étanchéité du digesteur suite à usure prématurée de type corrosion chimique (N°41671, N°49287), etc.

- Incendie :

Quelques exemples de cas recensés : Incendie dans un silo de stockage de levure (N°42321). Incendie dans deux digesteurs agricoles (N°42342). Incendie d'origine malveillante (incendie volontaire) dans un hangar contenant des intrants (N°47601). Incendie d'origine électrique dans un local technique (N°45489, N°48605). Incendie d'une turbine de la centrale de cogénération (N°49015), etc.

- Explosion et/ou éclatement physique :

Quelques exemples de cas recensés : Explosion et incendie d'un digesteur dans une installation de méthanisation **(**N°**53866),** Explosion d'une cuve de stockage de biogaz (N°42322). Explosion suivie d'un incendie se produit dans l'unité de méthanisation d'une ferme laitière (N°42325). Explosion d'un digesteur en phase de démarrage (N°42314). Eclatement de deux digesteurs (N°32040) en cours de mise en service. Explosion de digesteur suite à travaux (N°46329, N°11345). Surpression dans le corps des digesteurs suite à un défaut de fonctionnement de la torchère et des soupapes de sécurité, dus au gel (N°42739), etc.

- Intoxication du personnel à des émanations d'H_2S :

Quelques exemples de cas recensés : Formation d'H_2S par mélanges de déchets incompatibles (N°21081). Décès et intoxication à l'H_2S d'opérateurs lors du nettoyage d'une fosse à lisier (N°**43729**). Emanations d'H_2S dans une usine de production de biogaz (N°15747, N°28200, N°31000). Chute mortelle d'un salarié dans une fosse à déchets suite à intoxication à l'H_2S (N°32381).

Les conséquences par ordre d'importance sont des dommages matériels importants (26 cas), la pollution de l'air (25 cas de rejet de biogaz à l'atmosphère), la pollution des sols (19 cas de rejet ou fuite de digestat), la pollution aquatique (10 cas de pollution de cours d'eau, consécutifs à un rejet ou fuite de digestat au sol) et des intoxications à l'H_2S (7 cas avec principalement des blessés et quelques décès).

Les principaux équipements impliqués sont le digesteur et post-digesteur (35%), les vannes et tuyauteries (18 %), les fosses et cuves (12 %), les dispositifs de rétention (10 % :(non-étanchéité ou absence de tels dispositifs), le système de contrôle et de commande (9% : défaillance du système de commande ou des capteurs associés), les gazomètres (8%), les torchères (8 %).

Les causes premières sont principalement dues aux défaillances et pannes d'équipements (60 %), aux erreurs opérateurs (20 %), aux agressions externes (15 % : vent, gel...), aux erreurs de sous-traitants (3 %) et aux réactions non contrôlées de formation d'H_2S suite à des mélanges d'intrants dans des fosses et cuves (2 %).

Les causes profondes sont principalement liées à un défaut ou à une insuffisance de la conception et des spécifications techniques (35 %), de l'encadrement de l'exploitation (25 %), de l'analyse des risques (20 %) et de la formation des opérateurs (20 %).

L'analyse de l'accidentologie relative à la filière méthanisation met en évidence les principaux scénarios accidentels suivants :

- rejet et fuite de matières (principalement du biogaz et du digestat) avec des impacts environnementaux (pollution des sols, de l'air, aquatique),
- incendie (auto-inflammation d'intrants, de filtre à charbon actif, incendie de combustible (huile thermique, panneaux d'isolation, etc.), incendie d'origine électrique, etc.
- explosion associée à une fuite de biogaz dans un espace confiné et/ou mal ventilé et explosion de digesteur.

.

3.3 Réglementation ICPE applicable aux installations de méthanisation

Les installations de méthanisation sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Elles sont soumises aux régimes de la déclaration avec contrôle périodique, de l'enregistrement ou de l'autorisation selon la capacité de production et la nature des intrants utilisés. Selon leur typologie elles peuvent relever des rubriques IC suivantes :

- IC 2781 : installations de méthanisation agricole. Une liste fermée d'intrants permet un classement en 2781-1 tandis que les autres déchets (exemple SPAn de catégorie 2) conduisent à un classement en 2781-2. Le classement définit le choix des régimes administratifs possibles et des exigences de prévention et de protection des impacts sur l'environnement à mettre en œuvre depuis la conception jusqu'à la fin de vie d'une installation ;
- IC 2750 : Station d'épuration collective d'eaux résiduaires industrielles en provenance d'au moins une installation classée soumise à autorisation ;
- IC 2751 : Station d'épuration collective de déjections animales ;
- IC 2760 : Station d'épuration mixte (recevant des eaux résiduaires domestiques et des eaux résiduaires industrielles) ayant une capacité nominale de traitement d'au moins 10 000 équivalents-habitants, lorsque la charge des eaux résiduaires industrielles en provenance d'installations classées autorisées est supérieure à 70% de la capacité de la station en DCO.

D'autres réglementations viennent compléter ce cadre applicable, en particulier, pour :

- le stockage et la valorisation sur site du biogaz : le biogaz est potentiellement soumis à d'autres rubriques de la réglementation des ICPE comme par exemple les rubriques ICPE 4310 (« Gaz inflammables catégorie 1 et 2 », en fonction de la quantité stockée) et ICPE 2910 (« Combustion », selon la puissance de l'installation de combustion) ;
- le raccordement et l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel : les textes régissant cette activité définissent notamment les exigences de qualité relatives au biométhane et les conditions de vente (biométhane et/ou électricité) ;
- la valorisation des digestats : la valorisation du digestat ou de certaines phases (solide, liquide) est encadrée pour permettre le retour au sol via les plans d'épandage (agrément sanitaire et arrêtés de prescriptions générales de la rubrique ICPE 2781) ou leur reconnaissance en tant que fertilisants soit par homologation ou par respect d'un cahier des charges approuvé par voie réglementaire soit après traitement par compostage (rubrique ICPE 2780), en tant que compost normalisé.

La réglementation environnementale applicable à la méthanisation est régulièrement adaptée afin de faciliter le développement de la filière tout en maintenant un haut niveau d'exigence de protection de l'environnement. En 2018, la rubrique ICPE 2781 a été modifiée afin d'une part, de rehausser le seuil de l'autorisation à 100 t/j et, d'autre part, créer un régime d'enregistrement pour les installations recevant des déchets non dangereux autres que des matières végétales brutes, effluents d'élevage, matières stercoraires, lactosérum et déchets végétaux d'industries agroalimentaires.

3.4 Dangers liés au biogaz et aux installations de méthanisation

3.4.1 Dangers liés au biogaz

La composition du biogaz varie en fonction des intrants et des conditions opératoires.

Le tableau 1 ci-dessous présente les principaux composants du biogaz brut, c'est-à-dire sans aucun traitement.

Dénomination courante	Formule chimique	Proportion dans le biogaz
Méthane	CH_4	50 à 75% en volume
Dioxyde de carbone	CO_2	25 à 45% en volume
Hydrogène	H_2	< 1% en volume
Sulfure d'hydrogène	H_2S	Jusqu'à 10 000 ppm
Ammoniac	NH_3	< 100 ppm
Azote	N_2	< 2% en volume
Monoxyde de carbone	CO	< 100 ppm
Oxygène	O_2	< 2% en volume
Composés Organiques Volatils	COV	< 1% en volume
Eau	H_2O	Saturation (fonction de la température)

Tableau 1: Principaux composants du biogaz brut (Ineris, 2009)

Le biogaz brut est un mélange de méthane (généralement entre 50 à 75% vol.), de dioxyde de carbone, de sulfure d'hydrogène et de vapeur d'eau et d'autres gaz tels que l'azote, l'hydrogène et d'autres composés à l'état de traces. Les risques sont liés à ses principaux composants :

- inflammabilité / explosibilité (méthane, hydrogène, sulfure d'hydrogène),
- toxicité aigüe par inhalation (sulfure d'hydrogène),
- anoxie (dioxyde de carbone, diazote, etc…).

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

Le méthane (CH_4) est un gaz extrêmement inflammable, plus léger que l'air et non toxique. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 2 suivant :

Désignation	CAS	FDS	Symbole	Risques
Méthane (CH_4)	74-82-8	/	F+ (Extrêmement inflammable)	R12
Caractéristiques				
Masse volumique à 20°C (kg/m³)	0,7	Vitesse fondamentale de combustion (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/m³)		10,7 à 12,8

Tableau 2 : Principales caractéristiques du méthane

Par la présence de gaz inflammables (principalement le méthane, et éventuellement le sulfure d'hydrogène et l'hydrogène), une fuite de biogaz sous pression peut conduire à un feu torche (effets thermiques) en cas d'inflammation immédiate. L'inflammation retardée du nuage inflammable conduira à un flash fire (effets thermiques) voire à une explosion (effets de surpression)

3.4.1.1 Inflammabilité / Explosibilité du biogaz

Le biogaz formé contient une forte proportion de gaz combustible, le méthane (CH_4), et d'un gaz inerte, le dioxyde de carbone (CO_2). Les autres composés formés sont suffisamment peu abondants pour n'avoir qu'une influence négligeable sur les caractéristiques d'explosivité du biogaz.

Cependant, il convient de préciser que le biogaz, du fait des conditions de fonctionnement en température des procédés de méthanisation (modes mésophile et thermophile), peut contenir de la vapeur d'eau à la pression de vapeur mais à un pourcentage volumique insuffisant pour le rendre inerte (on parle de biogaz humide). Cette vapeur d'eau est par exemple présente à hauteur de 10 à 20 % dans le biogaz brut à l'intérieur d'un digesteur ou d'un post-digesteur.

Dans la suite de ce paragraphe, le biogaz est assimilé à un mélange constitué majoritairement de CH_4, de CO_2 et de vapeur d'eau.

Pour une composition de biogaz constitué principalement de CH_4 et de CO_2, les limites inférieures et supérieures d'explosivité du biogaz sont présentées dans le tableau 3. Contrairement au méthane, le biogaz contenant une concentration en CO_2 supérieure à 50 % est plus dense que l'air et peut, en cas de fuite dans une zone confinée non ventilée, provoquer l'anoxie.

CH_4 - CO_2 (%v/%v)	LIE (%v/vCH_4)	LSE (%v/vCH_4)	Densité (air = 1)
100 - 0	5	15	0,54
80 - 20	5	13,7	0,73
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 cinq compositions différentes de biogaz[7]

[7] L. DUPONT (Ineris), Explosion characteristics of synthesised biogas at various temperatures, Journal of Hazardous Materials, 2006.

La présence de produits inertes tend à diminuer la réactivité du méthane, que ce soit le CO_2 ou la vapeur d'eau. La plage d'explosivité du mélange à l'intérieur d'un digesteur dépendra donc principalement de sa teneur en vapeur d'eau et de sa température. On peut cependant retenir que la variation de la teneur en méthane ne modifie pas de façon significative le domaine d'inflammabilité : la limite inférieure d'inflammabilité (LIE) reste à peu près constante et la limite supérieure LSE augmente légèrement lorsque la teneur en CH_4 augmente.

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

- pour une composition volumique CH_4 - CO_2 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 CO_2 tend donc à diminuer le domaine d'explosivité du méthane ;
- pour une composition volumique CH_4-CO_2 de 60%-40% à 55°C, en présence de vapeur d'eau à saturation (conditions rencontrées dans les digesteurs), la pression maximale d'explosion **Pmax est de l'ordre de 3,2 bar relatif et la constante d'explosion de gaz (Kg) est de l'ordre de 40 bar.m/s**. La vapeur d'eau tend donc à limiter la violence de l'explosion par rapport au méthane ;
- **l'énergie minimale d'inflammation du biogaz** n'a pas été mesurée. Elle est nécessairement supérieure à celle du méthane à cause de la présence de CO_2 et de 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 été mesurée.

NB : Pour ces deux derniers paramètres, il peut être retenu par défaut de caractéristiques (EMI, TAI) spécifiques à la composition du biogaz, les caractéristiques d'inflammabilité du biogaz seront assimilées à celles du méthane (EMI = 0,28 mJ, TAI = 537°C).

3.4.1.2 Toxicité aiguë par inhalation du biogaz

La teneur en sulfure d'hydrogène (H_2S) du 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, de biogaz prétraité ou de biogaz épuré). Trois teneurs maximales en H_2S peuvent être retenues pour le biogaz brut :

- 8 000 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation agricole,
- 2 500 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation de boues de station d'épuration,
- 1 000 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation d'ordures ménagères.

Compte tenu de la composition du biogaz brut (Cf Tableau 1), la toxicité du biogaz est due à la présence de sulfure d'hydrogène (H_2S), 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 H_2S en fonction de la durée d'exposition

On notera également les valeurs seuils suivantes pour le H_2S :

- seuil de limite olfactive : 0,0081 ppm[8] ;
- VME et VLE : 5 ppm et 10 ppm ;
- seuil d'anesthésie olfactive : 100 ppm (très dépendant des personnes).

3.4.1.3 Anoxie (CO_2, N_2)

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 apparait lorsque le taux d'oxygène est inférieur à 19 % d'oxygène.

3.4.2 Risques principaux liés aux installations de méthanisation

Comme tout procédé mettant en œuvre des réactions physiques, chimiques et biologiques, la méthanisation présente différentes situations à risques, qu'il convient de maîtriser afin de minimiser l'impact d'une installation sur son environnement.

Le tableau 5 suivant présente succinctement les risques principaux identifiés dans les installations de méthanisation.

[8] Comparaison des seuils olfactifs de substances chimiques avec des indicateurs de sécurité utilisés en milieu professionnel. INRS Note documentaire ND2221 (03/2005)..

Risques principaux	Incendie	Explosion	Rupture ou éclatement physique (et émissions gazeuses liées à rupture)
Description du risque - causes et conséquences possibles	Tout combustible (intrants solides et liquides, matériaux de construction et d'isolation, charbon actif, huile thermique, digestat solide, autres…) en présence d'air et d'une source d'inflammation active (étincelle, chaleur, travaux par points chauds, etc.) est susceptible de brûler de façon non maîtrisée, ce qui constitue un incendie. Un incendie génère des flammes, de la chaleur et des fumées de combustion. Il peut se propager à d'autres combustibles présents à proximité (intrants, matériaux de construction et d'isolation, cartons, papiers, huile thermique…) et causer des dommages majeurs aux biens et aux personnes. Un incendie peut détruire complètement une installation.	Les gaz inflammables (biogaz, biométhane, gaz de pyrolyse et autres gaz inflammables utilisés lors de travaux par points chauds) et les poussières combustibles pulvérulentes en suspension dans un espace confiné en mélange avec l'air (concentration dans le domaine d'explosivité) peuvent générer une explosion (ATEX) s'ils sont en contact avec une source d'inflammation active (semblable à celle de l'incendie). Une explosion génère des effets de pression tels que les équipements sont fortement endommagés voire détruits. Une explosion peut être à l'origine d'un incendie. Le confinement aggrave les effets d'une explosion.	A l'intérieur des digesteurs et des stockages de gaz, des surpressions ou des dépressions physiques peuvent apparaître, en cas de dysfonctionnement des soupapes de sécurité par exemple. Celles-ci peuvent produire la rupture ou l'éclatement pneumatique qui peut conduire à des effets de pression, au déversement massif du digestat, au mélange du biogaz libéré avec l'air, et, en cas, d'inflammation, à l'explosion ou l'incendie.
Unités fonctionnelles concernées	Stockage d'intrants (fermentation auto-échauffement), préparation et incorporation des intrants, digestion, prétraitement du biogaz (filtre à charbon actif), local de cogénération (huile thermique), stockage et valorisation du digestat, locaux techniques et administratifs	Des explosions en milieu confiné concernent l'intérieur de capacités telles que l'intérieur de silos d'intrants pulvérulents, l'intérieur de digesteur / stockage tampon de biogaz (entrée d'air accidentelle en présence biogaz), l'intérieur de locaux contenant des tuyauteries de biogaz (fuite accidentelle de biogaz dans des locaux techniques, locaux de cogénération, locaux d'épuration, locaux de compression / surpression). Des fuites de biogaz à l'extérieur génèrent des effets d'explosion moindres.	Digesteur et post digesteur Stockage de biogaz (intégré au digesteur et/ ou post-digesteur, gazomètre)
Exemples ciblés de la problématique	Incendie d'origine malveillante dans un hangar contenant des intrants Incendie d'origine électrique dans un local technique Incendie d'une turbine de la centrale de cogénération Incendie du filtre à charbon actif avec propagation de l'incendie dans le local de cogénération	Explosion d'un digesteur par exemple suite à travaux ou en phase de démarrage Explosion d'un stockage de biogaz Explosion de biogaz lors d'opération de maintenance	Surpression dans le corps des digesteurs suite à un défaut de fonctionnement de la torchère et des soupapes de sécurité, défaut lui-même causé par le gel par exemple

Emissions principales	Emissions gazeuses	Rejets de matières liquides ou semi-liquides	Rejets d'eaux pluviales contaminées
Description des émissions - causes et conséquences possibles	Les émissions gazeuses (canalisées, diffuses et fugitives) existent aux différentes étapes du processus de digestion • Les émissions canalisées (émissions au travers d'une cheminée, d'une soupape, d'une torchère non enflammée). • Les émissions diffuses proviennent de sources à l'air libre ou de bâtiments sans extraction d'air ou de systèmes de traitement d'air ouverts comme les biofiltres. • Les émissions fugitives peuvent provenir de divers équipements, canalisations, pompes, etc. Ces émissions peuvent se traduire par une fuite de biogaz. Elles peuvent avoir des conséquences environnementales, sanitaires (opérateurs, population) et olfactives. Les émissions spécifiques de biogaz peuvent de surcroit être à l'origine de risques d'incendie, d'explosion (ATEX air / biogaz).	Les rejets de matières sont possibles dans différentes situations : rupture d'un ouvrage et rejet massif de matières ou perte d'étanchéité de l'ouvrage Ils peuvent être à l'origine de pollution des eaux et des sols. La rétention de ces matières sur le site est la seule solution.	Risque lié à l'impossibilité de garder sur le site une grande quantité d'eaux pluviales contaminées par les matières Ces rejets peuvent être à l'origine d'une pollution des rivières et des sols aux alentours du site Les pentes, la séparation éventuelle de ces eaux par rapport aux eaux pluviales non contaminées et les moyens de stockage de ces eaux doivent être correctement dimensionnés. Des talutages peuvent également être prévus.
Unités Fonctionnelles concernées	Stockages ouverts et/ou lors d'étapes de manipulation ou de remplissage et de vidange Etapes de prétraitement et préparation (mélange), et de digestion Etapes de prétraitement, de valorisation et de destruction du biogaz Etapes de traitement, valorisation du digestat Réseau biogaz et réseau matières solides et liquides	Tous les ouvrages avec des matières liquides ou semi-liquides : les étapes de stockage, le digesteur, le post-digesteur et le réseau matières liquides	Stockage des matières solides, étapes de prétraitement des matières quand elles sont situées à l'extérieur
Exemples ciblés de la problématique	En fonctionnement normal de l'installation : émissions au niveau de la soupape hydraulique du digesteur, fuites aux brides, dysfonctionnement de la torchère, émissions diffuses des stockages ouverts, gaz de combustion du moteur de cogénération… En situation incidentelle ou accidentelle : arrachement de conduite de biogaz, envol, débâchage ou déchirure de membrane…	Fuites au niveau des canalisations (enterrées ou aériennes) de matières Perte d'étanchéité du digesteur suite à une usure prématurée de type corrosion chimique Equipements du type vanne de remplissage restées ouvertes Débordement lié à un moussage dans un digesteur ou suite à une défaillance d'un capteur de niveau	Contamination d'un cours d'eau à proximité suite à de fortes pluies et une conception de l'installation ne permettant pas de diriger toutes ces eaux vers le bassin de collecte - aucun talutage autour du site prévu

Tableau 5 : Risques principaux identifiés dans les installations de méthanisation

3.5 Définition des scénarios

En s'appuyant sur le Tableau 5, la démarche adoptée a consisté à recueillir les principaux scénarios d'accident majeurs habituellement traités dans les études concernant les installations de méthanisations. Pour mémoire, un scénario est une séquence accidentelle caractérisé par un produit associé à un équipement (exemple : biogaz dans une canalisation) et constitué d'une cause (défaut métallurgique), d'un évènement redouté central (rupture guillotine) et d'une conséquence ou phénomène dangereux (explosion chimique, feu torche, dispersion de composés toxiques…). Le travail d'identification de ces scénarios est fait lors de l'analyse des risques. A noter que plusieurs scénarios peuvent mener au même phénomène dangereux.

Dans cette étude, nous considérons le cas le plus répandu des méthaniseurs semi-continus dont le fonctionnement est présenté sur la figure suivante. Les risques sont cependant similaires dans les autres types d'installation.

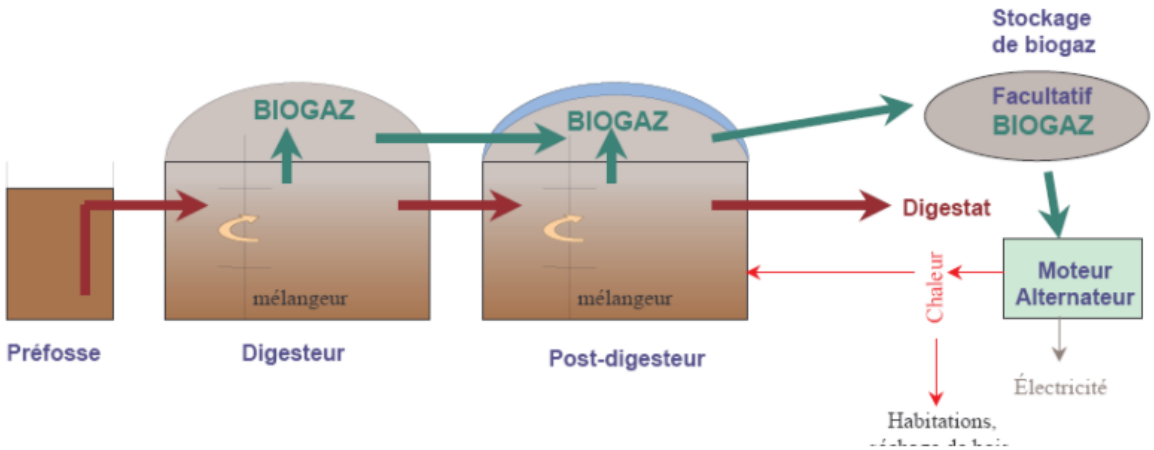


Figure 6 : Schéma simplifié d'un méthaniseur semi continu

A partir des éléments présentés dans les paragraphes précédents (dangers, retour d'expérience, ...), des éléments discutés en groupe de travail, les scénarios accidentels retenus correspondant à des configurations qui vont de la taille agricole (ou semi-industrielle) à la taille industrielle sont :

- la rupture guillotine d'une canalisation basse pression (BP) de biogaz situé à l'extérieur avec vidange des stockages éventuellement présents en amont et en aval,
- la rupture guillotine d'une canalisation moyenne pression (MP) de biogaz situé à l'extérieur avec vidange des stockages éventuellement présents en amont et en aval,
- la rupture guillotine d'une canalisation haute pression (HP) de biogaz situé à l'extérieur avec vidange des stockages éventuellement présents en amont et en aval,
- l'explosion dans un digesteur c'est-à-dire qu'un mélange inflammable (considéré de façon majorante dans des proportions stœchiométriques) s'est formé à l'intérieur de l'enceinte (défaut d'étanchéité de l'enveloppe par exemple) et qu'une source d'inflammation est présente (par exemple un point chaud lors de travaux de maintenance),
- l'explosion dans un gazomètre (même séquence des évènements que pour le digesteur),
- la ruine d'un gazomètre : il s'agit de la rupture complète de l'enceinte permettant la libération de son contenu, généralement par une agression mécanique extérieure de l'ouvrage. Le nuage de biogaz se disperse, c'est-à-dire se mélange avec l'air, jusqu'à ce qu'une partie de celui-ci devienne inflammable et rencontre un point d'inflammation,
- l'explosion dans un local technique (par exemple une chaufferie).

4 Modélisation des phénomènes dangereux

Remarques préliminaires :

- les résultats des calculs sont donnés à titre indicatif afin d'estimer les conséquences accidentelles des principaux scénarios redoutés ;
- toutes les données d'entrée des scénarios de modélisation utilisées et listées ci-après ont été (1) proposées par l'Ineris sur la base de son expertise sur des installations de même type (local de compression, digesteur, gazomètre, locaux de séchage), c'est à dire à partir des plans et des informations recueillis dans le cadre de prestations commerciales et d'appui aux pouvoirs publics et (2) discutées et validées avec le groupe de travail.
- la grande variabilité dans les procédés et dans les configurations a amené l'Ineris à choisir les données les plus conservatives. Lorsqu'un site est placé dans un environnement où l'enjeu est fort, par exemple par le niveau d'urbanisation aux alentours, des modèles et hypothèses plus ajustés et un peu moins conservatifs peuvent donc être considérés au cas par cas.

Ce chapitre a pour objet de déterminer les conditions d'occurrence des accidents envisagés et d'évaluer leurs conséquences sur les personnes et l'environnement. Les données d'entrée et leurs gammes de valeurs sont présentées dans le tableau suivant :

Rupture guillotine d'une canalisation basse pression (BP) de biogaz située à l'extérieur	DN = de 200 à 600 mm P = de 20 à 300 mbar rel Tp = de 35 à 55°C
Rupture guillotine d'une canalisation moyenne pression (MP) de biogaz située à l'extérieur	DN = de 250 à 300 mm P = 1,8 à 3.5 bar rel Tp = 15°C
Rupture guillotine d'une canalisation moyenne[9]/haute pression (HP) de biogaz ou biométhane située à l'extérieur	DN = de 40 à 250 mm P = de 5 à 10 bar rel Tp = de 35 à 55°C
Explosion dans un digesteur[10]	Digesteur cylindrique Volume de 2000 à 12000 m^3 Béton / acier Faiblement à fortement éventé (pression d'ouverture comprise entre 50 et 200 mbar) Fonctionnement normal (chargé en boues) / vide de boues
Explosion dans un gazomètre	Gazomètre sphérique Volume de 50 à 5000 m^3 Pression de service de 20 à 45 mbar
Ruine d'un gazomètre	Gazomètre sphérique

[9] Suivant les standards, la moyenne pression peut aller jusqu'à 25 bar

[10] Le scénario concerne aussi les digesteurs double membrane équipés d'un gazomètre intégré. Le volume occupé par le gazomètre est ici traité comme faisant partie du ciel gazeux.

	Volume de 50 à 5000 m^3 Pression de service de 20 à 45 mbar
Explosion dans un local technique	Volume de 6 000 m^3 ou 9 000 m^3 De 0 à 50% de surface éventable Petite fuite ou fuite massive Encombrement faible ou fort

Tableau 6 : Scénarios accidentels retenus pour une configuration de taille industrielle et agricole

Pour le scénario de rupture guillotine d'une canalisation de biogaz à l'extérieur les distances d'effets de surpression (UVCE), d'effets thermiques (flash fire et feu torche) et d'effets toxiques ont été modélisées. Il est à noter qu'il existe un éventail très large de tuyauteries de transferts de biogaz. Les quelques scénarios qui sont étudiés ici sont représentatifs des cas les plus courants pour lesquels les distances d'effets sont susceptibles de sortir du site (les canalisations les plus petites ne sont donc pas traitées).

Pour le scénario de ruine du gazomètre, les distances d'effets de surpression (UVCE), d'effets thermiques (flash fire) et d'effets toxiques ont été modélisées.

Pour les autres scénarios d'explosion d'équipements, les distances d'effets de surpression ont été déterminées.

Pour le dernier scénario relatif à la ruine d'un gazomètre indépendant, deux situations ont été considérées :

- soit le nuage s'enflamme générant un UVCE avec des effets thermiques (flash fire) et de surpression,
- soit le nuage ne s'enflamme pas et des effets toxiques sont possibles si la teneur de H2S dans le biogaz brut est « significative ».

Toutefois, il faut noter qu'en fonctionnement normal, la teneur en H_2S du gaz stocké dans un gazomètre indépendant est faible et peu susceptible de générer des effets à l'extérieur du site.

4.1 Composition du biogaz retenue pour la modélisation des phénomènes dangereux

Le Tableau 1 du chapitre 6 indique la composition du biogaz brut, dont les propriétés inflammables et par conséquent l'intensité des phénomènes dangereux varient en fonction des intrants et des conditions opératoires.

Deux compositions de biogaz ont donc été retenues, correspondant à des origines variées selon le rapport de l'AFFSET [11] (agricole, ordure ménagère, boues de station d'épuration) :

- 80 % vol. de CH4 (pour 20% vol. de CO2),
- 60 % vol. de CH4 (40% vol. de CO2).

La teneur en H_2S 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, de biogaz prétraité ou de biogaz épuré). Trois teneurs maximales en H_2S ont été retenues pour le biogaz brut :

- 8 000 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation agricole,
- 2 500 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation de boues de station d'épuration (généralement la teneur est bien inférieure grâce au prétraitement effectué sur les boues),
- 1 000 ppm : Biogaz brut issu de la méthanisation d'ordures ménagères.

4.2 Modèles utilisés

4.2.1 Dispersion atmosphérique

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'échappe à travers cet orifice 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 biogaz 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 du biogaz déchargé dans l'air reste très faible voire nulle,
- la fuite génère donc un champ de concentration,
- à cause de ce champ de concentration, il existe toujours une zone de l'espace où la concentration du biogaz dans l'air appartient au domaine d'explosivité et où le mélange constitue donc une ATEX.

La figure 7 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.

[11] Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel (AFSSET, 29/10/2008), www.afsset.fr.

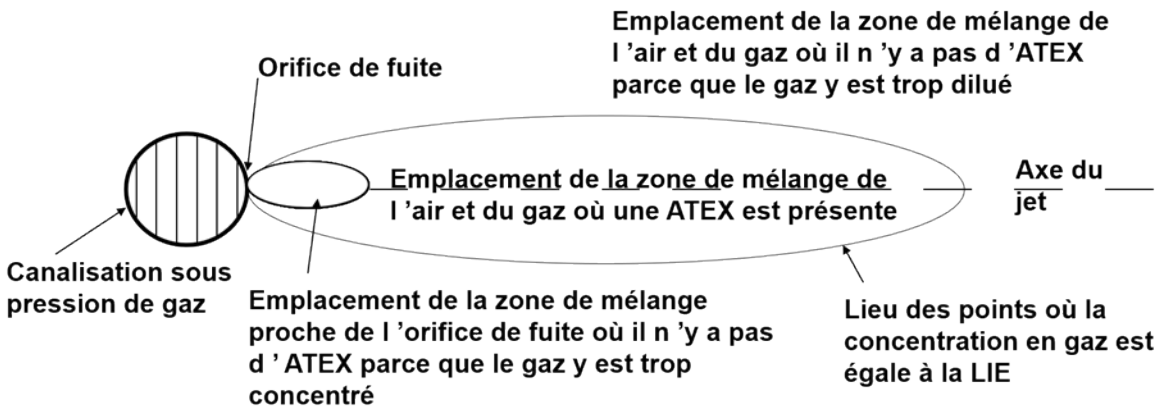


Figure 7 : Fuite d'une canalisation de biogaz sous pression

La modélisation de la dispersion atmosphérique de la fuite gazeuse a été effectuée avec le logiciel PHAST version 6.54. La version 6.1 du logiciel PHAST a fait l'objet d'une évaluation de son aptitude à la détermination des conséquences d'accidents selon une méthodologie stricte[12]. Le rapport d'évaluation[13] est disponible sur le site internet de l'Ineris (www.Ineris.fr). La version 6.54 se place dans la continuité des versions évaluées.

Ce logiciel est de type intégral. La complexité de ce type de logiciel est intermédiaire entre des calculs de dispersion de type gaussien et des logiciels tridimensionnels procédant par volumes ou éléments finis[14].

Ce logiciel permet une modélisation assez fine, prenant en compte les différents régimes de dispersion. Les calculs peuvent être effectués avec des modèles correspondant à autant de problématiques différentes, à savoir :

- un modèle qui est employé lorsque l'énergie cinétique propre au rejet préside à la dispersion (cas des jets de gaz sous pression, par exemple),
- un modèle qui est employé lorsque la dispersion dépend à la fois de l'énergie cinétique du rejet et des effets de densité,
- un modèle pour les calculs de dispersion des gaz lourds,
- enfin, un modèle classique de dispersion gaussienne lorsque le polluant émis est « dynamiquement passif » et que la dispersion atmosphérique ne dépend plus que des conditions orographiques et météorologiques.

Par ailleurs, certaines limitations liées au logiciel sont à noter,

- le terrain est considéré comme plat, de rugosité uniforme et non encombré d'obstacles,
- la vitesse du vent à 10 m d'altitude doit être au moins égale à 1 m/s,
- la dispersion du nuage se fait dans un air atmosphérique déjà exempt de toute trace des composés du biogaz,
- les conditions météorologiques sont considérées invariables tout au long de l'émission et de la dispersion,
- la source d'émission doit être fixe dans l'espace,
- aucun obstacle (éléments approximativement de même taille que celle du nuage) ne doit être situé à proximité du point de rejet. En effet, un obstacle peut modifier le champ moyen de vent, et entraîner une répartition des concentrations en polluants différente de ce qu'elle aurait été en leur absence.

---

[12] Les versions 3.0 - 4.2 et 6.1 de ce logiciel ont fait l'objet d'une évaluation par l'Ineris, pour le compte du S.E.I. (Service de l'Environnement Industriel).
[13] Duplantier S. et al. (2002). « Evaluation des versions 6.0 et 6.1 de PHAST ». Rapport Ineris-DRA-2002-29576 – Diffusé sur le site www.Ineris.fr.
[13] Riou Y. (1989). « Comment estimer la dispersion des gaz lourds ? ». EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches. Série A - Nucléaire, hydraulique, thermique n°1, 1989, pp 23-60,

Ainsi, la mise en œuvre du logiciel PHAST permet de connaître l'évolution dans le temps et dans l'espace de la concentration d'un nuage, qu'il soit inflammable ou toxique.

Les principales hypothèses qui ont été retenues par l'Ineris pour les calculs de dispersion sont les suivantes :

- le paramètre de rugosité choisi correspond à une zone industrielle,
- les calculs ont été réalisés selon deux conditions météorologiques définies suivant la classification de Pasquill. C'est une méthode indirecte qui permet de représenter la stabilité atmosphérique en fonction des valeurs de la vitesse du vent, du rayonnement solaire et de la nébulosité. Les classes de Pasquill varie de A à F, de l'atmosphère la plus instable à la plus stable. La classe de stabilité et les conditions météorologiques retenues dans le cadre de cette étude sont données dans le tableau 6 suivant :

Condition météorologique		**D5**	**F3**
Stabilité atm.	-	D	F
Vitesse du vent à une hauteur de 10 m	[m/s]	5	3
T° ambiante	[°C]	20	15
T° du sol	[°C]	20	15
Humidité relative	[%]	70	70
Rayonnement solaire	[kW/m^2]	0,5	0

Tableau 7 : Conditions météorologiques

La condition D5 correspond à des conditions de stabilité neutre, conditions fréquemment rencontrées au cours d'une journée ; la condition F3 correspond à des conditions stables, plutôt rencontrées la nuit. **Les distances affichées dans la suite de ce rapport correspondent à la condition météorologique la plus pénalisante**.

4.2.2 Effets de surpression des UVCE

4.2.2.1 Présentation des modèles

La méthode présentée dans ce paragraphe vise à prendre en compte le fait qu'une explosion de gaz est susceptible d'engendrer de fortes surpressions si :

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

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

En définitive, si un nuage inflammable donné occupe un volume important au sein duquel se trouvent plusieurs zones encombrées[15] séparées entre elles par des zones libres, il est admis que des surpressions importantes seront engendrées par le passage de la flamme au sein des zones encombrées. A ce titre, il convient de tenir compte des nombreux paramètres qui ont une influence sur la vitesse de propagation de flamme, parmi lesquels :

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

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

Les niveaux maximums et les courbes d'atténuation de la surpression en fonction de la distance sont alors donnés, pour chaque indice, sur des abaques. Ces abaques ont été établis sur la base de résultats de simulations numériques d'explosions de charges hémisphériques de gaz (typiques d'un mélange hydrocarbure-air) à vitesse de flamme constante, elles sont présentées en annexe 1.

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

Pour appliquer la méthode Multi-énergie à un rejet se produisant à l'extérieur, il est donc nécessaire d'évaluer la masse inflammable du nuage qui participe à l'explosion suivant le lieu de l'inflammation ainsi que la distance jusqu'à laquelle le nuage formé est inflammable (ou distance à la LIE) moyennant la modélisation de la dispersion du rejet.

---

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

Les limites du nuage sont définies par la concentration à la LIE. On considère ici que la masse inflammable est contenue :

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

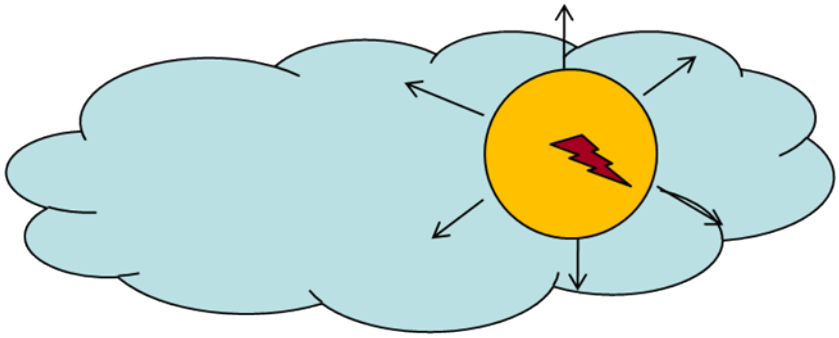


Figure 8: Explosion sphérique dans un jet libre

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

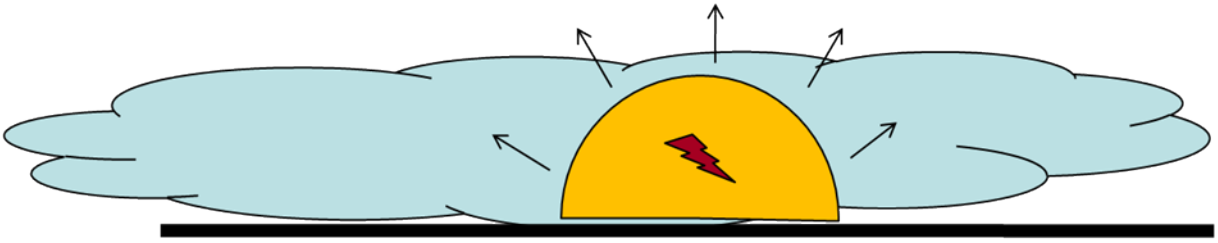


Figure 9 : Explosion hémisphérique dans un jet (ou nuage) rampant

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

Dans ce rapport, l'inflammation est envisagée à différents endroits du nuage (près de la brèche ou en bout de nuage) et à différents moments de la dispersion (en particuliers dans le cas d'un nuage dérivant) afin de maximiser les effets de surpression. L'énergie d'inflammation calculée selon la méthode précédente est comparée à l'énergie déduite de la masse inflammable calculée par Phast. La valeur la plus faible est choisie.

Pour chaque point d'inflammation, il est tenu compte dans le choix de l'indice Multi-énergie :

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

Les résultats des modélisations sont présentés en considérant les distances d'effets maximales suivant les points d'inflammation.

4.2.2.2 Modélisations des effets

A partir des conditions de stockage, le terme source est évalué (débit, vitesse, etc.). Ensuite le calcul de dispersion (à l'aide du logiciel Phast 6.54) permet d'obtenir les caractéristiques du nuage (distance à la LIE, hauteur du nuage, évolution de la concentration en fonction de la distance à la brèche, etc.).

A partir de ces données, il est possible, grâce à des corrélations expérimentales, de calculer la pression maximale dans le nuage en fonction de l'intensité turbulente, de la concentration du mélange combustible-air, et des caractéristiques de combustion du mélange inflammable (vitesse laminaire de flamme, taux d'expansion, …).

Cette pression maximale permet ensuite de choisir un indice Multi-Energy grâce aux abaques présentés en annexe 1.

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

- une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s,
- un taux d'expansion compris entre 3.2 et 6 en fonction de la teneur en méthane[16].

4.2.3 Modélisation des jets enflammés

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.

Ce phénomène peut être à l'origine d'effets dominos importants ; en effet, la flamme produite est susceptible d'impacter d'autres équipements présents dans la zone où se produit la fuite. Les caractéristiques du feu torche dépendent principalement des conditions initiales de stockage du produit, de la nature du produit, de la taille de la brèche ainsi que des conditions météorologiques (vitesse du vent, etc.).

Le logiciel Phast 6.54 propose un certain nombre de modèles[17] pour les rejets horizontaux et verticaux, qui sont couramment utilisés dans les études.

Concernant les distances d'effets associées aux feux torche liés à un rejet de gaz naturel, de biogaz ou de GPL, les outils actuels sont basés sur des corrélations établies à l'aide d'essais. Ils dépendent donc de ces données expérimentales et sont limités aux types de feux spécifiques étudiés pendant les expérimentations. Comme la plupart de ces essais ont été réalisés avec une direction de rejet verticale, les cas des rejets horizontaux ou inclinés ne sont pas très bien modélisés, en particulier, les modèles « classiques » ne prennent pas en compte l'effet de flottabilité des gaz chauds qui ont pour effet l'incurvation de la flamme :

---

[16] Cette valeur dépend du taux de CO_2. Moins il y a de gaz inerte, plus le taux d'expansion est élevé. Un taux de 6 correspond à un biogaz riche en méthane et pauvre en CO_2, alors que la Pmax de 3.2 correspond à un biogaz humide riche en CO_2 (>40%)

[17] https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/referentiel-omega8-final1-couverture-1395914430.pdf

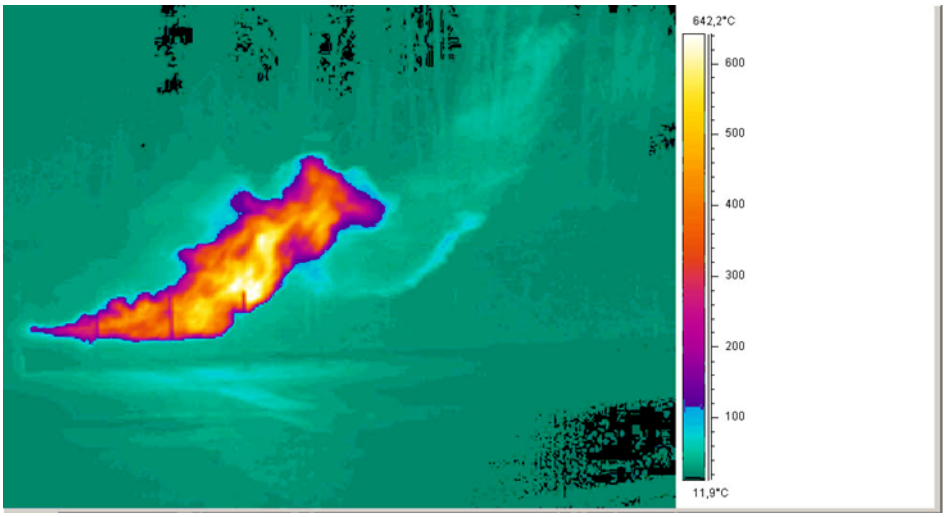


Figure 10 : Image d'un feu torche obtenue avec une caméra Infrarouge

Pour mieux appréhender les conséquences de ce phénomène, l'Ineris a développé un outil qui permet de modéliser des jets enflammés en phase gazeuse ou diphasique, horizontaux, verticaux ou inclinés et de calculer les distances d'effets associées. Le modèle est basé sur des équations physiques qui ne dépendent pas ou peu des données expérimentales. Il s'applique aux petites comme aux grandes échelles et modélise l'incurvation de la flamme lors de rejets horizontaux. Par ailleurs, il prend en compte la vitesse du vent et la stabilité atmosphérique.

Remarque :

Il est à noter que le modèle de Johnson a été conçu pour prendre en compte également l'incurvation de la flamme mais ce modèle est basé seulement sur des corrélations issues de rejets de gaz naturel et ne s'applique pas aux rejets diphasiques ou liquides.

La prise en compte des effets de flottabilité à l'aide du modèle Ineris permet de réduire significativement les distances d'effet à grande échelle (environ 20%) si l'on compare ces valeurs à celles obtenues avec des modèles de type semi-empiriques (Cf. Figure 10). Ce modèle permet également de dimensionner au mieux de barrières de protection (exemple : murs coupe-feu). Ce dernier point est illustré en Figure 11, qui montre schématiquement que l'impact des flammes sur les tiers ne serait pas direct.

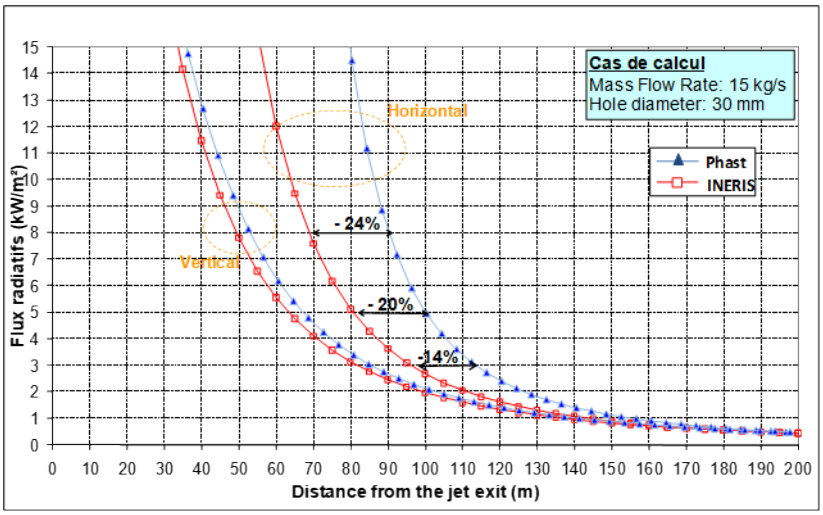


Figure 11 : Comparaison des distances d'effets liées à des feux torches obtenues avec Phast v6.5 et le modèle Ineris

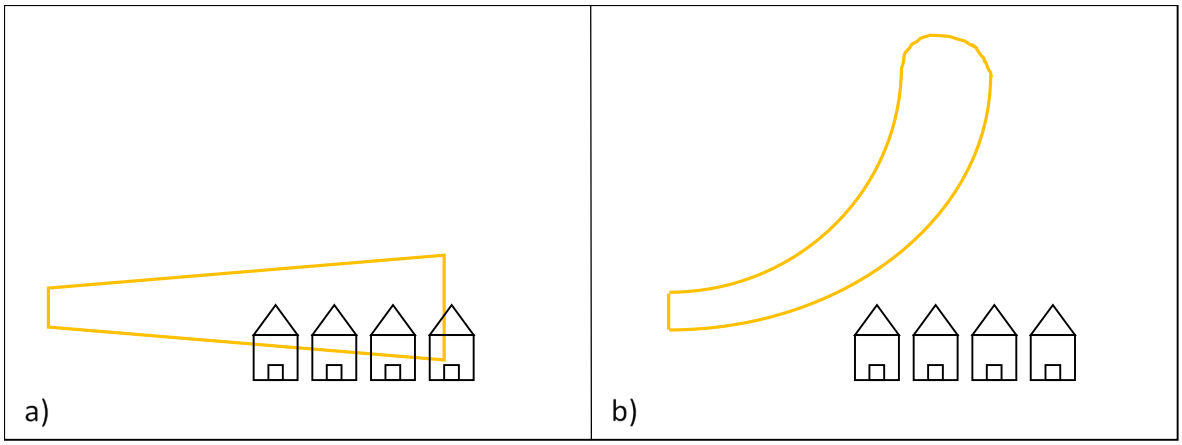


Figure 12: Modélisation de l'impact d'un jet enflammé de GPL sur des maisons
a) Modèle classique - b) Modèle Ineris

La géométrie générale de la flamme (longueur, diamètre, hauteur) est calculée à partir de volumes élémentaires, appelés volumes de contrôles, dont les caractéristiques sont calculées de proche en proche, en partant de l'origine du jet. Le feu torche est considéré à l'état stationnaire.

Les données initiales sont fournies par le terme source, obtenu au moyen du logiciel Phast. Ce terme source est constitué des caractéristiques du jet[18] à savoir :

- sa température,
- sa vitesse,
- son diamètre,
- son débit.

Et d'autre part, il est nécessaire de définir les conditions environnementales telles que :

- la température extérieure,
- le degré d'humidité,
- l'élévation du rejet,
- la direction du rejet,
- l'angle entre le vent et l'axe du jet,
- la vitesse du vent,
- la stabilité atmosphérique.

L'outil procède ensuite de manière itérative pour calculer, au moyen des lois physiques, les caractéristiques de chacun des volumes de contrôle constituant la flamme. L'ensemble de ces géométries élémentaires permet ensuite d'établir la géométrie de la flamme puis d'estimer le champ de flux thermique dans son environnement. L'influence d'une vitesse d'éjection faible peut ainsi être prise en compte.

[18] en sortie de zone d'expansion dans le cas des jets supersoniques

4.2.4 Effets de pression dus aux explosions de bâtiments et digesteurs

Lorsque la fuite se produit en milieu confiné (par exemple dans un local), les évolutions temporelle et spatiale du volume ATEX dépendent :

- du volume du local comparé au volume de gaz qui est susceptible d'être déchargé par l'orifice de fuite,
- de la présence d'ouvertures permanentes sur ce local,
- et de l'existence éventuelle d'un équipement de ventilation du local qui y introduit de l'air frais à un certain débit.

Si une fuite de biogaz survient 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.

Comme précédemment, les paramètres suivants d'explosivité spécifiques au biogaz (ici considéré sec, avec un taux de méthane supérieur à 40%) ont été retenus :

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

Le calcul de la pression maximale atteinte dans le bâtiment et de la masse de gaz brûlés est réalisé avec le logiciel EFFEX dont une brève description est fournie en annexe 2. Il est ensuite possible d'en déduire les caractéristiques de l'explosion secondaire (masse inflammable et violence de l'explosion). Le calcul est effectué avec la méthode multi-énergie dont une description est fournie en annexe 1.

4.3 Seuils réglementaires

Les grandeurs retenues pour caractériser les risques liés à une unité de méthanisation sont :

- les niveaux de surpression aérienne,
- les flux thermiques ou la dose thermique,
- les concentrations 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.[19]

---

[19] 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).

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).

4.3.1 Effets sur les personnes

	Seuils des effets de surpression	**Seuils des effets thermiques** (pour une exposition a minima de 2 minutes)	**Seuils des doses thermiques** (pour une exposition courte, inférieure à 2 minutes)	**Seuils des effets toxiques***
Effets irréversibles par effets indirects	**20 mbar :** effets irréversibles par projection de vitres	/	/	/
Dangers significatifs ou effets irréversibles	**50 mbar :** .	**3 kW/m² :**	**600 (kW/m²)$^{(4/3)}$.s :**	**Seuil des Effets Irréversibles (SEI)**
Dangers graves ou premiers effets létaux	**140 mbar :**	**5 kW/m² :**	**1000 (kW/m²)$^{(4/3)}$.s :**	**Seuil des Effets Létaux (SEL)** effets létaux pour 1% de la population exposée
Dangers très graves ou effets létaux significatifs	**200 mbar :**	**8 kW/m² :**	**1800 (kW/m²)$^{(4/3)}$.s :**	**Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS)** effets létaux pour 5% de la population exposée

Tableau 8: Seuils d'effets sur les personnes

(*) Pour les effets toxiques, ces seuils correspondent à des concentrations volumiques dans l'air (en ppm ou mg/m^3). 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'H_2S (cf tableau 3).

4.3.2 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**	/
Seuil des dégâts graves	**140 mbar**	**8 kW/m²**
Seuil des effets dominos	**200 mbar**	**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 9 : Seuils d'effets sur les structures

4.4 Modélisations des scénarios de rupture de canalisations

4.4.1 Données d'entrée

Chaque scénario est défini par un type de biogaz, c'est-à-dire par la proportion de méthane et par la présence éventuelle de gaz toxiques (H_2S), par les caractéristiques de la canalisation (diamètre, pression, longueur), et par les différentes contributions alimentant la fuite :

- soit d'un digesteur (D), et dans ce cas le débit est limité,
- soit d'un gazomètre (G) ou d'un réseau de gazomètre, ou d'un réservoir sous pression (Rp) : la pression est alors considérée constante et la quantité de gaz est considérée suffisante pour que la fuite dure 30 minutes,
- soit d'un compresseur (C) dont le débit est connu et constant sur une durée illimitée (supérieure à 30 minutes).

Ces éléments permettent de calculer le débit de fuite, première étape pour l'évaluation des effets, en considérant les contributions en amont et en aval.

Pour chaque scénario, les données d'entrée concernant la canalisation sont résumées dans le tableau 10 suivant :

N°Scénario		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
		BP	**HP**	**HP**	**HP**	**BP**	**MP**	**MP**	**MP**	**BP**	**BP**
$\%CH_4$	[%vol]	80	100*	60	60	60	80	80	60	80	60
Biogaz prétraité**	[-]	non	oui	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non
Pression	[bar_g]	0.02	6	10	5	0.02	3.5	1,8	1,8	0,3	0,3
Diamètre	[mm]	200	50	40	250	600	250	300	300	250	250
Longueur	[m]	200	50	50	10	100	200	10	10	10	10
Température	[°C]	35	35	50	55	50	50	35	35	35	35
Contribution amont	[-]	D	C	Rp	D	G	G	G	G	G	G
Contribution avale	[-]	G	G	D	G	G	G	-	-	-	-
Débit de fuite total	[kg/s]	1,5	1	3	1	20	22	31	35	7,1	8

** : biométhane*

*** : biogaz épuré en H2S*

Tableau 10 : Données d'entrée des scénarios impliquant des canalisations de biogaz (D : Digesteur, C : compresseur, G : gazomètre, Rp : Réservoir sous pression / HP : Haute Pression, BP : Basse Pression)

Pour chaque configuration, la vidange des canalisations est négligée.

4.4.2 Distances d'effets

Les distances d'effets sont calculées avec un temps de fuite de 30 minutes[20]. La dispersion du nuage avec l'outil Phast permet de calculer la masse inflammable et d'en déduire une énergie d'explosion. La violence de l'explosion dépend de la composition du biogaz et du type de fuite (on considère qu'il n'y a pas d'encombrements ou de confinements alentours).

N° Scénario		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Distance à la LIE	[m]	15	5	5	10	40	35	40	20	20	15
Masse inflammable	[kg]	1.2	<0.1	<0.1	1	8	2,5	3,3	2,3	1,2	0,8
Flash Fire											
Distance aux seuils SEL et SELS	[m]	15	5	5	10	40	35	30	20	20	15
Distance au seuil SEI	[m]	17	6	6	11	45	39	35	22	22	17
Surpressions											
Energie d'explosion*	[MJ]	25	1.2	1	10	60	130	250	120	58	37
Indice multi-énergie équivalent	[-]	3	4	4	4	5	5,1	5,2	5,1	4,9	4,8
Distance au seuil SELS	[m]	NA	NA	NA	NA	30	25	30	20	NA	NA
Distance au seuil SEL	[m]	NA	NA	NA	NA	35	30	35	25	25	20
Distance au seuil SEI	[m]	10	5	5	10	45	50	55	40	35	30
Distance au seuil BV	[m]	15	10	10	15	80	80	90	70	55	45
Jet enflammé											
Longueur de flamme	[m]	17	10	23	15	35	46	53	57	34	36
Distance au seuil SELS	[m]	18	10	25	15	60	65	75	70	40	40
Distance au seuil SEL	[m]	20	12	28	20	70	70	85	80	45	45
Distance au seuil SEI	[m]	25	15	30	20	80	80	95	90	50	50

Tableau 11 : Distances d'effets thermiques et de surpression liés à la rupture guillotine d'une canalisation de biogaz. Les distances sont à considérer depuis le point de rejet

[20] Ce temps est généralement suffisant pour vidanger le stockage ou pour détecter la fuite

Dans le cas des scénarios n°1 et n°7 à n°10, le biogaz n'est pas épuré. Le calcul des effets toxiques est alors nécessaire et les distances dépendent de la concentration d'H_2S présente dans le mélange. Les distances correspondant à trois types de biogaz brut avec une teneur en H_2S spécifique (1 000 ppm, 2 500 ppm et 8 000 ppm) sont présentées dans le tableau 12 suivant :

N° Scénario		**1**	**7**	**8**	**9**	**10**
< 8 000 ppm d'H_2S						
Distance au seuil SELS	[m]	<10	20	20	10	10
Distance au seuil SEL	[m]	<10	25	25	15	15
Distance au seuil SEI	[m]	<10	300	210	70	120
< 2 500 ppm d'H_2S						
Distance au seuil SELS	[m]	<5	10	<5	<5	<5
Distance au seuil SEL	[m]	<5	10	<5	<5	<5
Distance au seuil SEI	[m]	<10	45	30	20	15
< 1 000 ppm d'H_2S						
Distance au seuil SELS	[m]	<5	<5	<5	<5	<5
Distance au seuil SEL	[m]	<5	<5	<5	<5	<5
Distance au seuil SEI	[m]	<5	10	10	<10	<10

Tableau 12 : Distances d'effets toxiques liés à la rupture guillotine d'une canalisation de biogaz. Les distances sont à considérer depuis le point de rejet et en considérant une durée de rejet de 30 min

4.5 Modélisations des scénarios liés aux digesteurs

4.5.1 Description du phénomène physique

Le scénario d'explosion du digesteur suit les étapes suivantes.

On considère initialement que le digesteur est rempli complètement ou partiellement par un mélange inflammable d'air et de biogaz. Une inflammation se produit (point chaud) et la flamme commence à se développer dans l'enceinte (explosion « primaire » ou interne). La pression commence à augmenter au fur et à mesure de la production de gaz brulés chauds dont la densité est moins importante que les gaz frais.

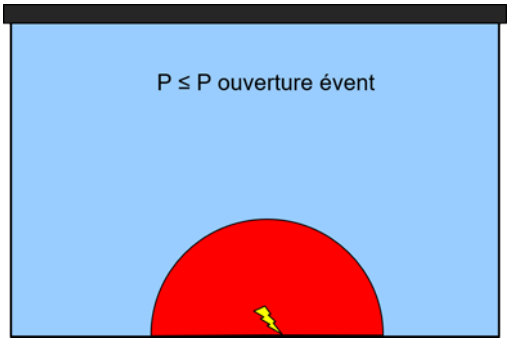


Figure 13 : Schéma d'un digesteur avec P <= P ouverture évent

Au cours de la propagation de la flamme (généralement sphérique ou hémisphérique suivant la géométrie du volume et la localisation du point d'inflammation), la pression atteint la pression d'ouverture des évents d'explosion ou des parois les plus fragiles. Celles-ci vont donc s'ouvrir, laissant échapper un mélange de gaz frais et de gaz brûlés vers l'extérieur.

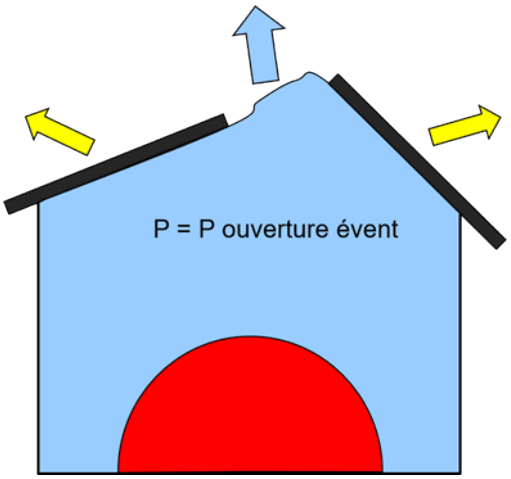


Figure 14 : Schéma d'un digesteur avec P = P ouverture évent

Au fur et à mesure de l'ouverture, les gaz éjectés, poussés par la montée en pression interne, prennent une forme de champignon. Le nuage formé à l'extérieur, est fortement turbulent sous l'impulsion de la pression résiduelle de l'explosion primaire.

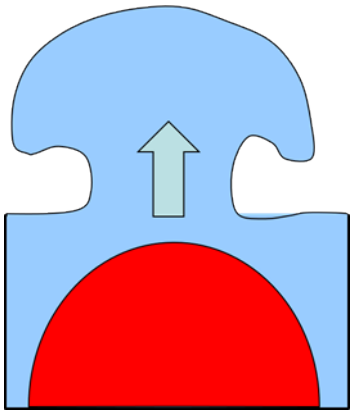


Figure 15 : Schéma d'une explosion primaire d'un digesteur

La flamme se propage vers l'extérieur provoquant une seconde explosion dite « secondaire » qui sera responsable des effets de pression à l'extérieur et va recomprimer l'intérieur de l'enceinte.

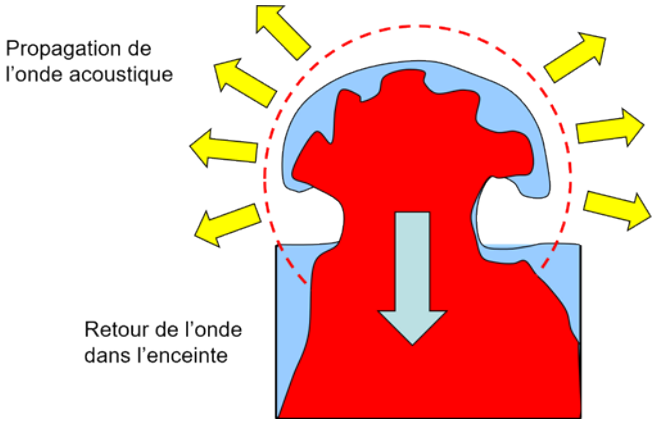


Figure 16 : Schéma d'une explosion secondaire d'un digesteur

Lorsque les surfaces sont suffisamment ouvertes, ou qu'il n'y a plus de gaz à brûler à l'intérieur, la pression diminue.

Les effets liés à l'explosion d'un digesteur sont donc très liés à la surface soufflable et à la pression à laquelle ces surfaces vont s'ouvrir.

4.5.2 Définitions des scénarios

On considère un mélange d'air et de biogaz à ses proportions stœchiométriques dans un digesteur. Deux scénarios sont envisagés :

1. L'explosion du digesteur vide. Dans ce premier cas, il s'agit d'un scénario qui ne peut se produire que lorsque le digesteur est en phase de vidange technique ou lors d'une vidange accidentelle si celle-ci est possible, en l'absence d'inertage, et à condition que suffisamment de biogaz soit présent pour atteindre des conditions stœchiométriques. (Dans une approche conservative, on pourra englober dans ce scénario les phases de remplissage initial et après maintenance périodique pendant lesquelles la production progressive de biogaz entraine la présence d'une atmosphère explosive dans le ciel gazeux du digesteur pendant un certain temps (atteinte de la LIE jusqu'à dépassement de la LSE) même si le digesteur contient une certaine quantité d'intrants et n'est donc pas complètement vide. Ce scénario pourra également être traité séparément ce qui nécessitera la réalisation de modélisations spécifiques.)
2. L'explosion du ciel gazeux lorsque le digesteur est plein, c'est-à-dire en fonctionnement normal. Ce scénario est ainsi plus probable que le précédent mais avec des effets beaucoup plus restreints.

4.5.3 Données d'entrée

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

- vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s, correspondant à une proportion d'environ 60 % de méthane et 10 % d'eau,
- taux d'expansion de 6.

Tous les calculs ont été réalisés en considérant que l'atmosphère explosive était au repos. La vitesse de combustion turbulente est ainsi considérée inférieure à 5 fois la vitesse de combustion laminaire pour tenir compte des instabilités de flamme.

Sur la base des informations récoltées auprès de la profession lors du groupe de travail, les hypothèses supplémentaires suivantes ont été considérées :

- le digesteur a un volume inférieur à 12 000 m3,
- le digesteur a une géométrie cylindrique avec un rapport diamètre / hauteur compris entre 0,7 et 1,3,
- la structure est soit en acier (structure « légère »), et en général bien éventé ; soit en béton (avec une densité surfacique pouvant aller jusqu'à 1000 kg/m²),
- les évents ou systèmes d'évacuation de la pression s'activent entre 50 et 200 mbar.

4.5.4 Modélisations

<u>Méthode Ineris</u>

La méthode utilisée par l'Ineris consiste à calculer la pression maximale atteinte dans le digesteur et la part de gaz brûlés à l'aide de l'outil EFFEX (annexe 2).

A partir de la pression maximale atteinte dans le digesteur, il est possible d'évaluer la pression maximale atteinte lors de l'explosion secondaire. L'évaluation des distances d'effets de pression dus à l'explosion secondaire (externe) se fait ensuite à l'aide de la méthode multi-énergie (annexe 1).

<u>Méthode alternative simplifiée</u>

Les digesteurs ayant une géométrie simple, il est possible d'évaluer de manière conservative les effets de l'explosion primaire puis secondaire en faisant quelques hypothèses simplificatrices sur la montée en pression et sur la dynamique d'éjection des gaz vers l'extérieur. Pour cela, il est d'abord nécessaire de classer les digesteurs en catégories suivant les matériaux et les techniques de mitigation utilisés pour évacuer la pression. Pour chaque catégorie, la quantité de gaz participant à l'explosion (interne ou externe) est évaluée en fonction de la quantité de gaz présente dans le digesteur et de la taille des évents. Les violences des explosions internes et externes sont évaluées et associées à des indices multi- énergie. Les distances d'effets peuvent alors être calculées en utilisant les abaques de la méthode multi-énergie présentée en annexe 1.

De manière conservative, les mêmes indices peuvent être appliqués pour les deux scénarios (digesteur plein et vide) en considérant dans chaque cas le volume correspondant au ciel gazeux disponible.

En pratique, cette hypothèse est un peu conservative dans le cas du digesteur plein de boues car le ciel gazeux est en forme de galette ce qui ne permet pas des conditions optimales de propagation de la flamme.

Le tableau 13 présente le classement en catégories des digesteurs en fonction des paramètres principaux :

Catégorie de Digesteur	**1 : Digesteur largement éventé**	**2 : Digesteur modérément éventé**			**3 : Digesteur peu éventé**	**4 : Digesteur non éventé**
Surface éventable	> 30% de la surface du toit	<15% S_{toit}	> 30% S_{toit}	> 30% S_{toit}	<10% S_{toit}	0
Pression d'ouverture	<100 mbar	<100 mbar	entre 100 et 200 mbar	<100 mbar	>100 mbar	**Pression de rupture[a]**
Densité surfacique	<20 kg/m²	<20 kg/m²	<20 kg/m²	<150 kg/m²	>100 kg/m²	-
Explosion secondaire possible	oui	oui			oui	non
Energie d'explosion	70% Volume du ciel gazeux[b]	D_{BDF}[c] = 2 * dimension caractéristique de l'évent[d] (D_h)	70% Volume du ciel gazeux[b]		D_{BDF} = 2 * dimension caractéristique de l'évent[d] (D_h)	Energie de Brode Pexplosion = DLF[e] *pression de rupture statique ➔Avec DLF~ de 1 à 2
Indice de violence	De 4 à 5	De 5,5 à 6			6	10

Tableau 13 : Classement en catégories des digesteurs en fonction des paramètres les plus sensibles et choix des indices de violence

a) Cette pression dépend de la tenue de l'ouvrage, c'est-à-dire des matériaux et des techniques de constructions utilisées. Elle est au moins égale à la hauteur de liquide.

b) Calculé en considérant que 70% du mélange inflammable est éjecté et que la totalité du celui-ci participe à l'explosion.

c) D_{BDF} : Diamètre de la boule de feu formée à l'extérieur lors de l'explosion secondaire.

d) correspondant par exemple au diamètre hydraulique D_h=4*surface/périmètre.

e) DLF : Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique : ce paramètre est à ajuster en fonction du matériau. En l'absence de données, une valeur de 2 peut être retenue.

Une illustration de la méthode simplifiée est proposée dans les tableaux 14 à 16 suivants pour plusieurs cas :

- les digesteurs en aciers d'environ 5 000 m3,
- les digesteurs en béton de 2 000 m3 à 12 000 m3.

Catégorie de Digesteur		Cat.1	Cat. 1	Cat. 1	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3
Surface soufflable	[m²]	>30 % S_{toit}				30 % S_{toit}	10 % S_{toit}
Pression ouverture	[mbar]	40	50	50	100	200	>35
Densité surfacique	[kg/m²]	15	15	150	15	150	>15
Pression explosion interne	[mbar]	50	65	110	110	250	>500
Pression explosion externe	[mbar]	140	160	220	220	350	>500
Indice Multi-Energie	[-]	4	4,5	5	5	5,5	6
Distances aux seuils : Digesteur vide de boues							
Energie boule de feu	[MJ]	3700	3700	3700	3700	3700	2100
200 mbar	[m]	NA	NA	20	20	30	45
140 mbar	[m]	NA	20	30	30	45	60
50 mbar	[m]	55	65	80	80	120	140
20 mbar	[m]	110	130	160	160	240	280
Distances aux seuils Digesteur rempli à 90% de digestat							
Energie boule de feu	[MJ]	370	370	370	370	370	210
200 mbar	[m]	NA	NA	8	8	15	20
140 mbar	[m]	NA	8	15	15	20	30
50 mbar	[m]	20	30	40	40	55	65
20 mbar	[m]	40	60	80	80	110	130

Tableau 14 : Scénario d'explosion dans un digesteur acier cylindrique d'environ 5000 m³ (diamètre=19 m) : hypothèses et distances d'effets « enveloppes » pour chaque catégorie

Catégorie de Digesteur		Cat.2	
		Digesteur vide	Digesteur plein
Surface soufflable	[m²]	>30 % S_{toit}	>30 % S_{toit}
Pression ouverture	[mbar]	100	100
Densité surfacique	[kg/m²]	1000	1000
Pression explosion interne	[mbar]	~300	~300
Pression explosion externe	[mbar]	360	360
Energie boule de feu	[MJ]	5500	550
Indice Multi-Energie	[-]	5,5	5,5
Distances aux seuils :			
200 mbar	[m]	45	20
140 mbar	[m]	65	25
50 mbar	[m]	165	65
20 mbar	[m]	330	130

Tableau 15 : Scénario d'explosion dans un digesteur béton cylindrique d'environ 12 000 m³ (diamètre>30 m) : hypothèses et distances d'effets « enveloppes » pour chaque catégorie

Dans les configurations où il n'y a pas de surface soufflable (le toit est alors solidaire du reste de la structure), il faut évaluer la pression de rupture dynamique qui est comprise entre 0.5 et 2 fois la pression de rupture statique pour calculer l'énergie de Brode.

La valeur de 2 est donc conservative, en particulier dans les cas où les vitesses de flammes sont faibles. Ainsi, une analyse dynamique simple montre qu'une pression dynamique peut être équivalente à une pression statique à un facteur DLF (Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique) près.

		Cat.4				
Volume		5000	2000	4000	6000	12000
Surface soufflable	[m²]	0				
Matériau	[-]	acier	Béton			
Pression rupture	[mbar]	200	200			
Pression explosion interne	[mbar]	400	800			
Indice Multi-Energie	[-]	10				
Distances aux seuils : digesteur vide						
Energie Brode	[MJ]	1500	1100	2200	3300	6600
200mbar	[m]	45	40	50	60	70
140mbar	[m]	60	50	65	75	90
50mbar	[m]	140	115	145	165	210
20mbar	[m]	280	230	290	330	420
Distances aux seuils : Digesteur plein (fonctionnement normal)						
Energie Brode	[MJ]	150	110	220	330	660
200mbar	[m]	20	20	25	25	35
140mbar	[m]	25	25	30	35	45
50mbar	[m]	60	55	70	75	100
20mbar	[m]	120	110	140	150	200

Tableau 16 : Scénario d'explosion dans un digesteur béton cylindrique sans surface éventable hypothèses et distances d'effets « enveloppes » pour chaque catégorie

4.6 Modélisations des scénarios liés aux gazomètres

Concernant les stockages de gaz, que ce soit le biogaz ou le biométhane[21], deux scénarios sont généralement traités :

- l'explosion du gazomètre : c'est-à-dire qu'un mélange inflammable (considéré de façon majorante dans des proportions stœchiométriques) s'est formé à l'intérieur de l'enceinte (défaut d'étanchéité de l'enveloppe ou entrée d'air en amont par exemple) et qu'une source d'inflammation est présente (par exemple un point chaud lors de travaux de maintenance) ;
- la ruine du gazomètre : il s'agit de la rupture complète de l'enceinte permettant la libération de son contenu, généralement par une agression mécanique extérieure de l'ouvrage. Le nuage de biogaz

[21] Seul le cas biogaz est traité dans cette étude, il est rare que les installations d'épuration soient composées d'un stockage de biométhane

se disperse, c'est-à-dire se mélange avec l'air, jusqu'à ce qu'une partie de celui-ci devienne inflammable et rencontre un point d'inflammation. Des effets de surpression (UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion) et thermiques (Flash-fire) sont alors calculés.

4.6.1 Explosion du gazomètre

Le scénario d'explosion du gazomètre est traité de façon similaire à celui du digesteur :

- s'il y a une surface éventable, un calcul des effets de l'explosion secondaire est nécessaire. C'est le cas notamment des gazomètres conçus de la même manière que les digesteurs (gazomètres intégrés, ou structure acier cylindrique par exemple). La méthode simplifiée proposée dans le paragraphe précédent peut être utilisée ;
- sinon il faut considérer que la totalité de la structure cède à la pression de rupture. Dans ce cas, deux configurations sont possibles :
    - si la pression de rupture est très faible, soit de quelques millibars à quelques dizaines de millibars, il est possible de négliger l'influence de celle-ci, le calcul revient donc à un UVCE de la totalité de la quantité de mélange inflammable disponible en utilisant un indice de violence multi énergie correspondant à la réactivité du biogaz et au niveau de turbulence dans le nuage au moment de la rupture, c'est-à-dire généralement compris entre 3 et 4 ;
    - au-delà d'une pression de rupture de 100 mbar, l'enveloppe a une influence certaine sur l'explosion et les effets de surpression dans le gazomètre peuvent être calculés à partir de l'énergie de Brode avec un indice 10 (ce qui revient à considérer que le gazomètre rentre dans la catégorie 4 précédemment décrite pour les digesteurs).

Dans tous les cas il faut évaluer la pression de rupture (en général quelques dizaines de millibar pour une membrane souple).

Quelques exemples de modélisations sont proposés dans le tableau suivant pour des volumes de gazomètres allant de 50 m^3 à 5 000 m^3 et des pressions de fonctionnement inférieures à 50 mbar :

Volume du gazomètre sphérique	[m^3]	50	200	200	1000	1000	1000	5000
Pression de service	[mbar]	20	20	20	25	25	45	20
Pression de rupture du gazomètre (enveloppe extérieure)	[mbar]	100	50	100	50	100	200	100
Energie	[MJ]	1.7	472	7	2360	33	67	167
Indice de violence	[-]	10	3.7	10	3.7	10	10	10
Distances aux seuils								
200 mbar	[m]	5	0	7	0	12	15	20
140 mbar	[m]	6	0	10	0	20	20	30
50 mbar	[m]	13	18	20	30	35	45	60
20 mbar	[m]	26	36	40	60	70	90	120

Tableau 17 : Scénario d'explosion dans un gazomètre sans surface éventable

4.6.2 Ruine du gazomètre

Le nuage de gaz libéré, en se mélangeant à l'air va former un nuage inflammable et potentiellement toxique. Si celui-ci rencontre une source d'inflammation, il peut exploser en champ libre et provoquer des effets thermiques (Flash-fire) et de surpression (UVCE) qui seront plus ou moins importants en fonction du lieu, du moment et du type d'inflammation. Les résultats de modélisation suivant la méthode décrite dans le paragraphe 4.2.2 sont présentés dans le tableau suivant (pour chacune des conditions météorologiques définies au paragraphe 4.2.1, seules les distances les plus grandes sont présentées).

Pour le scénario de ruine du gazomètre, les principaux paramètres sont :

- la composition du biogaz : la teneur en méthane et éventuellement en polluants toxiques tels que l'H_2S (toutefois ce cas ne sera pas traité ici car la teneur en H2S est généralement trop faible pour être susceptible de générer des effets toxiques à l'extérieur du site),
- la quantité de gaz présente dans le gazomètre au moment de la rupture (évaluée à partir du volume et de la pression de stockage),
- les paramètres de dispersion (conditions météorologiques, rugosité du terrain, etc.).

Pendant la dispersion, le nuage dérive et sa concentration en CH_4 diminue. Les effets sont calculés en considérant pour chaque phénomène dangereux, le moment où les distances d'effet sont les plus grandes. Pour les effets d'explosion en champ libre (UVCE), la méthode multi-énergie est appliquée avec un indice faible (3 ou 4).

Volume du gazomètre sphérique	[m^3]	50	200	1000	5000
Pression de service	[mbar]	20	20	45	20
Température de service	[°C]	35	35	35	35
Distance à la LIE	[m]	20	20	35	55
Flash Fire					
Distance aux seuils SEL et SELS	[m]	20	20	35	55
Distance au seuil SEI	[m]	22	22	40	60
Surpressions					
Energie d'explosion*	[MJ]	600	2700	1100	5700
Indice multi-énergie	[-]	3	3	4	4
Distance au seuil 200 mbar	[m]	NA	NA	NA	NA
Distance au seuil 140 mbar	[m]	NA	NA	NA	NA
Distance au seuil 50 mbar	[m]	20	30	55	75
Distance au seuil 20 mbar	[m]	25	45	90	125
Toxique : < 8 000 ppm d'H_2S					
Distance au seuil SELS	[m]	<10	10	15	20
Distance au seuil SEL	[m]	<10	12	15	25
Distance au seuil SEI	[m]	20	35	45	60
< 2 500 ppm d'H_2S					
Distance au seuil SELS	[m]	<10	<10	<10	<10
Distance au seuil SEL	[m]	<10	<10	<10	10
Distance au seuil SEI	[m]	10	15	25	30

< 1 000 ppm d'H_2S					
Distance au seuil SELS	[m]	NA	NA	NA	NA
Distance au seuil SEL	[m]	NA	NA	NA	NA
Distance au seuil SEI	[m]	<10	<10	10	20

NA : Non Atteint

Tableau 18 : Scénario de ruine de gazomètre Résultats des calculs de dispersion et des effets de surpression en champ libre calculées au niveau du sol avec les conditions météorologiques D5 et F3 (seules les distances les plus pénalisantes sont présentées dans le tableau). Les distances sont à compter depuis le centre du gazomètre

NB : aucune zone encombrée n'a été considérée dans les modélisations.

4.7 Explosion dans un local technique

Il existe de nombreuses configurations de locaux techniques et toutes ne peuvent pas être traitées dans ce rapport. Quelques exemples de scénarios ont donc été étudiés afin de donner des ordres de grandeurs de distances d'effets en fonction de paramètres fondamentaux tels que la géométrie du bâtiment, la surface d'évents, le type de fuite ou l'encombrement intérieur. Dans chaque cas, on considère la formation d'une atmosphère explosive à la stœchiométrie à la suite d'une fuite de canalisation de biogaz sans tenir compte de la ventilation du local.

Deux types de bâtiments sont considérés :

- un local de 9000 m3 disposant d'une surface d'évent représentant environ 50 % de la surface du toit. Le surface éventable a une densité de surface de l'ordre de 8 kg/m² avec une résistance à l'explosion estimée à 30 mbar,
- un local de 6000 m3 ne disposant pas d'évents d'explosion, en bardage simple peau dont la densité de surface est supposée être de l'ordre de 15 kg/m². La résistance à l'explosion est estimée à 50 mbar. Toutes les parois peuvent donc être considérées comme soufflables.

Deux types de fuites sont envisagés : la fuite massive qui correspond à la rupture guillotine d'une canalisation de biogaz sous une pression de 1,8 bar rel et un diamètre de 300 mm, et la petite fuite qui correspond à une fuite de corrosion de 10 mm de diamètre sur une canalisation sous 20 mbar de pression.

Le calcul d'explosion réalisé avec le logiciel de modélisation EFFEX permet d'évaluer :

- la surpression maximale dans le local et le 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.

Les paramètres de combustions sont :

- pour le biogaz, on retient une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,3 m/s et un taux d'expansion de 6,
- pour le biométhane (biogaz après épuration), on retient une vitesse fondamentale de combustion laminaire de 0,42 m/s et un taux d'expansion de 7,2.

Comme pour le cas du digesteur, l'explosion primaire peut générer une explosion secondaire du fait de l'éjection d'une partie du volume inflammable initial à travers les parois soufflées du local. Le local lui-même est d'autant mieux protégé des effets d'une explosion primaire que la surface de l'évent augmente mais ceci se fait au détriment des effets de l'explosion secondaire.

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 surpression sont largement supérieurs à l'extérieur du local qu'à l'intérieur du fait de l'explosion secondaire. Pour cette raison, l'évaluation des effets de surpression se fait à l'aide de la méthode multi-énergie avec un indice de violence compris entre 5 et 6 (système turbulent).

Les distances d'effets de pression indiquées dans le tableau 13 correspondent aux effets de l'explosion secondaire à l'extérieur du local.

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

Les données d'entrée, résultats intermédiaires et distances d'effets sont présentés dans le tableau 19 suivant :

Volume du Local technique	**9 000 m³**	**9 000 m³**	**6 000 m³**	**6 000 m³**
Dimensions (m)	45*20*10	45*20*10	30x 20x 10	30x 20x 10
Gaz	Biogaz	Biogaz	Biogaz	Biométhane
Type de fuite	Massive	Petite	Massive	Massive
Encombrement	Fort	Modéré	Modéré	Modéré
% de la surface d'évent en toiture	50%	50%	Bâtiment en bardage sans évents	Bâtiment en bardage sans évents
Event	30mbar/8kg/m²	30mbar/8kg/m²	Bardage 50mb/15kg/m²	Bardage 50mb/15kg/m²
% gaz participant à l'explosion secondaire	75	80	90	90
Surpression interne maximale (mbar)	300	140	100	100
Indice	6	5,5	5	5
Distance aux seuils (m)				
200 mbar	95	55	NA	NA
140 mbar	125	80	50	60
50 mbar	300	210	135	170
20 mbar	675	420	190	400

Tableau 19 : Scénario d'explosion dans un local technique

5 Conclusion

Ce rapport est une mise à jour du rapport rédigé par l'Ineris en 2009 (rapport n° DRA-09-101660-12814A) traitant de la modélisation des scénarios accidentels concernant les installations de méthanisation. En effet, les unités de méthanisation se sont largement développées en France au cours des dernières années, autant dans les techniques de mélange ou de récupération du biogaz, que dans les moyens de protection et de mitigation des installations de biogaz, et les méthodes de modélisations des scénarios d'explosion ne sont pas toujours adaptées (par exemple, non prise en compte des effets d'une explosion secondaire lorsque des évents ont été placés sur le toit du digesteur).
Ainsi, en 2019, dans le cadre de l'opération C du programme DRA 06 qui porte sur les risques liés aux procédés de méthanisation de la biomasse et des déchets, l'INERIS a rassemblé plusieurs professionnels et association du domaine de la méthanisation afin d'échanger sur les technologies et sur les pratiques de modélisation du scénario d'explosion du digesteur. Une démarche moins générique et plus adaptée aux différentes configurations a été adoptée et est présentée dans ce rapport.

Le rapport traite les scénarios accidentels déjà identifiés en 2009, soient :

- la rupture guillotine d'une canalisation de biogaz située à l'extérieur,
- l'explosion dans un digesteur industriel ou agricole en fonctionnement normal et à vide,
- l'explosion de l'ATEX interne dans un gazomètre agricole ou industriel,
- l'explosion de l'ATEX (UVCE) formée à la suite de la ruine du gazomètre.
- l'explosion dans un local technique liée à une fuite de gaz à l'intérieur de ce local,

Les résultats des calculs sont des ordres de grandeur de distances d'effet pour les principaux scénarios accidentels associés aux installations de méthanisation. Ils sont donnés à titre indicatif pour estimer les conséquences accidentelles des principaux scénarios redoutés. Des calculs plus affinés pourraient être réalisés au cas par cas.

Pour les scénarios de rupture de canalisations et de ruine, 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 ont été déterminées.

Les distances des effets toxiques sont directement influencées par la concentration d'H_2S présent dans le mélange initial. 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 H_2S sont de l'ordre de 3 à 8 fois supérieur. Il existe en général des traitements simples d'épuration d'H_2S de gaz bruts (par introduction d'air) qui ramènent la composition résiduelle en H_2S à quelques dizaines de ppm. La teneur en H_2S 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 ; les modélisations des effets toxiques ne sont donc pas réalisées dans ce cas.

La modélisation du scénario d'explosion des digesteurs a été l'occasion de présenter une méthode de calcul simplifiée permettant, en fonction de plusieurs paramètres, tels que la surface d'évent, la pression d'ouverture ou la nature des évents, d'évaluer simplement les effets de l'explosion secondaire dans les configurations où cela s'avère nécessaire. Les digesteurs peuvent être classés en catégories auxquelles il est possible d'associer une méthode de calcul de l'énergie d'explosion et un indice multi-énergie qui correspond à la violence de celle-ci. Les distances peuvent alors être calculées en utilisant les abaques présentés en annexe 1.

Les deux scénarios impliquant des gazomètres ont été traités pour des volumes de 50 à 5000 m^3 :

- l'explosion interne : présence d'un mélange inflammable de biogaz et d'air et d'une source d'inflammation dans le gazomètre. Des effets de surpressions sont possibles,
- la ruine du gazomètre qui correspond à la libération brutale de la totalité du biogaz présent dans le gazomètre en fonctionnement normal. Le biogaz se disperse et une partie du nuage, en se mélangeant à l'air devient inflammable. Le nuage rencontre alors sur son parcours une source d'inflammation et explose. Des effets thermiques (flash-fire) et de surpression (UVCE) sont alors possibles.

Enfin, les explosions de locaux ont été abordés. Les géométries complexes et le large éventail de configurations n'ont pas permis de développer une méthode simplifiée. Quelques cas de modélisations d'explosion dans des locaux techniques ont donc été réalisés en faisant varier les paramètres les plus influents tels que la géométrie du bâtiment, la surface d'évents, le type de fuite ou l'encombrement intérieur, afin de donner quelques ordres de grandeur de distances.

6 Annexes

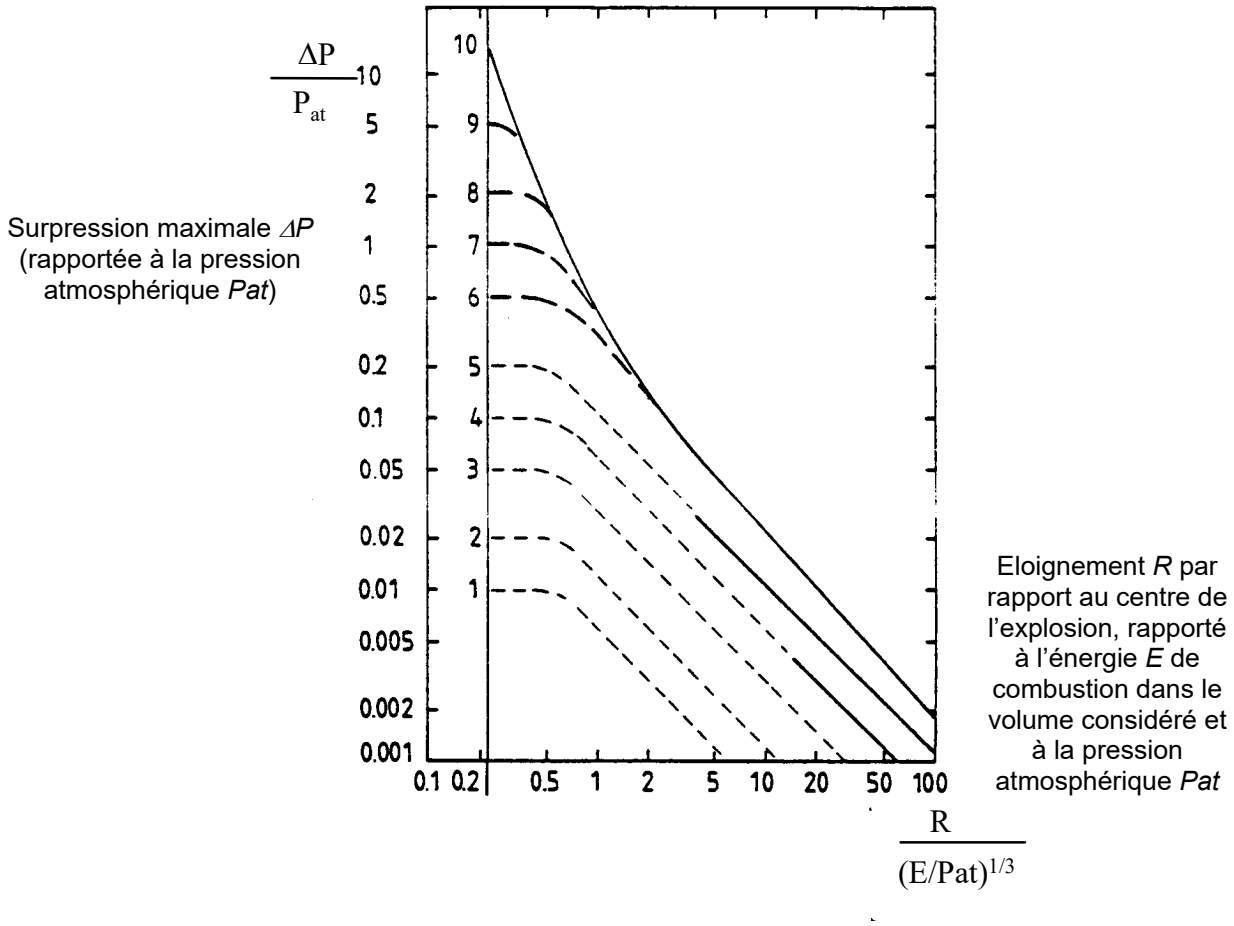
Liste des annexes :

- Annexe 1 : Présentations de la méthode multi-énergie
- Annexe 2 : Présentation du logiciel de modélisation EFFEX

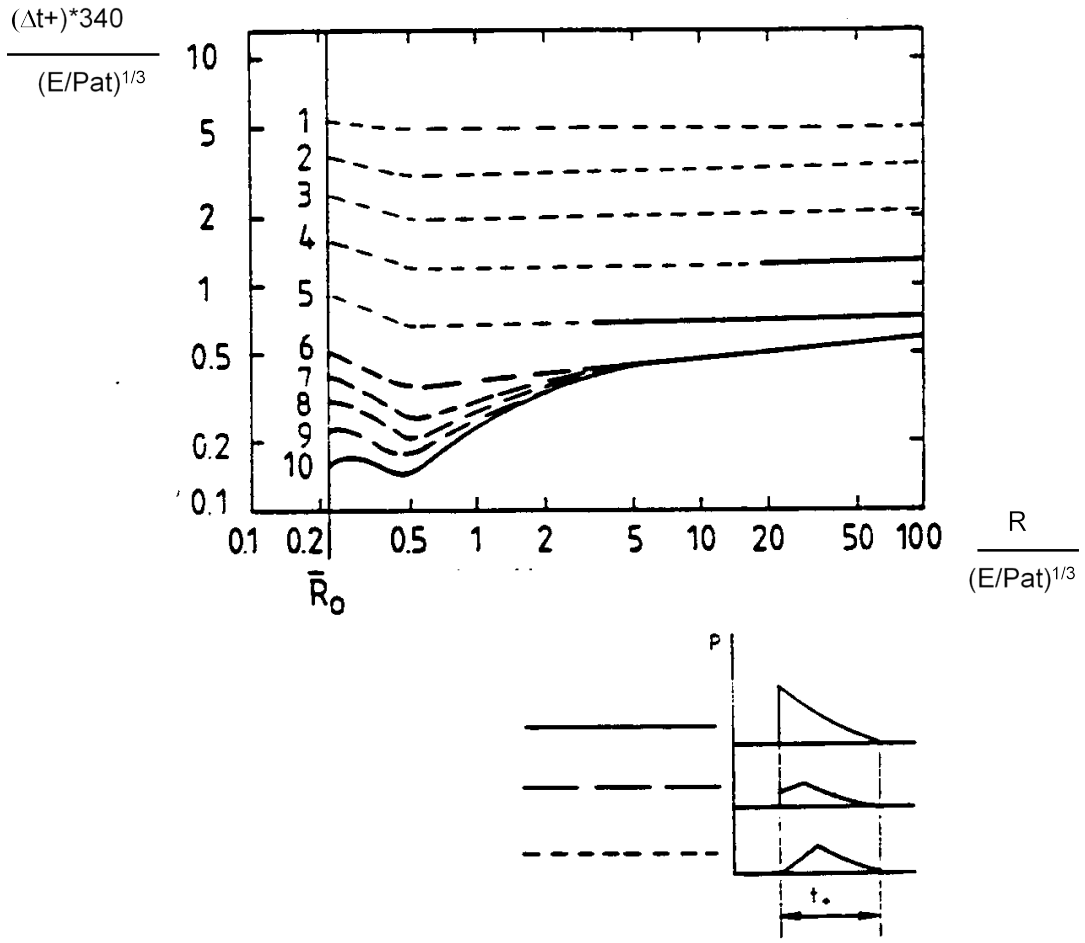
Annexe 1

Présentation de la méthode 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 important 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

EFFEX

Description de EFFEX

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

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

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

Modélisation de l'explosion

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

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

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

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

Eclatement d'une paroi

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

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

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.

Projection des fragments

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

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

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

Méthode de résolution

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

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

Validation du code

Les performances du code ont été testées par rapport :

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

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

Références

Ch. PROUST, 2000 : Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement – EFFEX, un outil de simulation, rapport Ineris DRA CPr/CPr – 00-22751/effexc.doc, téléchargeable sur www.Ineris.fr.

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc technologique Alata • BP 2 • F-60550 Verneuil-en-Halatte
03 44 55 66 77 • Ineris@Ineris.fr • www.Ineris.fr

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable