

RAPPORT D'ÉTUDE
DRA-14-133344-01580B

07/10/2014

**ETUDE DES DISTANCES D'EFFETS
(EXPLOSION, THERMIQUE, TOXIQUE) DES
PRINCIPAUX SCENARIOS MAJORANTS
D'UNITE D'EPURATION DE BIOGAZ ET
D'INJECTION DE BIOMETHANE.**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

**Etude des distances d'effets (explosion, thermique, toxique)
des principaux scénarios majorants d'unité d'épuration de biogaz et
d'injection de biométhane.**

RAPPORT FINAL

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Sébastien EVANNO, Jérôme
HEBRARD

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

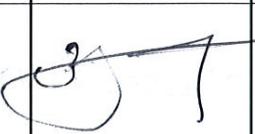
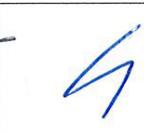
	Rédaction	Vérification	Vérification	Approbation
NOM	J. HEBRARD S. EVANNO	B. DEBRAY	G. CHANTELAUVE	F. ROUSSEAU
Qualité	Ingénieur Modélisation Responsable Etude et Recherche EAT DRA DRC 93 Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Procédés et Energies Propres et Sûrs Direction des Risques Accidentels	Délégué Appui Administration Direction des Risques Accidentels	Chef de Pôle Substances et Procédés Direction des Risques Accidentels
Visa				

TABLE DES MATIÈRES

GLOSSAIRE	5
1. INTRODUCTION	7
2. RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE ET AU BIOGAZ.....	9
2.1 Rappel des risques liés au méthane	9
2.2 Rappel des risques liés au biogaz.....	9
3. ETAT DES LIEUX DU DEVELOPPEMENT ET DES TECHNOLOGIES DES PROCEDES D'EPURATION DE BIOGAZ	13
3.1 Etat des lieux du développement des procédés d'épuration de biogaz.....	13
3.2 Etat des lieux des technologies des procédés d'épuration de biogaz [7]	14
3.2.1 L'absorption (184).....	14
3.2.1.1 <u>Procédé d'absorption physique par lavage à l'eau (89)</u>	14
3.2.1.2 <u>Procédé d'absorption physique avec solvant organique (52)</u>	15
3.2.1.3 <u>Procédé d'absorption chimique par lavage aux amines (33)</u>	15
3.2.2 L'adsorption [Procédé « Pressure Swing Adsorption » (57)]	16
3.2.3 La perméation [Procédé par séparation membranaire (35)]	17
3.2.4 La cryogénie [Procédé par épuration cryogénique (3)].....	18
3.3 Critères économiques et de performance dans le choix des technologies des procédés d'épuration de biogaz	18
3.3.1 Les critères économiques	18
3.3.2 Les critères de performance.....	19
4. IDENTIFICATION DES SCENARIOS MAJORANTS DES DEUX PROCEDES D'EPURATION RETENUS PAR L'INERIS.....	21
4.1 Démarche de l'INERIS dans la sélection de deux technologies d'épuration de biogaz.....	21
4.2 Description succincte du procédé d'épuration FLOWTECH.....	22
4.3 Description succincte du procédé d'épuration AIR LIQUIDE.....	24
4.4 L'installation d'injection dans le réseau	25
5. EVALUATION DES POTENTIELS DE DANGERS DES TROIS SCENARIOS DANGEREUX RETENUS	27
5.1 Phénomènes dangereux retenus	27
5.2 Rappel sur les connaissances relatives à la modélisation des distances d'effets de phénomènes accidentels	27

5.2.1 Hypothèses générales	27
5.2.2 Rappel des valeurs des seuils réglementaires	28
5.3 Evaluation des effets toxiques, thermiques et de pression.....	29
5.3.1 Evaluation des effets toxiques	30
5.3.2 Evaluation des effets thermiques	31
5.3.3 Evaluation des effets de surpression	32
5.3.3.1 <u>Explosions d'un nuage inflammable de biogaz en milieu non confiné</u>	32
5.3.3.2 <u>Explosion d'un nuage inflammable de biogaz en milieu confiné</u>	32
5.3.3.2.1 <i>Description de EFFEX</i>	32
5.3.3.2.2 <i>Modélisation de l'explosion</i>	33
5.3.3.2.3 <i>Eclatement d'une paroi</i>	33
5.3.3.2.4 <i>Méthode de résolution</i>	33
5.3.3.2.5 <i>Validation du code</i>	33
5.4 Scénario de rupture de canalisation aérienne en entrée d'épuration	34
5.4.1 Définition du scénario	34
5.4.2 Calculs de dispersion	34
5.4.3 Calculs des effets dus aux jets enflammés	35
5.4.4 Calcul des effets de surpression	35
5.5 Scénario de rupture de canalisation aérienne en sortie d'épuration.....	36
5.5.1 Définition du scénario	36
5.5.2 Calculs de dispersion	36
5.5.3 Calculs des effets dus aux jets enflammés	37
5.5.4 Calcul des effets de surpression	37
5.6 Scénario de rupture de tuyauterie à l'intérieur du container abritant le procédé d'épuration.....	37
5.7 Conclusion sur la comparaison du potentiel de danger entre une unité d'épuration de biogaz et une unité de méthanisation	39
6. CONCLUSION	41
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	43
8. ANNEXES	45

GLOSSAIRE

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

DRA : Direction des Risques Accidentels,

DRC : Direction des Risques Chroniques,

H₂S : Hydrogène sulfuré ou sulfure d'hydrogène,

ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux,

Kg : Violence d'explosion de gaz,

LIE : Limite Inférieure d'Explosibilité,

LSE : Limite Supérieure d'Explosibilité,

m : mètre,

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

P : Pression,

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur,

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

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie.

SEI : Seuil des Effets Irréversibles,

SEL : Seuil des Effets Létaux,

SELS : Seuil des Effets Létaux Significatifs,

SEL 1% : Seuil des Effets Létaux 1 %,

SEL 5% : Seuil des Effets Létaux 5 %,

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

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

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

VLE : Valeur Limite d'Exposition,

VME : Valeur Moyenne d'Exposition.

1. INTRODUCTION

En s'appuyant sur l'expertise transversale de la DRA et de la DRC, le programme DRA_DRC 93 qui porte sur les risques liés aux procédés de méthanisation de la biomasse et des déchets, a pour objectif de recenser et de produire des données de sécurité nécessaires à la maîtrise des risques accidentels et chroniques des différents procédés de méthanisation.

La méthanisation permet de traiter les déchets organiques en produisant du biogaz, valorisable en énergie in situ, électrique ou thermique. Le biogaz peut également être converti en biométhane via une nouvelle filière de valorisation nommée « injection », afin d'être injecté dans le réseau de gaz naturel, ou utilisé comme carburant. Pour cela, il est nécessaire de procéder à l'épuration du biogaz.

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

Dans la poursuite de l'opération A réalisée en 2009 du programme d'appui DRA_DRC 93 [1], l'INERIS a identifié une liste de scénarios majorants à retenir et a calculé des distances d'effets (explosion, thermiques et dispersion toxique) des scénarios accidentels majorants pour les principaux cas types rencontrés sur des unités industrielles d'épuration de biogaz et d'injection de biométhane.

Les distances d'effets ont été calculées à partir de données sur le fonctionnement d'installation fournies par deux constructeurs de deux procédés d'épuration de biogaz (procédé par lavage à l'eau et procédé par perméation sélective) qui seront prédominants dans les prochaines années.

Cette étude consiste à évaluer des distances d'effets (explosion, incendie, dispersion toxique) utiles pour de nombreux industriels ou les pouvoirs publics.

2. RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE ET AU BIOGAZ

2.1 RAPPEL DES RISQUES LIES AU METHANE

Le méthane est un gaz extrêmement inflammable et non toxique.

Désignation	CAS	FDS	Symbole	Risques
Méthane (CH ₄)	74-82-8	/	H220 : gaz extrêmement inflammable	Gaz inflammable de catégorie 1
Caractéristiques				
Masse volumique à 20°C (kg/m ³)	0,7	Vitesse de propagation de flamme (m/s) en mode calme		0,39
Densité / air	0,54	LSE (% volume)		15
LIE (%volume)	4,4 à 5	Kg (bar.m.s ⁻¹)		55
Pmax (bar)	7,1	Energie Minimale d'Inflammation (mJ)		0,28
Température d'Auto-Inflammation (°C)	535 à 650	Pouvoir Calorifique Inférieur (kWh/m ³)		10,7 à 12,8

Tableau 1 : Principales caractéristiques du méthane

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

En cas d'inflammation retardée, une explosion du nuage de gaz formé est possible. Elle est généralement suivie d'un feu torche.

2.2 RAPPEL DES RISQUES LIES AU BIOGAZ

La composition du biogaz et la structure de l'installation (matériau, volume, forme,...) sont les principales variables qui influencent le dimensionnement des distances d'effets. De plus, le confinement et la résistance de la structure du type de l'installation sont importants car ces paramètres influent sur la violence d'une explosion au sein de l'installation.

Les compositions de plusieurs biogaz d'origines variées (agricole, ordures ménagères, boues de station d'épuration) sont présentées dans le tableau 2 ci-après. Trois types de biogaz ont été retenus sur la base d'un rapport de l'AFFSET [2] relatif aux risques sanitaires liés à l'injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel. La teneur en H₂S de chaque type de biogaz dépend principalement de l'origine de celui-ci (origine de la matière organique qui a été méthanisée) et des traitements qu'il a subi (biogaz brut ou de biogaz épuré).

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

Tableau 2 : Définition des six configurations de composition de biogaz brut et épurés retenus

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

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

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

Inflammabilité / Explosibilité du biogaz

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Des essais conduits par l'INERIS en 2006 [3] ont conduit aux résultats suivants :

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

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

Toxicité aiguë par inhalation du biogaz

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

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

Tableau 4 : Concentrations seuils de l'H₂S en fonction de la durée d'exposition [1]

On notera également les valeurs seuils suivantes pour l'H₂S :

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

Anoxie et intoxication liée à une fuite de biogaz dans un espace confiné

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, notamment le CO₂ en cas de fuite de biogaz dans un espace confiné, entraîne le risque d'anoxie dès lors que la teneur en O₂ est inférieure ou égale à 19%.

Vis-à-vis de la toxicité du CO₂ en cas de fuite de biogaz dans un espace confiné, le seuil des effets irréversibles de la teneur en CO₂ dans l'air est de 5 % et le seuil des premiers effets létaux de la teneur en CO₂ dans l'air est de 10 % (Réf : Guide méthodologique PPRT).

3. ETAT DES LIEUX DU DEVELOPPEMENT ET DES TECHNOLOGIES DES PROCEDES D'EPURATION DE BIOGAZ

Parmi les différentes voies de valorisation du biogaz, le biométhane demande une épuration poussée du gaz puisque la grande majorité des impuretés (CO₂, H₂S, H₂O, COV, siloxanes) doit être éliminée. La qualité du biométhane est alors équivalente à celle du gaz naturel. Il peut ainsi être utilisé comme carburant ou être directement injecté dans les réseaux de distribution ou de transport de gaz naturel.

3.1 ETAT DES LIEUX DU DEVELOPPEMENT DES PROCEDES D'EPURATION DE BIOGAZ

Le marché du biométhane européen est actuellement concentré autour de la Suède et de l'Allemagne qui ont investi depuis de nombreuses années dans cette énergie. A eux deux, ils représentent plus de 78% de la production de biométhane en Europe. Bénéficiant d'une filière industrielle dédiée à la production, l'épuration et la valorisation du biogaz, ces deux pays profitent d'un marché européen en plein développement offrant de réelles perspectives d'investissement. Le dynamisme allemand profite à ses voisins d'Europe de l'Est, pays représentant un nouveau marché pour les acteurs de la filière.

On note également des différences structurelles techniques et organisationnelles telles que la présence ou non d'un réseau de gaz naturel développé ou l'existence de régies municipales d'utilités comme en Allemagne, en Suède ou en Autriche. 150 nouvelles installations en France sont attendues d'ici 2020 et 400 nouvelles installations en Allemagne d'ici 2020.

Par ailleurs, la production européenne actuelle est le résultat d'une croissance forte et en pleine accélération, puisque le nombre d'installations de biométhane a plus que triplé entre 2006 (43 installations) et 2010 (160 installations).

Parmi les marchés européens, la France est l'un des plus prometteurs au vu du gisement disponible de biogaz non valorisé, qui ouvre la voie à une alternative pour la valorisation du biogaz en biométhane. Cela permettra des optimisations en déplaçant le lieu d'utilisation de l'énergie au plus proche de la demande.

En France, le contexte réglementaire encadrant la production et la valorisation de biogaz s'est fortement consolidé depuis 2009 [4]. Ces textes ont permis une clarification des procédures administratives en créant un cadre réglementaire dédié aux installations de production et de valorisation du biogaz.

Un cadre réglementaire spécifique à la filière biométhane en France s'est également mis en place avec la parution en novembre 2011 des décrets relatifs à l'injection du biométhane sur les réseaux de distribution et de transport du gaz naturel [5], [6].

3.2 ETAT DES LIEUX DES TECHNOLOGIES DES PROCESSES D'EPURATION DE BIOGAZ [7]

La production de biométhane, demande un enrichissement (upgrading) du biogaz par une épuration plus poussée du CO₂ principalement. En effet, le biométhane doit être de composition similaire au gaz naturel. Le biométhane doit répondre à des spécifications strictes pour être injecté dans les réseaux ou utilisé comme carburant.

Plusieurs technologies du traitement du biogaz sont disponibles sur le marché. La principale étape concerne le séchage du biogaz brut et la séparation du CO₂ et enfin l'ajustement du PCI pour le gaz produit. Ces technologies sont présentées dans les paragraphes suivants ainsi que la séparation de composés trace.

Il existe quatre grandes familles de technologie d'épuration du biogaz pour atteindre ces spécifications.

NB : Les chiffres entre parenthèse dans les en-têtes de paragraphes indiquent le nombre d'unités en Europe au 1^{er} janvier 2012.

3.2.1 L'absorption (184)

Le principe de séparation par absorption est basé sur les différences de solubilités des composants du gaz dans un même liquide de lavage. Dans une unité d'épuration utilisant cette technique, le biogaz brut est intensivement mis en contact avec du liquide dans une colonne de lavage dont l'intérieur est recouvert de matière plastique, ceci afin d'accroître la zone de contact entre les phases. Les composés à séparer du biogaz (le CO₂ principalement) sont nettement plus solubles dans le liquide que le méthane et sont extraits du gaz. Ainsi, le gaz qui reste dans la colonne est plus riche en méthane et le liquide de lavage extrait de la colonne est riche en dioxyde de carbone. Afin de maintenir les performances de l'absorption, le liquide de lavage doit être régulièrement remplacé par un liquide nouveau ou être régénéré dans le cadre d'une étape séparée (désorption ou étape de régénération). Habituellement, trois différentes technologies utilisant ce principe sont utilisées.

3.2.1.1 Procédé d'absorption physique par lavage à l'eau (89)

Les gaz absorbés sont physiquement liés au liquide de lavage qui est l'eau pour cette technologie. Le CO₂ a une plus forte solubilité dans l'eau que le méthane et va dans ce cas être efficacement dissout particulièrement avec de basses températures et de fortes pressions. De même que le CO₂, l'hydrogène sulfuré et l'ammoniac peuvent être dissout dans les installations utilisant l'eau comme solution de lavage. Le courant d'eau quittant la colonne est saturé de CO₂ et est transféré vers une tour de dégazage où la pression est brutalement réduite, ce qui provoque la libération de la majeure partie du gaz dissous. Ce gaz libéré contient principalement du CO₂, mais également une certaine quantité de méthane (lui aussi soluble dans l'eau mais dans une moindre mesure) qui va être reconduit vers le biogaz brut en entrée. Avant d'être renvoyée dans la colonne d'absorption, l'eau doit d'abord être régénérée et pour cela elle passe dans une colonne de désorption dans laquelle elle est mélangée à un courant d'air « décapant » dans lequel le CO₂ restant est séparé. L'eau ainsi régénérée est ensuite envoyée à l'absorbeur comme nouveau liquide de lavage.

L'inconvénient de cette méthode est que l'oxygène et l'azote, composants principaux de l'air, sont dissout dans l'eau pendant la régénération et passent dans le flux de biométhane épuré. C'est pourquoi le biométhane produit par cette technique contient de l'oxygène et de l'azote. Par ailleurs le flux de biométhane produit étant saturé en eau, l'étape finale d'épuration sera le séchage du gaz, en appliquant par exemple un lavage au glycol.

L'application de cette technologie est intéressante pour produire du biométhane si :

- La présence d'oxygène et d'azote dans le biométhane ainsi que la réduction du PCI est acceptable,
- L'unité projetée est moyenne ou grande,
- Le flux de biométhane peut être directement utilisé à la pression de consigne et qu'aucune phase de compression n'est requise,
- La demande en chaleur de l'unité de méthanisation (chauffage du digesteur) peut être partiellement couverte par le traitement des gaz pauvres (offgaz).

3.2.1.2 Procédé d'absorption physique avec solvant organique (52)

Très semblable au lavage à l'eau, cette technologie utilise des solutions à base de solvants organiques (ex polyéthylène glycol) à la place de l'eau. Le CO₂ a une solubilité supérieure dans ces solvants, ce qui permet une réduction du volume de liquide circulant et de la taille de l'unité pour une même capacité de traitement de biogaz brut.

Les solvants organiques (e.g. polyéthylène glycol) peuvent absorber le CO₂, l'H₂S, l'O₂, l'eau et les composés azotés même si dans la pratique le biogaz subit un prétraitement pour ces derniers.

3.2.1.3 Procédé d'absorption chimique par lavage aux amines (33)

Les solutions chimiques comme les solutions d'amines (e.g. mono-éthanol amine : MEA), sont utilisées de la même manière mais dans ce cas le CO₂ est adsorbé par réaction chimique avec les amines et la régénération se fait par réaction inverse. L'absorption chimique est caractérisée par une absorption physique des composés du biogaz dans un liquide de lavage, suivie par une réaction chimique entre les composants du liquide de lavage et les composants gazeux absorbés dans la phase liquide. De ce fait, la liaison des composés de gaz indésirables dans le liquide de lavage est significativement plus forte et la capacité d'absorption du liquide de lavage est plusieurs fois supérieure. La réaction chimique est fortement sélective et la quantité de méthane absorbé dans le liquide est très basse, ce qui entraîne un rendement de méthane très important avec donc une très faible perte de méthane. L'affinité forte du CO₂ avec ce type de solvant (solutions aqueuse de Monoéthanolamine MEA, Diéthanolamine DEA et Methyldiéthanolamine MDEA), permet d'avoir une pression du process inférieure à celui du lavage à l'eau à capacité de traitement identique.

Typiquement, le lavage aux amines est un procédé qui s'opère à une certaine pression, celle du biogaz brut et dans ce cas aucune phase de compression n'est requise. Si la haute capacité et la forte sélectivité de la solution aux amines se révèlent être un avantage lors de la phase d'absorption, elles s'avèrent au contraire être un inconvénient lors de la phase de régénération de la solution de lavage.

La phase de régénération des liquides de lavage nécessite en effet un important apport d'énergie sous forme de chaleur. La solution saturée est chauffée à 160°C, température à laquelle le CO₂ est relâché et quitte la colonne de régénération sous forme d'un flux de gaz pauvre (offgaz). Puisqu'une partie du liquide de lavage est perdue par évaporation lors de la production de biométhane, celui-ci doit être approvisionné régulièrement. L'hydrogène sulfuré pourrait également être séparé du biogaz brut par absorption chimique, mais des températures plus élevées seraient nécessaires lors de la phase de régénération. C'est pourquoi il est recommandé de séparer ce composé avant le lavage aux amines.

Cette technologie est avantageuse si :

- On désire un rendement de production de méthane très élevé et par conséquent pas de traitement des gaz pauvres (offgaz) pour réduire les émissions de méthane,
- Une forte concentration en méthane est souhaitée dans le biométhane produit,
- La taille de l'installation est importante ou moyenne,
- Le biométhane peut être utilisé à pression atmosphérique et aucune compression complémentaire n'est nécessaire,
- Les besoins en chaleur nécessaires lors de la phase de régénération peuvent être couverts par la production du site. En effet, la nécessité de la chaleur pour la régénération est souvent considérée comme un inconvénient et rend ce procédé économiquement moins intéressant pour les faibles débits (< 500 Nm³/h).

3.2.2 L'adsorption [Procédé « Pressure Swing Adsorption » (57)]

La séparation des gaz par adsorption est basée sur les différences de comportements d'adsorption des composés du gaz sur une surface solide sous haute pression. Habituellement, différents types de charbon actifs ou de tamis moléculaires (zéolithes) sont utilisés comme matériau d'adsorption. Ces matériaux adsorbent sélectivement le CO₂ du biogaz brut, tout en enrichissant son contenu en méthane. Après l'adsorption sous haute pression, le matériau adsorbant chargé est régénéré par une diminution progressive de la pression avec du biogaz brut ou du biométhane. Au cours de cette étape, le gaz pauvre (offgaz) est libéré du matériau adsorbant. Suite à cela, la pression est à nouveau augmentée avec le biogaz brut ou le biométhane, et le matériau adsorbant est prêt pour la prochaine séquence d'adsorption. A échelle industrielle, l'unité d'épuration comprend 4, 6 ou 9 absorbeurs en parallèle, à des positions différentes durant la séquence, afin d'avoir une opération continue. Pendant la phase de décompression de la régénération, la composition du gaz pauvre (offgaz) évolue. Le méthane adsorbé a été séparé avant (à haute pression) et le volume de CO₂ est préférentiellement désorbé à basse pression. De fait le gaz pauvre (offgaz) de cette première étape

de décompression est renvoyé en tête avec le biogaz brut afin de réduire la perte en méthane. Le gaz pauvre (offgaz) issu de la dernière étape de régénération peut être envoyé vers une seconde étape d'absorption, vers l'unité de traitement de l'offgaz ou bien évacué dans l'atmosphère. L'eau et le H₂S doivent être séparés avant la colonne d'absorption car ils satureront de manière irréversible le matériel d'adsorption.

Cette technologie est intéressante si :

- La teneur en méthane du flux de biométhane (95 à 99 %) est acceptable pour les valorisations prévues,
- La capacité de l'installation est petite à moyenne,
- Le biométhane n'a pas besoin d'être comprimé par la suite pour être livré,
- La demande en chaleur du digesteur peut être en partie couverte par le traitement des gaz pauvres (offgaz).

3.2.3 La perméation [Procédé par séparation membranaire (35)]

Les membranes utilisées pour l'épuration du biogaz sont faites de matériaux perméables au CO₂, à l'eau et à l'ammoniac. Le sulfure d'hydrogène, l'oxygène, et l'azote sont filtrés par la membrane jusqu'à un certain seuil tandis que le méthane traverse seulement en très faible quantité. Ces membranes sont faites en matière polymère comme le polysulfone, polyimide ou le polydiméthylsiloxane. Ces matériaux montrent une bonne sélectivité dans la séparation du méthane et du CO₂ avec une certaine robustesse face aux composés traces contenus dans le biogaz brut. Afin d'offrir une surface membranaire suffisante dans une unité compacte, ces membranes sont organisées en fibres creuses et combinées en modules.

Après la phase de compression, le biogaz brut est refroidi pour le sécher et séparer l'ammoniac. Après l'avoir réchauffé avec la chaleur du compresseur, le H₂S est absorbé grâce à des oxydes de zinc ou de fer. Pour finir, le gaz est envoyé vers une unité de perméation (en une ou plusieurs étapes).

Le nombre et les interconnexions de ces étapes ne seront pas déterminés par la qualité de biométhane attendue mais par le taux de récupération de méthane et l'énergie de compression nécessaire à cette opération. Les unités récentes, de conception plus complexe, sont en mesure d'avoir des taux de récupération de méthane très élevés avec une consommation d'énergie relativement faible. La vitesse du compresseur et la pression sont toutes deux contrôlées afin de fournir la qualité désirée ainsi que la quantité de biométhane à délivrer.

Cette technologie est avantageuse si :

- On souhaite une haute flexibilité du procédé, pour une adaptation à l'installation de production locale de biogaz et ainsi que pour la souplesse de fonctionnement en charge partielle et pour la dynamique des unités,
- La teneur en méthane du flux de biométhane (95 à 99 %) est acceptable pour les valorisations prévues,
- La taille de l'installation est petite à moyenne,

- Le biométhane produit peut être utilisé à la même pression sans compression supplémentaire requise,
- Les besoins de chaleur peuvent être couverts partiellement par le traitement des offgaz,
- Des produits chimiques ou autres consommables doivent être évités,
- Des démarrages rapides à froid après un moment d'arrêt et des opérations d'arrêt / redémarrage fréquentes doivent être réalisées.

Note : *Il existe également des membranes liquide/gaz où les impuretés sont captées par le liquide circulant de l'autre côté de la membrane. Dans ce procédé, le principe physique de la séparation est identique à l'absorption. La membrane permettant d'augmenter la surface d'échange entre le solvant et le gaz et ainsi de diminuer la taille des laveurs.*

3.2.4 La cryogénie [Procédé par épuration cryogénique (3)]

Il s'agit d'une technique la plus récente qui repose sur le fait que le CO₂ se condense à une température plus haute que le CH₄. Cette technique se base sur les propriétés physico-chimiques intrinsèques des gaz, la part de méthane dans les gaz résiduels est très faible.

3.3 CRITERES ECONOMIQUES ET DE PERFORMANCE DANS LE CHOIX DES TECHNOLOGIES DES PROCES D'EPURATION DE BIOGAZ

Le choix d'une technologie passe par une analyse technico-économique complète permettant de prendre en compte le contexte industriel de chaque projet et la spécificité des installations biogaz.

3.3.1 Les critères économiques

Les critères économiques suivants doivent être pris en compte dans l'analyse :

- ✓ Les coûts d'investissement (CAPEX) liés à la fourniture intrinsèque des équipements.
- ✓ Les coûts opératoires et de maintenance (OPEX) incluant la consommation des utilités requises telles que l'eau, l'électricité, les solvants..., ainsi que les coûts de remplacement, de régénération ou d'élimination des différents supports d'épuration (membrane, charbon, solvant, eau...).
- ✓ Les coûts d'intégration, souvent minimisés : Ils peuvent représenter une part importante de l'investissement. On note parmi ces coûts : le génie civil, les équipements de sécurité (arrêt de flamme, vanne de sécurité, torchère), l'instrumentation et l'automatisme, etc...
- ✓ Les coûts de mobilisation et de préparation des substrats (transport, collecte, déconditionnement des substrats,...) qui vont jouer sur la production et sur la disponibilité du biogaz à épurer.

3.3.2 Les critères de performance

Les critères de performances sont :

- ✓ La qualité du biométhane obtenue (en % de CH₄). Selon l'usage, utilisation comme biométhane carburant ou injection sur le réseau et selon les contraintes réglementaires propres à chaque pays, la qualité du biométhane requise peut varier comme l'illustre le tableau ci-après.
- ✓ La perte de CH₄ du système d'épuration. En fonction de la technologie utilisée une partie du CH₄ est perdue durant la phase d'épuration. Cette perte impacte directement la rentabilité du projet puisqu'une partie du méthane n'est pas valorisée. De plus, certains pays imposent un taux de perte de méthane inférieur à un certain seuil pour être éligible aux tarifs d'achat. Pour illustration, ce taux doit être inférieur à 0,5% (vol) en Allemagne.
- ✓ La maturité de la technologie et les références industrielles associées.

Il est difficile de réaliser une comparaison de technologies parce que beaucoup de paramètres dépendent fortement du lieu d'implantation et des besoins d'épuration. De plus, les performances des différentes technologies (au regard de la qualité finale du biométhane) ne correspondent pas avec les performances économiques.

Actuellement, le développement technique de la plupart des technologies d'épuration de biogaz permet de satisfaire les besoins des opérateurs.

La technologie membranaire offre la possibilité de s'adapter largement aux évolutions potentielles d'une installation par l'application de différentes configurations de membranes, de plusieurs étages de membrane et des variations de compression. C'est pour cela qu'une plage est donnée pour la plupart des paramètres. Le premier chiffre correspond à une installation « bon marché » avec un taux de récupération de méthane bas, tandis que le nombre de droite correspond à un procédé à haut rendement.

Si on compare les données fournies à la conférence sur le biométhane à Göteborg en 2009 et l'étude de l'ENEA en 2012 [7], les systèmes d'épuration du biogaz sont répartis comme suit :

- procédé de Lavage à l'eau : 32 % à 45 % des installations en Europe ;
- procédé d'absorption physique avec solvant organique : stable à 7 % des installations en Europe ;
- procédé d'absorption chimique – lavage aux amines : 9 % à 24 % des installations en Europe ;
- procédé PSA : 16 % à 33 % des installations en Europe ;
- procédé de séparation membranaire : 4 % à 5 % des installations en Europe ;
- procédé d'épuration cryogénie : stable à 1 % des installations en Europe.

Le Tableau 5 suivant présente une comparaison des différentes technologies d'épuration du biogaz [7].

	Qualité du biométhane	Pertes en CH ₄	Pré-traitement H ₂ S requis	Facilité opératoire	Maturité	Taille des équipements
Absorption physique (Lavage à l'eau)	>97 % CH ₄	Modérée	Non	Facile	Mature	Elevée
Absorption physique (Solvant organique)	>97 % CH ₄	Modérée	Non	Facile	Mature	Elevée
Absorption chimique (Lavage aux amines)	>99 % CH ₄	Faible	Requis	Modérée	Mature	Elevée
Adsorption (« Pressure Swing Adsorption »)	95 - 98 % CH ₄	Elevée	Requis	Complexe	Mature	Elevée
Perméation (Séparation membranaire)	>96 % CH ₄	Elevée	Requis	Facile	Mature	Réduite
Cryogénie (Epuration cryogénique)	90 - 98 % CH ₄	Modérée	Requis	Complexe	Non mature	Modérée

Tableau 5 : Comparaison des différentes technologies d'épuration du biogaz [7]

4. IDENTIFICATION DES SCENARIOS MAJORANTS DES DEUX PROCEDES D'EPURATION RETENUS PAR L'INERIS

4.1 DEMARCHE DE L'INERIS DANS LA SELECTION DE DEUX TECHNOLOGIES D'EPURATION DE BIOGAZ

L'INERIS a contacté des constructeurs d'unités d'épuration de biogaz. Les principaux échanges sont résumés ci-après :

- Le procédé d'absorption physique par lavage à l'eau est le plus répandu en Europe. Le flux de biométhane peut être directement utilisé à la pression de consigne et aucune phase de compression n'est requise ;
- Le procédé d'absorption physique avec solvant organique et le procédé d'absorption chimique par lavage aux amines, même s'ils sont développés en Allemagne, présentent des inconvénients en terme de facilité opératoire, compte tenu de l'utilisation de solvants coûteux en quantité importante.
- Le procédé d'adsorption « PSA » nécessite d'être exploité à 10-12 bar et est plus complexe à exploiter ;
- Le procédé par séparation membranaire sera dominant dans les 10 ans qui viennent pour des raisons de simplicité d'utilisation et de coût (faible empreinte au sol, pas de consommables et faible consommation électrique, grande flexibilité (augmentation de la capacité aisée), faible impact environnemental). De plus, l'arrivée de plusieurs acteurs à tendance à dynamiser le marché sur cette technologie ;
- Le procédé par épuration cryogénique pourra décoller uniquement si le marché est au rendez vous, à savoir, la production de carburant liquide à partir du biogaz.

Sur la base de ces échanges, les deux critères retenus pour sélectionner les deux technologies d'épuration du biogaz sont le taux d'utilisation actuel et le taux d'utilisation futur pressenti. Ainsi, l'INERIS a retenu les deux familles d'épuration de biogaz suivantes. :

- Le procédé d'absorption physique par lavage à l'eau,
- Le procédé par perméation sélective (séparation membranaire).

L'INERIS a sollicité les constructeurs FLOWTECH (procédé par lavage à l'eau) et AIR LIQUIDE (procédé par séparation membranaire) afin de recenser les gammes et la description de leurs procédés d'épuration respectifs. Les données collectées ont permis de :

- définir les plages de variation des débits de fonctionnement de ces deux procédés,
- identifier les paramètres sur le fonctionnement du procédé, nécessaires à la modélisation (concentration maximale en H₂S contenu dans le biogaz brut, diamètre de canalisation, pression, débit, température en entrée et en sortie d'épuration...).

La composition des mélanges gazeux pour les deux procédés d'épuration retenus est exprimée en pourcentage volumique dans le tableau 6 suivant :

	Procédé d'absorption par lavage à l'eau (procédé FLOWTECH)		Procédé par perméation sélective (procédé AIR LIQUIDE)	
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie
CH ₄	61	97,8	65	96,5
CO ₂	36,8	1	35	2,5
N ₂	0,5	1	0	1
O ₂	0,1	0,3	0,1	0
H ₂ O	1,7	-	0	0
H ₂ S (ppm)	2 500	<3	300	<3

Tableau 6 : Composition des mélanges en entrée et en sortie de chaque procédé d'épuration de biogaz retenu

4.2 DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROCÉDE D'ÉPURATION FLOWTECH

Le procédé FLOWTECH dit « système d'absorption par lavage à l'eau » a pour effets de :

- ✓ comprimer le biogaz brut en entrée du procédé,
- ✓ séparer le CO₂, l'H₂S et l'ammoniac dans la tour de lavage par absorption,
- ✓ régénérer l'eau de lavage.

Le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène sont ensuite séparés des autres gaz par absorption dans l'eau sous pression. Après purification la teneur en méthane est > 98%.

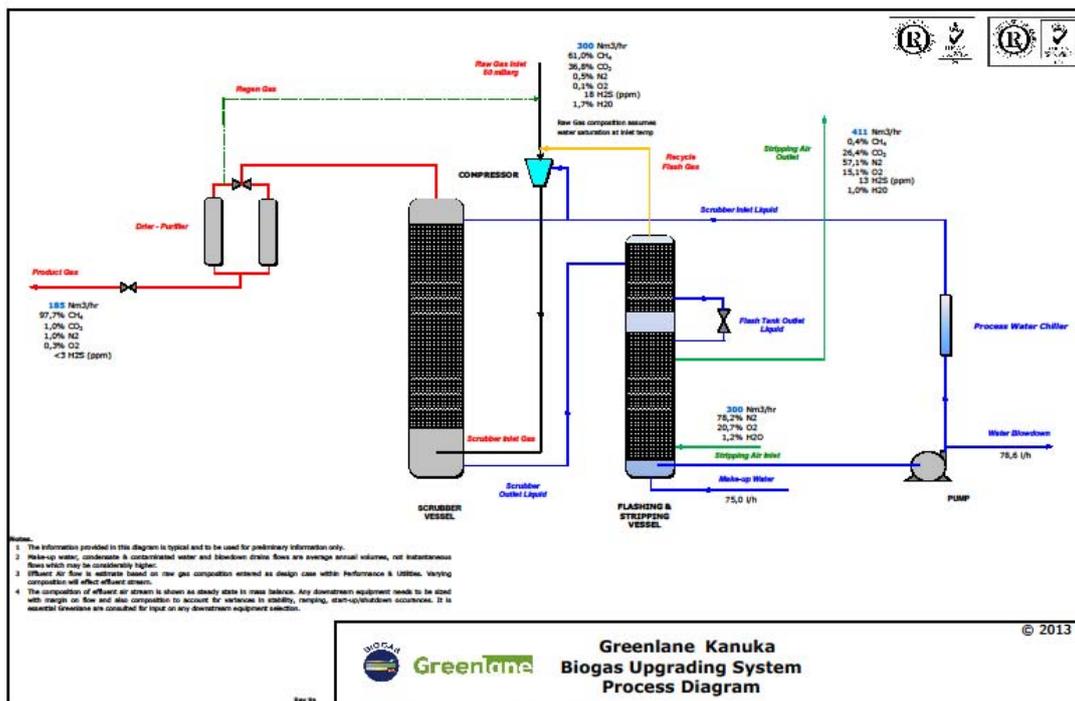
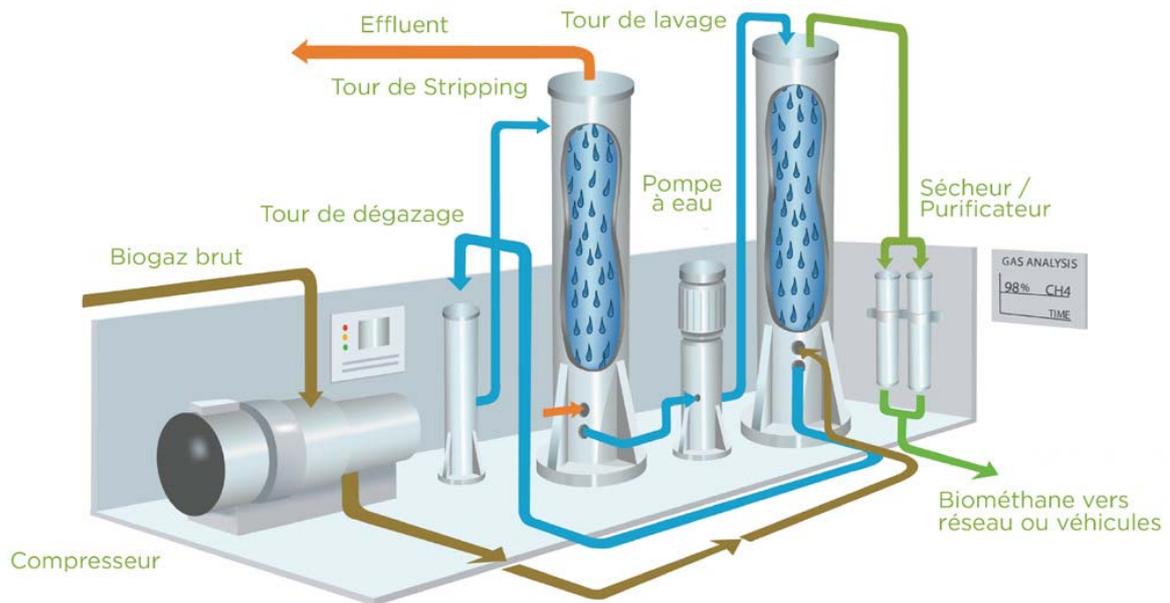


Figure 1: Schéma simplifié du procédé d'épuration FLOWTECH (Source FLOWTECH)

4.3 DESCRIPTION SUCCINCTE DU PROCÉDE D'ÉPURATION AIR LIQUIDE

La solution d'épuration du biogaz permet de produire un biométhane valorisable par injection dans le réseau de gaz naturel. Les installations sont compactes et modulaires.

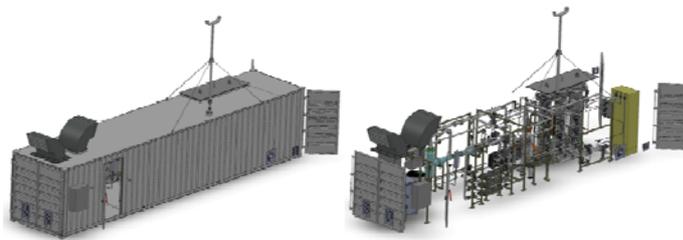


Figure 2 : Vue partielle de la solution d'épuration AIR LIQUIDE
(Source : AIR LIQUIDE)

Les étapes de traitement du système d'épuration sont les suivantes :

1. Un prétraitement pour sécher le biogaz et éliminer les polluants comme principalement l'hydrogène sulfuré.
2. Une compression volumétrique à vis lubrifiées pour permettre la séparation par membranes du CH_4 et du CO_2 .
3. La séparation du CO_2 basé sur deux étages de membranes.

L'élément clé de l'installation est l'étape d'abattement du dioxyde de carbone et d'une partie des gaz résiduels (H_2S , O_2 , H_2O) qui sont séparés du biométhane (CH_4) par perméation sélective. Le gaz séparé au premier étage de membranes, riche en CO_2 , est envoyé à l'évent et peut être traité par oxydation thermique. Le gaz séparé au deuxième étage, plus riche en biométhane, est recyclé à l'entrée du compresseur pour maximiser le taux d'extraction.

Le gaz en sortie du deuxième étage de membranes est du biométhane conforme à la réglementation en vigueur pour l'injection dans le réseau de gaz naturel.

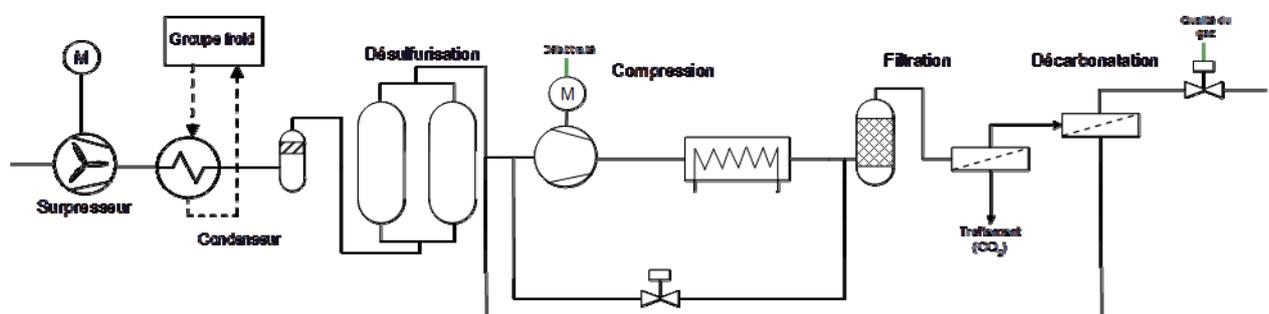


Figure 3 : Schéma simplifié du procédé d'épuration AIR LIQUIDE
(Source : AIR LIQUIDE)

4.4 L'INSTALLATION D'INJECTION DANS LE RESEAU

Après avoir été épuré, le biométhane est injecté dans le réseau de distribution public géré par GRDF. GRDF a pour mission d'odoriser le gaz, de vérifier sa composition, de compter l'énergie injectée et de maintenir la pression dans le réseau de distribution. Ces fonctions sont réalisées par un poste d'injection pourvu par GRDF.

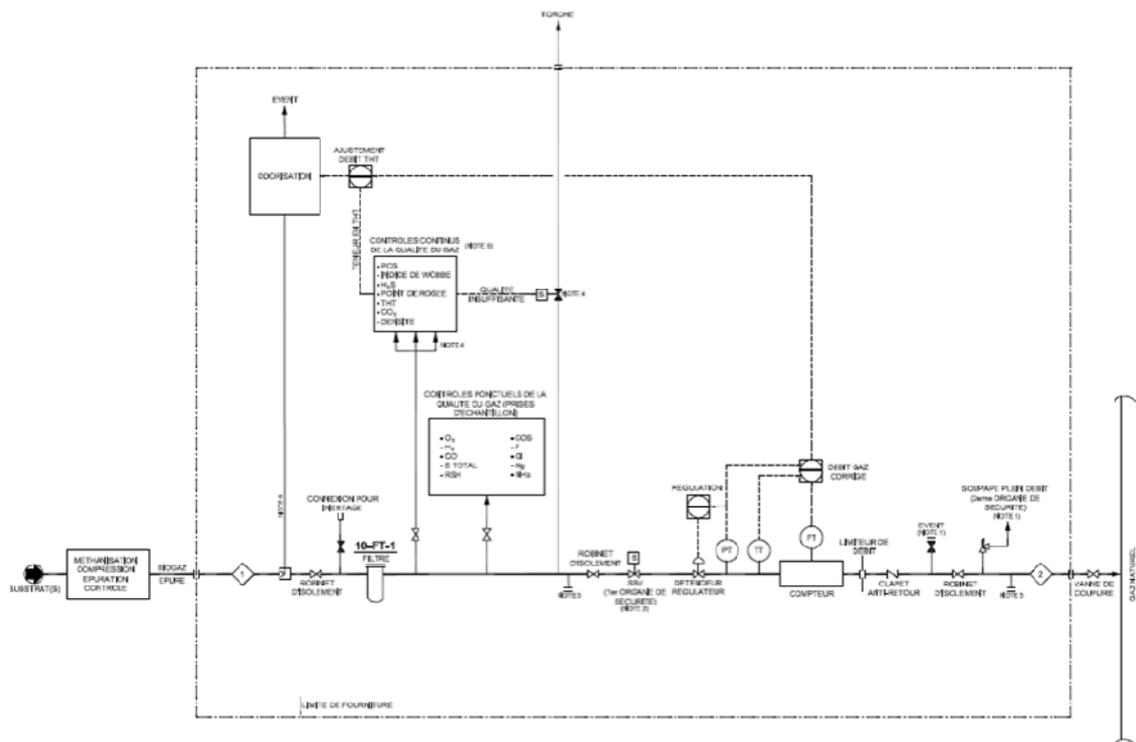


Figure 4 : PID de l'unité d'injection de biométhane (Source : AIR LIQUIDE)

5. EVALUATION DES POTENTIELS DE DANGERS DES TROIS SCENARIOS DANGEREUX RETENUS

5.1 PHENOMENES DANGEREUX RETENUS

Sur la base des données constructeurs sur le fonctionnement des deux procédés d'épuration retenus (procédé FLOWTECH et procédé AIR LIQUIDE), trois scénarios majorants identiques (inhérent à la perte de confinement de biogaz dans un espace confiné et non confiné) ont été retenus par l'INERIS à la fois pour le procédé de lavage à l'eau et pour le procédé par perméation sélective :

1. La rupture de la canalisation aérienne en entrée d'épuration (plus gros diamètre et présence potentielle d'H₂S) avec calcul des distances d'effets toxiques, thermiques et de pression ;
2. La rupture de la canalisation aérienne en sortie d'épuration avant l'injection dans le réseau de gaz naturel (plus gros diamètre, et plus forte pression) avec calcul des distances thermiques et de pression (les niveaux de concentrations des produits toxiques sont très faibles dans les mélanges en sortie d'épuration, les distances d'effets toxiques ne sont donc pas calculées) ;
3. la rupture d'une tuyauterie de biogaz à l'intérieur du container abritant le procédé d'épuration, suivie d'une inflammation impliquant l'explosion du container (éclatement résultant de l'explosion confinée), avec calcul des distances d'effets d'explosion.

5.2 RAPPEL SUR LES CONNAISSANCES RELATIVES A LA MODELISATION DES DISTANCES D'EFFETS DE PHENOMENES ACCIDENTELS

5.2.1 Hypothèses générales

Les principales hypothèses retenues par l'INERIS pour les calculs sont :

- La dispersion du nuage se fait dans l'air atmosphérique frais (concentration nulle dans l'environnement du produit dont la dispersion est étudiée). Cette condition n'est jamais strictement remplie dans une installation ou un site encombré, compte tenu des effets aérodynamiques autour des obstacles (re-circulations...).
- Le terrain est considéré comme plat, de rugosité uniforme et non encombré d'obstacles (jet non impactant). Les conséquences des explosions ont été évaluées en champ libre, sans tenir compte d'éventuels obstacles ou volumes encombrés. Le paramètre de rugosité choisi correspond à un site industriel.
- La source d'émission est fixe dans l'espace.
- Les débits sont calculés à partir de l'hypothèse que le débit est constant, et de durée illimitée (la quantité de gaz disponible est infinie). Cette hypothèse est valable dans la mesure où un régime permanent est rapidement atteint.

5.2.2 Rappel des valeurs des seuils réglementaires

Les grandeurs retenues pour caractériser les risques majeurs sont :

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

Pour chaque grandeur, des seuils d'effets sont définis pour les personnes et pour les structures, conformément aux instructions de l'arrêté du 29 septembre 2005 [8]. Ces seuils d'effets sont des valeurs limites d'une grandeur représentative d'un effet sur les personnes, les biens ou l'environnement, correspondant à un niveau d'intensité de l'effet. Les effets irréversibles sur les personnes correspondent à des blessures dont les victimes garderont des séquelles ultérieures, tandis que les effets létaux correspondent au décès.

✓ Effets sur les personnes

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

Tableau 7 : Seuils d'effets sur les personnes(*).

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

✓ Effets sur les structures

	Seuils des effets de surpression	Seuils des effets thermiques
Seuil des destructions de vitres significatives (plus de 10% des vitres)	20 mbar	5 kW/m ²
Seuil des dégâts légers	50 mbar : Destruction de 75 % des vitres et occasionnelle des cadres de fenêtre	/
Seuil des dégâts graves	140 mbar : Effondrement partiel des murs et tuiles des maisons	8 kW/m ²
Seuil des effets dominos	200 mbar : Destruction des murs en parpaings Destruction de plus de 50 % des maisons en briques	8 kW/m ²
Seuil d'exposition prolongée et seuil des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton	300 mbar	16 kW/m ²
Seuil de tenue du béton pendant plusieurs heures et seuil des dégâts très graves sur les structures béton	/	20 kW/m ²
Seuil de ruine du béton en quelques dizaines de minutes	/	200 kW/m ²

Tableau 8 : Seuils d'effets sur les structures

5.3 EVALUATION DES EFFETS TOXIQUES, THERMIQUES ET DE PRESSION

L'évaluation des effets est présentée dans ce chapitre vis-à-vis des effets générés des phénomènes dangereux identifiés au chapitre 6.1 :

- Dispersion d'un nuage toxique lié à l'H₂S contenu dans le biogaz brut (effets toxiques),
- Feu torche (effets thermiques),
- Explosion d'un nuage inflammable de biogaz en milieu non confiné (effets thermiques et de pression),
- Explosion d'un nuage inflammable de biogaz en milieu confiné (effets thermiques et de pression).

5.3.1 Evaluation des effets toxiques

Les calculs de dispersion toxique ont été réalisés avec Phast 6.53 selon deux conditions météorologiques 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 varient de A à F, de l'atmosphère la plus instable à la plus stable.

Les classes de stabilité et les conditions météorologiques retenues dans le cadre de cette étude sont données dans le tableau 9 suivant :

- la première condition (D5) correspond à des conditions de stabilité neutre, conditions fréquemment rencontrées au cours d'une journée,
- la seconde (F3) correspond à des conditions de dispersion très stables correspondant généralement à des conditions nocturnes. Dans ces conditions, il se produit très peu de dilution autour de l'axe du panache.

Stabilité atmosphérique	-	D	F
Vitesse du vent	[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 9 : Conditions météorologiques

Le tableau 10 suivant présente les valeurs de concentrations correspondant aux seuils d'effets des gaz toxiques présents dans les mélanges de biogaz. Les valeurs indiquées correspondent aux seuils d'effets pour une durée d'exposition de dix minutes :

Seuil d'effets toxiques	CO₂ (ppm)	H₂S (ppm)
Seuil des Effets irréversibles (SEI)	50 000	150
Seuil des Effets Létaux (SEL)	100 000	688
Seuil des Effets Létaux Significatifs (SELS)	200 000	769

Tableau 10 : Concentrations des seuils d'effets des gaz toxiques présents dans les mélanges de biogaz pour une durée d'exposition de 10 minutes

5.3.2 Evaluation des effets thermiques

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, ...).

Le modèle de calcul utilisé par l'INERIS est décrit de façon détaillée dans le référentiel intitulé « Rapport Oméga 8 : Feux Torches » disponible sur le site Internet de l'INERIS www.ineris.fr.

Le modèle utilisé est le modèle de SHELL qui a été élaboré, comme son nom l'indique, par le centre de recherche de Shell à Thornton. Les auteurs principaux de l'élaboration de ce modèle sont Chamberlain (1987), Cook (1990), Johnson (1994).

Les modèles de Cook et de Chamberlain ont été conçus pour modéliser des rejets gazeux ou diphasiques, verticaux, horizontaux ou inclinés mais restent imprécis dans certains cas de figure. Le modèle qui a été utilisé dans cette étude est le modèle de Johnson (version développée dans Phast 6.53), élaboré pour modéliser les feux torche issus de rejets de gaz horizontaux. Il prend en compte l'effet de flottabilité qui donne l'incurvation à la flamme.

Ce modèle dit "semi-empirique" a été validé par des essais effectués par la Société Shell avec entre autre des gaz de pétrole liquéfiés (GPL). Les tests ont été réalisés avec du méthane, propane, éthylène et butane commercial. Les diamètres du brûleur variaient entre 6 et 22 mm et la plage des vitesses de gaz était comprise entre 13 et 200 m/s. Les vitesses de vent transverse étaient variables entre 2,6 m/s et 8,1 m/s (c'est-à-dire approximativement entre 10 km/h et 30 km/h).

Le modèle de feu torche nécessite d'une part, la connaissance des caractéristiques du rejet, telles que :

- la nature du produit (Enthalpie de combustion),
- la pression du rejet,
- le débit du rejet,
- la température du rejet,
- le diamètre équivalent.

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.

A travers des équations basées sur la physique et des corrélations expérimentales, le modèle permet de définir une géométrie de flamme assimilée à un tronc de cône décollé du point de fuite.

Pour une durée de rejet supérieure à 2 minutes, les effets thermiques sont exprimés en flux thermique reçu (en kW/m²). Lorsque la durée de rejet est inférieure à 2 minutes, les effets thermiques peuvent être exprimés en dose thermique reçue (en (kW/m²)^{4/3}.s).

Toutes les distances d'effets thermiques (les seuils des effets thermiques cités dans le tableau 8) sont exprimées depuis le point de rejet.

5.3.3 Evaluation des effets de surpression

5.3.3.1 Explosions d'un nuage inflammable de biogaz en milieu non confiné

- du fait des caractéristiques des jets considérés, le calcul des distances d'effets des explosions est indépendant des conditions météorologiques.
- au vu des différentes configurations de rejet, les explosions de jet correspondent à un indice multi-énergie inférieur ou égal à 4. Les calculs sont réalisés avec un indice pénalisant de 4 (la méthode multi-énergie est présentée en annexe 1).
- le volume inflammable correspond au volume de la plus grande sphère inscrite dans le jet calculé à partir des corrélations de répartition de la concentration (loi de similitude) proposée par Birch (1984) [9].
- pour déterminer les distances d'effets, les seuils des effets de surpression cités dans le tableau 8.

5.3.3.2 Explosion d'un nuage inflammable de biogaz en milieu confiné

Les effets de surpression dus à l'explosion de confinées (bâtiments, chambres à vanes...) sont calculés à l'aide du logiciel EFFEX (annexe 2).

5.3.3.2.1 *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 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.

5.3.3.2.2 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.

5.3.3.2.3 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.

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.

5.3.3.2.4 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.

5.3.3.2.5 Validation du code

Les performances du code ont été testées [10] 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.

5.4 SCENARIO DE RUPTURE DE CANALISATION AERIENNE EN ENTREE D'EPURATION

5.4.1 Définition du scénario

Les données d'entrée du scénario de rupture de la canalisation d'alimentation de l'épuration sont indiquées dans le tableau 11 suivant :

	Procédé lavage à l'eau	Procédé par perméation sélective
Diamètre de la canalisation	150 mm*	80 mm
Vitesse d'écoulement	< 7 m/s	NC**
Débit	300 Nm ³ /h	250 m ³ /h
Pression	50 mbar	200 mbar
Température	30 °C	15 °C
Durée du rejet	10 minutes	
Hauteur du rejet	1 m	
Orientation du rejet	Horizontale	

* : Calculé à partir du débit et de la vitesse maximale admissible

** : Non Communiqué

Tableau 11 : Données d'entrée

5.4.2 Calculs de dispersion

Les effets observés au niveau du sol sont présentés dans le tableau 12 suivant, les distances étant à considérer depuis le point de rejet :

Mélange	Météo	Distances en-deçà de laquelle des effets toxiques sont atteints		
		Irréversible	Létal 1%	Létal 5%
		[m]	[m]	[m]
Procédé lavage à l'eau	D5	10	< 5	< 5
	F3	10	< 5	< 5
Procédé par perméation sélective	D5	< 5	< 5	< 5
	F3	< 5	< 5	< 5

Tableau 12 : Distances d'effets toxiques (H₂S) au sol à compter depuis le point de rejet

5.4.3 Calculs des effets dues aux jets enflammés

Les distances d'effets thermiques dues au jet enflammé horizontal sont présentées dans le tableau 13 suivant :

Mélange	Météo	Distances en-deçà de laquelle des effets sont atteints		
		3kW/m ²	5kW/m ²	8kW/m ²
		[m]	[m]	[m]
Procédé lavage à l'eau	D5	25	22	20
	F3	20	18	16
Procédé par perméation sélective	D5	20	18	15
	F3	15	13	12

Tableau 13 : Distances d'effets dues aux jets enflammés horizontaux au sol à compter depuis le point de rejet

5.4.4 Calcul des effets de surpression

Les distances d'effets de surpression sont présentées dans le tableau 14 suivant pour chacune des technologies. Les distances sont à considérer depuis le point de rejet :

Mélange	Distances en-deçà de laquelle des effets sont atteints			
	SELS (200 mbar)	SEL (140 mbar)	SEI (50 mbar)	Indirect (20 mbar)
	[m]	[m]	[m]	[m]
Procédé lavage à l'eau	NA	NA	< 10	15
Procédé par perméation sélective	NA	NA	< 10	15

Tableau 14 : Distances d'effets de surpression au sol (NA : Non atteint) à compter depuis le point de rejet

5.5 SCENARIO DE RUPTURE DE CANALISATION AERIENNE EN SORTIE D'EPURATION

5.5.1 Définition du scénario

Les données d'entrée du scénario de fuite sont indiquées dans le tableau 15 suivant :

	Procédé lavage à l'eau	Procédé par perméation sélective
Diamètre de la canalisation	NC*	50 mm
Vitesse d'écoulement	< 7 m/s	NC*
Débit	185 Nm ³ /h	125 m ³ /h
Pression	NC*	8 bar g (injection réseau gaz naturel)
Température	30 °C	NC*
Durée du rejet	10 minutes	
Hauteur du rejet	1 m	
Orientation du rejet	horizontale	

* : Non Communiqué

Tableau 15 : Données d'entrée

En l'absence de certaines données d'entrée, nous considérons par défaut que les conditions de sortie d'épurateur sont identiques pour les deux procédés, et correspondent à une injection dans le réseau de gaz naturel, soit un diamètre de canalisation de 50 mm, une pression de 8 bar (g) et une température égale à la température d'entrée.

5.5.2 Calculs de dispersion

Les niveaux de concentrations des produits toxiques sont très faibles dans les mélanges en sortie d'épuration. Les distances d'effets ne sont donc pas calculées.

5.5.3 Calculs des effets dus aux jets enflammés

Au niveau du sol, les distances d'effets thermiques sont présentées dans le tableau 16 suivant, les distances étant à considérer depuis le point de rejet :

Mélange	Météo	Distances en-deçà de laquelle des effets sont atteints		
		3kW/m ²	5kW/m ²	8kW/m ²
		[m]	[m]	[m]
Procédé lavage à l'eau	D5	30	27	25
	F3	30	27	24
Procédé par perméation sélective	D5	30	26	24
	F3	30	27	25

Tableau 16 : Distances d'effets dues aux jets enflammés horizontaux à compter depuis le point de rejet

5.5.4 Calcul des effets de surpression

Les distances d'effets de surpression sont présentées dans le tableau 17 suivant pour chacune des technologies, les distances étant à considérer depuis le point de rejet

Mélange	Distances en-deçà de laquelle des effets sont atteints			
	SELS (200 mbar)	SEL (140 mbar)	SEI (50 mbar)	Indirect (20 mbar)
	[m]	[m]	[m]	[m]
Procédé lavage à l'eau	NA	NA	< 10	15
Procédé par perméation sélective	NA	NA	< 10	15

Tableau 17 : Distances d'effets de surpression au sol à compter depuis le point de rejet

5.6 SCENARIO DE RUPTURE DE TUYAUTERIE A L'INTERIEUR DU CONTAINER ABRITANT LE PROCEDURE D'EPURATION

Le scénario envisagé est ici une rupture de tuyauterie de biogaz à l'intérieur du container abritant le procédé d'épuration, suivie d'une inflammation impliquant l'explosion du container.

Les données d'entrée du scénario de fuite sont indiquées dans le tableau 18 suivant :

	Procédé lavage à l'eau	Procédé par perméation sélective
Dimensions du bâtiment (m*m*m)	6 x 2,5 x 2,3	12,19 x 2,44 x 2,44
Surfaces soufflables (m*m)	0,75 x 2	4 portes : 4 x 2,44 x 1,22
Pression de rupture des surfaces soufflables (mbar)	60	60
Surface ouverte en permanence (m ²)	0	0
Masse par unité de surface	32 kg/m ²	32 kg/m ²
Vitesse de combustion turbulente	21 m/s	21 m/s
Taux d'expansion	7	7
Pression d'éclatement (calcul EFFEX)	1,5 bar	0,6 bar

Tableau 18 : Données d'entrée des scénarios d'éclatement de container

L'explosion dans le container d'épuration suite à la rupture guillotine d'une canalisation de 50 mm de diamètre sous une pression relative de 9 bar est très violente du fait de la turbulence de la fuite produite par la rupture de la canalisation.

Les effets de cette explosion ont été estimés à l'aide du logiciel EFFEX en considérant que les parois soufflables du container, en acier, se rompent dès que la pression de 60 mbar est atteinte. On calcule alors une surpression maximale dans le container $P_{\text{éclatement}}$. Le container peut donc être entièrement détruit par cette explosion.

En cas de destruction du container, des effets de pression seront observés dans l'environnement. Ces effets peuvent être estimés à partir de l'énergie de pression contenue dans le container au moment de sa destruction, et de l'abaque indice 10 de la méthode multi-énergie. On calcule alors les distances d'atteinte des seuils d'effets de pression réglementaires qui sont indiquées dans le tableau 19 suivant :

	Procédé lavage à l'eau	Procédé par perméation sélective
SELS (200 mbar)	13	10
SEL (140 mbar)	16	12
SEI (50 mbar)	37	25
Indirect (20 mbar)	74	50

Tableau 19 : Distances d'effets dues à l'explosion dans un container

5.7 CONCLUSION SUR LA COMPARAISON DU POTENTIEL DE DANGER ENTRE UNE UNITE D'EPURATION DE BIOGAZ ET UNE UNITE DE METHANISATION

L'INERIS a rédigé en 2009, un rapport sur l'identification des scénarios majorants et a calculé leurs distances d'effets respectives (explosion, thermiques et dispersion toxique) pour les installations de méthanisation de taille agricole et industrielle. La présente étude a consisté à réaliser les calculs des distances d'effets (thermiques, surpressions, toxiques) des principaux phénomènes dangereux représentatifs des installations de méthanisation de type industrielles et agricoles. Les scénarios accidentels suivants avaient été retenus :

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

Les distances d'effets relatives aux phénomènes dangereux des procédés d'épuration retenus dans ce rapport (procédé de lavage à l'eau FLOWTECH, procédé par perméation sélective AIR LIQUIDE) n'apportent pas un potentiel de danger significatif supplémentaire par rapport à ceux des installations de méthanisation de type industriel et agricole.

6. CONCLUSION

Parmi les marchés européens, la France est l'un des plus prometteurs au vu du gisement disponible de biogaz non valorisé, qui ouvre la voie à une alternative pour la valorisation du biogaz en biométhane. En France, le contexte réglementaire encadrant la production et la valorisation du biogaz s'est fortement consolidé depuis 2009. Ces textes ont permis une clarification des procédures administratives en créant un cadre réglementaire dédié aux installations de production et de valorisation du biogaz.

L'INERIS a identifié une liste de scénarios majorants à retenir et a calculé des distances d'effets (explosion, thermiques et dispersion toxique) des scénarios accidentels majorants pour les principaux cas types rencontrés sur des unités industrielles d'épuration de biogaz et d'injection de biométhane.

L'INERIS a contacté des constructeurs d'unité d'épuration de biogaz. Sur la base de ces échanges, les deux critères retenus pour sélectionner les deux technologies d'épuration du biogaz sont le taux d'utilisation actuel et le taux d'utilisation futur pressenti. Ainsi, la démarche de sélection de l'INERIS a conduit à retenir les deux familles d'épuration de biogaz suivants :

- Le procédé d'absorption physique par lavage à l'eau,
- Le procédé par perméation sélective (séparation membranaire).

L'INERIS a sollicité les constructeurs FLOWTECH (procédé par lavage à l'eau) et AIR LIQUIDE (procédé par séparation membranaire) afin de recenser les gammes et la description de leurs procédés d'épuration respectifs. Les données collectées ont permis à l'INERIS de :

- définir les plages de variation des débits de fonctionnement de ces deux procédés,
- d'identifier les paramètres sur le fonctionnement du procédé, nécessaires à la modélisation (concentration maximale en H₂S contenu dans le biogaz brut, diamètre de canalisation, pression, débit, température en entrée et en sortie d'épuration...).

Trois scénarios ont été identifiés dans chaque cas en partant des données descriptives du fonctionnement des deux procédés d'épuration et de la composition des mélanges gazeux reçues par les constructeurs FLOWTECH et AIR LIQUIDE :

1. La rupture de la canalisation aérienne en entrée d'épuration (plus gros diamètre de canalisation et présence potentielle d'H₂S) avec calcul des distances d'effets toxiques (effets irréversibles < 10 m / effets létaux < 5 m), des distances d'effets thermiques (effets réversibles et létaux entre 15 et 25 m) et des distances d'effets de pression (pas d'effets létaux atteints, effets irréversibles < 10 m / effets indirects à 15 m) ;

2. La rupture de la canalisation aérienne en sortie d'épuration avant l'injection dans le réseau de gaz naturel (plus gros diamètre, et plus forte pression) avec calcul des distances d'effets irréversibles et létaux thermiques (entre 25 m et 30 m) et de pression (inférieurs à 15 m). A noter que les niveaux de concentrations des produits toxiques sont très faibles dans les mélanges en sortie d'épuration, les distances d'effets ne sont donc pas calculées ;
3. La rupture d'une tuyauterie de biogaz à l'intérieur du container abritant le procédé d'épuration, suivie d'une inflammation impliquant l'explosion du container (explosion confinée), avec calcul des distances d'effets d'explosion (distance des effets létaux de l'ordre de 15 m et distances des effets réversibles de l'ordre de 35 m).

Ces distances d'effets pourront être prises en compte pour établir les règles d'implantation de ces installations afin de protéger les populations environnantes des conséquences d'un accident potentiel.

Cependant, les distances d'effets relatives aux phénomènes dangereux des procédés d'épuration retenus dans ce rapport (procédé de lavage à l'eau FLOWTECH, procédé par perméation sélective AIR LIQUIDE) n'apportent pas un potentiel de danger significatif supplémentaire par rapport à ceux des installations de méthanisation de type industrielles et agricoles [1].

Une analyse des risques des deux procédés d'épuration permettrait cependant de définir des barrières de sécurité, ayant pour rôle de réduire la probabilité et la gravité des trois scénarios accidentels inhérents aux procédés d'épuration de biogaz.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Rapport d'étude sur les scénarios accidentels et modélisation des distances d'effets associées pour des installations de méthanisation de taille agricole et industrielle (Réf : INERIS DRA-09-101660-12814A) et rapport INERIS-DRC-00-25425-ETSC.
2. Evaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel (AFSSET, 29/10/2008), www.afsset.fr.
3. L. DUPONT (INERIS), *Explosion characteristics of synthesised biogas at various temperatures*, Journal of Hazardous Materials, 2006.
4. Décret n°2009-1341 du 29 octobre 2009 - Décret n° 2010-875 du 26 juillet 2010.
5. Décrets n°2011-1594 ; n°2011-1595 ; n°2011-1596 et n°2011-1597 du 21 novembre 2011.
6. Arrêté du 23 novembre 2011 fixant les conditions d'achat du biométhane injecté dans les réseaux de gaz naturel.
7. Le biométhane : enjeux solutions techniques, Enea Consulting, Juin 2012.
8. 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 07 octobre 2005).
9. Birch A.D., Brown D. R., Dodson M.G. and Swaffield (1984), The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas.
10. Ch. PROUST, 2000 : Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement – EFFEX, un outil de simulation (réf : INERIS-DRA CPr/CPr – 00-22751/effexc.doc).

8. ANNEXES

Annexe	Intitulé	Nombre de page
Annexe 1	Présentation de la méthode Multi-énergie	2
Annexe 2	Présentation du logiciel de modélisation EFFEX	4

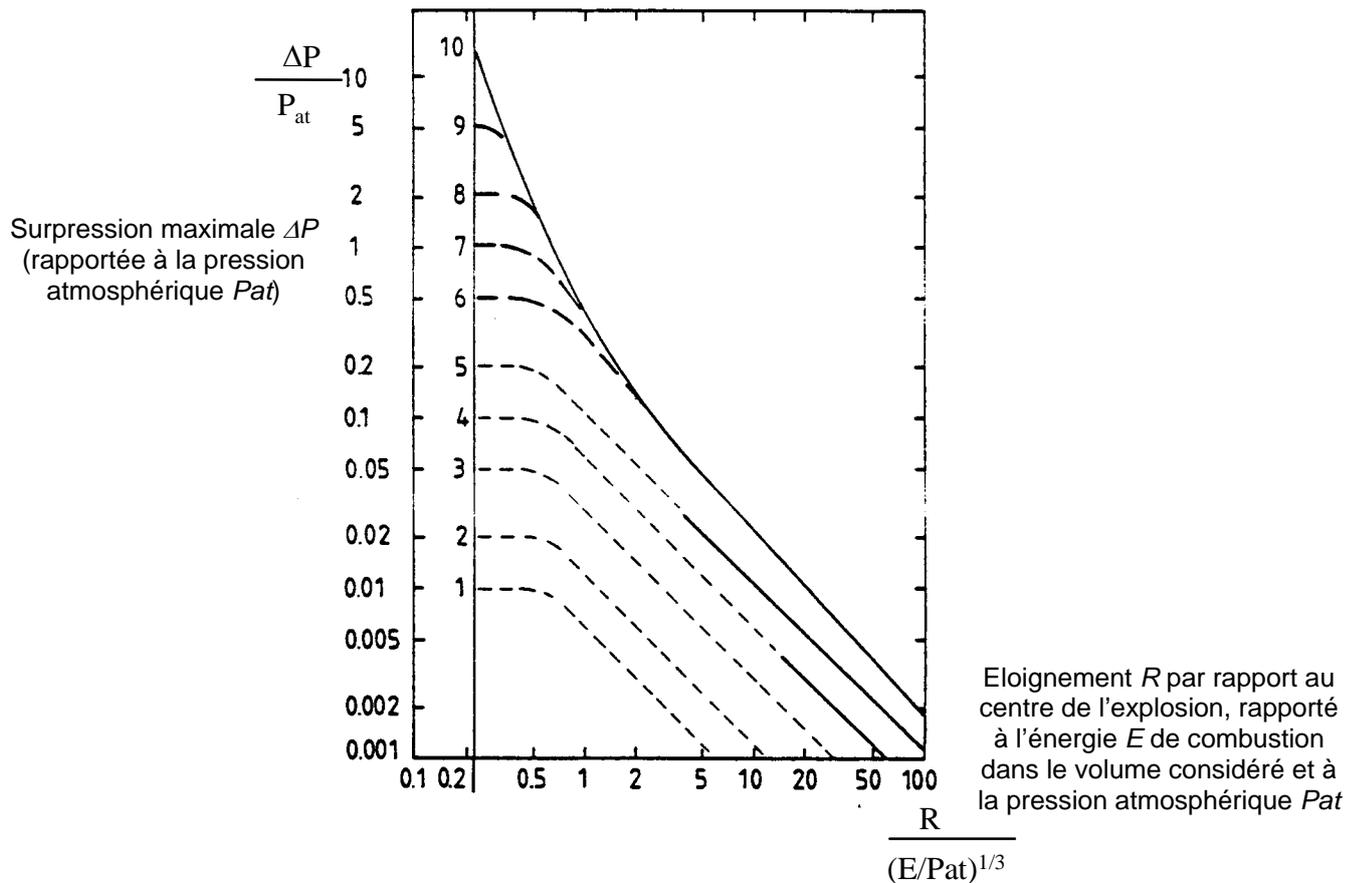
Tableau 20 : Liste des annexes

ANNEXE 1

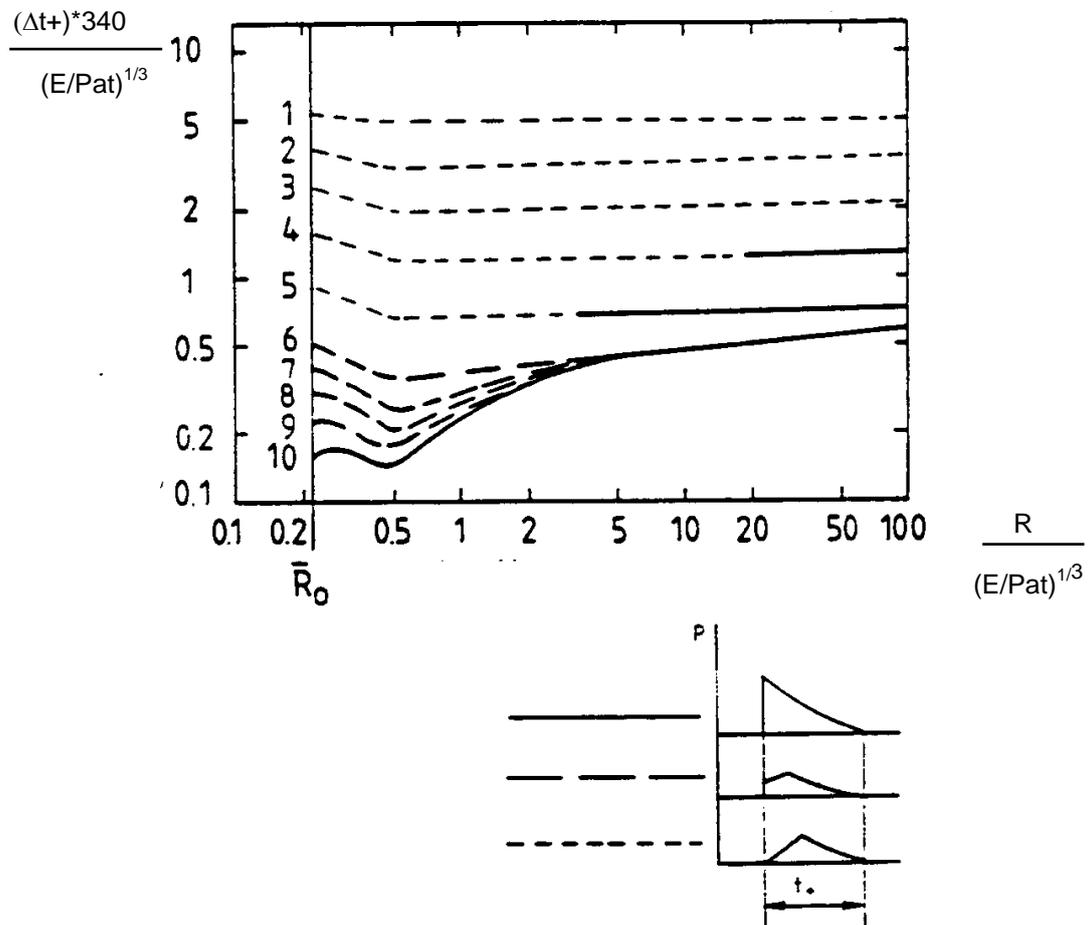
PRESENTATION DE LA METHODE MULTI-ENERGIE

PRESENTATION DE LA METHODE MULTI-ENERGIE

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



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



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

Références :

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

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

ANNEXE 2

PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION EFFEX.

PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION EFFEX.

Introduction

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

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

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

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

Caractéristiques principales

Principe de la modélisation des explosions en enceinte :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

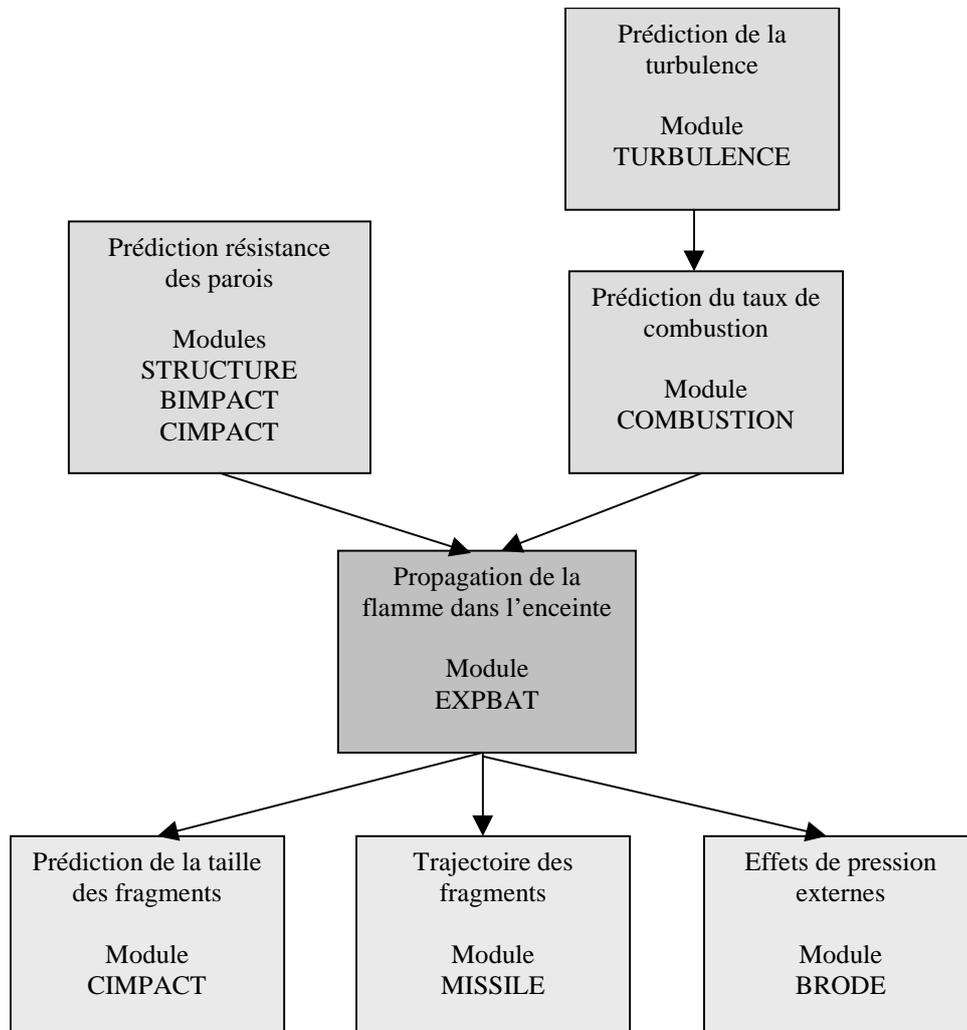
La trajectoire des fragments et ses caractéristiques (vitesse, orientation) sont calculées à partir des équations de bilan des forces.

Architecture et méthodes de résolution :

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

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

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



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

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

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

Données d'entrée et de sortie :

Les données d'entrées du module STRUCTURE sont :

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

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

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

Les résultats de calcul sont :

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

Types d'applications

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

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

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

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

Exemples d'applications réalisées à l'INERIS

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

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

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

Eléments de VALIDATION

Les performances du code ont été testées par rapport :

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

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

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

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

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

Références bibliographiques

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



INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr - **Internet :** <http://www.ineris.fr>