



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 203651 - 2705563 - v2.0

19/07/2021

Tierce-expertise du Volet C « Analyse du projet sur le volet risques industriels » du porter à connaissance pour le projet de méthanisation de la station d'épuration de Nîmes

SOCIETE DES EAUX DE LA METROPOLE NIMOISE

PRÉAMBULE

Le présent document a été établi sur la base des informations transmises à l'Ineris. 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 fournies.

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 présent document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La prestation ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser le document après cette date.

L'établissement du présent document et la prestation associée sont réalisés dans le cadre d'une obligation de moyens.

Au vu de la mission qui incombe à l'Ineris au titre de l'article R131-36 du Code de l'environnement, celui-ci n'est pas décideur. Ainsi, les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre de cette prestation ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur. 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 présent 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 toute utilisation du document en dehors de son objet.

En cas de contradiction entre les conditions générales de vente et les stipulations du présent préambule, les stipulations du présent préambule prévalent sur les stipulations des conditions générales de vente.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Sites et Territoires

Rédaction : SARRIQUET Aurore

Vérification : BOLVIN CHRISTOPHE

Approbation : Document approuvé le 19/07/2021 par BAROUDI HAFID

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Jérôme HEBRARD, Aurore SARRIQUET

Table des matières

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introduction | 5 |
| 1.1 | Contexte | 5 |
| 1.2 | Champ de la tierce-expertise | 5 |
| 1.3 | Données fournies pour la réalisation de la prestation | 6 |
| 1.4 | Visite de site et principales réunions | 6 |
| 2 | Description succincte du site et de ses activités | 7 |
| 2.1 | Présentation générale..... | 7 |
| 2.2 | Présentation succincte du projet..... | 7 |
| 3 | Avis sur la pertinence des phénomènes dangereux retenus et identification des éventuels phénomènes et scenarii manquants..... | 8 |
| 3.1 | Objet de l'analyse | 8 |
| 3.2 | Avis de l'Ineris sur l'identification des potentiels de dangers (§2), l'analyse du retour d'expérience (§3) et l'identification des agresseurs externes (§4) | 8 |
| 3.3 | Avis de l'Ineris sur la méthode retenue pour mener l'analyse préliminaire des risques (APR) 9 | 9 |
| 3.4 | Avis de l'Ineris sur le contenu de l'APR..... | 9 |
| 4 | Avis sur le choix de l'outil de modélisation retenu pour le calcul des effets de surpression..... | 11 |
| 4.1 | Objet de l'analyse | 11 |
| 4.2 | Avis de l'Ineris sur le paragraphe : 6.2.2. Modélisation des effets thermiques et de surpression liés à une explosion non confinée | 11 |
| 4.3 | Avis de l'Ineris sur le paragraphe : 6.2.3. Modélisation des effets de surpression en cas d'explosion confinée | 11 |
| 5 | Avis sur les hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effets des phénomènes dangereux, résultats obtenus et modélisations complémentaires..... | 12 |
| 5.1 | Objet de l'analyse | 12 |
| 5.2 | Avis de l'Ineris sur la modélisation des Phd1a - Explosion du ciel gazeux du digesteur en fonctionnement, Phd1b - Explosion du ciel gazeux du digesteur à vide, Phd2 - Explosion de la bache à boue digérée et du Phd3a - Explosion confinée du gazomètre | 12 |
| 5.2.1 | Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du Phd1a | 12 |
| 5.2.2 | Modélisation par l'INERIS du Phd1a et du Phd1b..... | 12 |
| 5.2.3 | Modélisation par l'INERIS du Phd2..... | 15 |
| 5.2.4 | Modélisation par l'INERIS du Phd3a..... | 17 |
| 5.3 | Avis de l'Ineris sur la modélisation du Phd3b - Explosion de biogaz rejeté lors de la ruine du gazomètre..... | 18 |
| 5.3.1 | Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du Phd3b | 18 |
| 5.3.2 | Modélisation par l'INERIS du Phd3b..... | 18 |
| 5.4 | Avis de l'Ineris sur la modélisation du Phd4 - Explosion dans le container à membranes ... | 19 |
| 5.4.1 | Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du Phd4 | 19 |
| 5.4.2 | Modélisation par l'INERIS du Phd4..... | 20 |
| 5.5 | Avis de l'Ineris sur la modélisation du Phd5 - Explosion dans le poste d'injection | 20 |
| 5.5.1 | Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du Phd5 | 20 |
| 5.5.2 | Modélisation par l'INERIS du Phd5..... | 20 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.6 | Avis de l’Ineris sur la modélisation du PhD6 - Explosion de biogaz rejeté en cas d’extinction ou non allumage de la torchère | 22 |
| 5.7 | Avis de l’Ineris sur la modélisation du PhD7 - Fuite sur la canalisation aérienne de biogaz. | 22 |
| 5.8 | Avis de l’Ineris sur la modélisation du PhD8 - Fuite de biogaz depuis la soupape du digesteur | 22 |
| 5.9 | Modélisation par l’INERIS des phénomènes dangereux manquants | 22 |
| 5.9.1 | Rupture de la tuyauterie basse pression reliant le digesteur au gazomètre | 22 |
| 5.9.2 | Explosion du local technique du digesteur | 24 |
| 6 | Avis sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques prévues par l’exploitant et de leur caractère adapté..... | 27 |
| 6.1 | Objet de l’analyse | 27 |
| 6.2 | Avis de l’Ineris sur l’évaluation de la probabilité du PhD1a « Explosion du digesteur plein » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées | 27 |
| 6.3 | Avis de l’Ineris sur l’évaluation de la probabilité du PhD1b « Explosion du digesteur vide » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées | 28 |
| 6.4 | Avis de l’Ineris sur l’évaluation de la probabilité du PhD2 « Explosion de la bache à boues digérées » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées | 29 |
| 6.5 | Avis de l’Ineris sur l’évaluation de la probabilité du PhD3b « Ruine du gazomètre » | 29 |
| 6.6 | Avis de l’Ineris sur l’évaluation de la probabilité du PhD5 « Explosion confinée du poste d’injection » | 29 |
| 7 | Conclusion..... | 30 |
| 8 | Annexes..... | 32 |

1 Introduction

1.1 Contexte

La SOCIETE DES EAUX DE LA METROPOLE NIMOISE (SEMNI) a le projet de mettre en œuvre une installation de méthanisation des produits issus de l'assainissement à la station d'épuration de Nîmes ainsi qu'une installation d'épuration du biogaz et d'injection du biométhane dans le réseau GrDF. L'ensemble du projet n'est pas classé au titre de la nomenclature ICPE.

Ce projet a fait l'objet d'un porter à connaissance, référencé n° 8514422, déposé en préfecture le 27 septembre 2019. Le porter à connaissance comprend notamment une analyse des risques industriels du projet, objet du volet C. Cette étude a été réalisée, sous la responsabilité de la SEMNI, filiale de VEOLIA, et exploitant de la STEP. Ce dernier a sous-traité la réalisation l'analyse des risques industriels au cabinet Artelia.

L'inspection des installations classées a formulé des demandes de compléments concernant notamment le volet C. Celui-ci a ainsi été complété une première fois en avril 2020 puis en mai 2020. Puis il a été demandé à la SEMNI par arrêté préfectoral de faire réaliser une tierce-expertise de certains éléments du volet C.

1.2 Champ de la tierce-expertise

Le périmètre de l'intervention est l'analyse du volet C du porter à connaissance « ANALYSE DU PROJET SUR LE VOLET RISQUES INDUSTRIELS », rédigé par Artelia dans sa dernière version en date de mai 2020.

Le rapport, objet de l'analyse critique, est structuré selon les chapitres principaux suivants :

- 2 : identification et caractérisation des potentiels de danger ;
- 3 : analyse du retour d'expérience ;
- 4 : agresseurs ;
- 5 : analyse préliminaire des risques ;
- 6 : modélisation des phénomènes dangereux ;
- 7 : analyse détaillée des risques ;
- 8 : matrice d'acceptabilité des risques ;
- 9 : maîtrise générale des risques.

Conformément à l'article 8 de l'arrêté préfectoral, l'examen critique doit porter notamment sur les points suivants :

- Pertinence des phénomènes dangereux retenus par l'exploitant et identification des éventuels phénomènes et scénarii manquants (y compris les effets dominos) ;
- Choix de l'outil de modélisation retenu par l'exploitant pour les phénomènes conduisant à des effets de surpression ;
- Hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effets des phénomènes dangereux étudiés et résultats obtenus ;
- Suffisance des mesures de maîtrise des risques prévues par l'exploitant et de leur caractère adapté.

Dans le cas où ce dernier point ne serait pas validé, il pourra être proposé de nouvelles mesures en identifiant clairement leurs avantages, contraintes, conditions de mise en œuvre et coûts.

Par ailleurs, à la demande de la SEMN, l'INERIS a réalisé les modélisations :

- des phénomènes dangereux modélisés dans le volet C mais pour lesquels l'Ineris a formulé des remarques sur la méthode mise en œuvre ou les résultats obtenus ;
- des phénomènes dangereux identifiés comme manquants par l'Ineris.

1.3 Données fournies pour la réalisation de la prestation

La tierce expertise s'est appuyée sur les documents fournis par VEOLIA listés ci-dessous :

- Volet A du porter à connaissance « Description du projet » ;
- Volet C du porter à connaissance « Analyse du projet sur le volet risques industriels » ;
- Le fichier présentant les caractéristiques des tuyauteries de biogaz et de biométhane intitulé « Caractéristiques lignes _Nîmes_DCT_V2 - complété OTV » ;
- Les spécifications techniques du gazomètre (document intitulé « OTV BGZ SP 002 C Spécification technique particulière Gazomètre ») ;
- Les données d'entrée pour la réalisation de la modélisation du scénario d'explosion du local technique du digesteur suite à une fuite massive de boues dans le local (document intitulé « STEU Nîmes - éléments pour calcul scenario explosion local pompage boues bat technique ») ;
- Des plans :
 - o Le plan d'implantation des futures installations (document intitulé « OTV-ENS-PG-001-B Implantation ») ;
 - o Les plans du local technique du digesteur (documents intitulés « OTV-BOU-EQ-002 - C - VUE EN PLAN NIV+25.20 » et « OTV-BOU-GC-002 - C - VUE EN PLAN NIV+25.20 ») ;
 - o Les plans du local d'injection GrDF (documents intitulés « OTV-BGZ-GC-020 - A - POSTE GRDF - VUE EN PLAN ET COUPES » et « extrait éléments GrDF poste injection V3 plan et zonage ATEX ») ;
 - o Le plan des réseaux (document intitulé « OTV-ENS-VR-002 A - Plans des réseaux humides »).

1.4 Visite de site et principales réunions

Compte tenu du contexte sanitaire, plusieurs réunions en visioconférence ont été organisées dans le cadre de la tierce expertise :

- ✚ Une réunion de lancement en présence de la DREAL, la DDTM, Nîmes Métropole, VEOLIA, EGIS, Artelia et Ineris qui a eu lieu le 24 novembre 2020, au cours de laquelle le contenu de la tierce expertise et le planning de réalisation ont été discutés et fixés ;
- ✚ Une réunion de travail le 10 décembre 2020 entre l'Ineris, VEOLIA et Artelia visant à obtenir des informations complémentaires sur la démarche d'identification des phénomènes dangereux et du choix de ceux retenus pour l'évaluation détaillée des risques ;
- ✚ Une réunion de travail le 25 janvier 2021 entre l'Ineris, VEOLIA et Artelia visant à obtenir des informations complémentaires sur le choix des outils de modélisation pour le calcul des effets de surpression et les hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effet ;
- ✚ Une réunion de travail le 24 février 2021 entre l'Ineris, VEOLIA et Artelia visant à obtenir des informations complémentaires sur la quantification des probabilités d'occurrence des phénomènes dangereux retenus dans le volet C ;
- ✚ Une réunion de présentation du projet de rapport de la tierce expertise à la DREAL (Société des Eux de la métropole Nîmoise, VEOLIA, Ineris, DREAL).

2 Description succincte du site et de ses activités

2.1 Présentation générale

La station de traitement des eaux usées de Nîmes Ouest, mise en service en 1991, traite l'ensemble des eaux usées de l'agglomération de Nîmes Métropole.

Nîmes Métropole est composée de 39 communes pour une population de près de 260 000 habitants. Ce vaste territoire engage des réflexions globales et stratégiques sur le développement des énergies renouvelables dans le cadre de la modernisation de ses infrastructures publiques. A ce titre, Nîmes Métropole projette la mise en œuvre de la valorisation des ressources issues du traitement des eaux usées de la station de Nîmes Ouest, située impasse des Jasons à Nîmes : en l'occurrence celle du biogaz produit par la digestion de la totalité des boues et graisses produites, valorisé par injection du biométhane dans le réseau GrdF.

La STEU de Nîmes Ouest est actuellement autorisée au titre de la loi sur l'eau par l'arrêté préfectoral n°2004-127-11 du 6 mai 2004.

2.2 Présentation succincte du projet

Le projet de valorisation des ressources issues de la Station de Traitement des Eaux Usées (STEU) de Nîmes-Ouest repose sur les travaux suivants :

- Modernisation de la station de traitement des eaux usées de Nîmes Ouest – capacité de 230 000 EH - qui comprend notamment la construction d'une unité de Méthanisation (production de biogaz, traitement et injection de biométhane sur réseau GrdF).
- Travaux d'adaptation de la Plateforme de Compostage.

L'unité de méthanisation/traitement-injection de biométhane comprend les équipements suivants :

- Un digesteur mésophile en béton de 5 500 m³,
- Un gazomètre souple de 1 100 m³,
- Une torchère,
- Un skid d'épuration membranaire du biogaz,
- Un poste d'injection GrDF,
- Des installations de désodorisation associées aux nouveaux ouvrages.

3 Avis sur la pertinence des phénomènes dangereux retenus et identification des éventuels phénomènes et scénarii manquants

3.1 Objet de l'analyse

Dans le volet C du porter à connaissance, 10 phénomènes dangereux sont retenus à l'issue de l'analyse préliminaire des risques :

- PhD1a : explosion du ciel gazeux du digesteur (digesteur plein) ;
- PhD 1b : explosion du ciel gazeux du digesteur (digesteur vide) ;
- PhD 2 : explosion de la bache à boues digérées ;
- PhD 3a : explosion du gazomètre ;
- PhD 3b : explosion de biogaz rejeté lors de la ruine du gazomètre ;
- PhD 4 : explosion de biogaz dans le container à membranes ;
- PhD 5 : explosion de biométhane dans le poste d'injection ;
- PhD 6 : explosion non confinée de biogaz suite à l'extinction de la torchère ;
- PhD 7 : feu torche/ UVCE suite à une fuite de biogaz ou de biométhane à partir d'une canalisation aérienne ;
- PhD 8 : explosion de biogaz rejeté par la soupape du digesteur.

Sur la base des chapitres 2 à 5 du volet C du Porter à connaissance et de son expérience sur les risques associés aux installations de méthanisation, l'Ineris a vérifié les potentiels de dangers retenus, les scénarios identifiés lors de l'analyse du retour d'expérience, la méthode retenue pour réaliser l'analyse préliminaire des risques, les phénomènes dangereux identifiés dans l'APR, la prise en compte des effets dominos dans l'APR et la sélection des phénomènes dangereux retenus pour l'analyse détaillée des risques. L'objectif est de vérifier si cette démarche a permis d'atteindre une certaine exhaustivité des scénarios identifiés dans l'APR, dans la limite de l'exercice, l'Ineris n'ayant pas réalisé de sessions d'analyse préliminaire des risques.

3.2 Avis de l'Ineris sur l'identification des potentiels de dangers (§2), l'analyse du retour d'expérience (§3) et l'identification des agresseurs externes (§4)

Bien que ces trois chapitres ne soient pas directement dans le périmètre de la tierce-expertise, étant donné qu'il s'agit d'étapes clés avant la réalisation de l'analyse préliminaire des risques, l'Ineris les a passés en revue.

Il en résulte que l'identification des potentiels de dangers est exhaustive. Bien que la composition du biogaz ne soit pas indiquée dans ce chapitre (elle est précisée au § 6.1.2.1), il est indiqué que la teneur en H₂S est inférieure à 200ppm ce qui justifie de ne pas retenir d'effets toxiques pour les différents scénarios de perte de confinement de biogaz identifiés en analyse préliminaire des risques.

Concernant l'analyse du retour d'expérience, elle a été réalisée sur la base des accidents recensés dans la base ARIA. Bien qu'il aurait été pertinent d'analyser le retour d'expérience interne (installations de méthanisation et d'épuration/injection exploitées sur d'autres sites par VEOLIA), l'analyse des causes et l'identification des mesures de prévention ou de protection à intégrer au design du projet ont été correctement effectuées.

Concernant l'identification des agresseurs externes, l'Ineris formule plusieurs remarques :

- Certains agresseurs externes n'ont pas été analysés, exemples : foudre, températures extrêmes alors même qu'ils sont identifiés comme causes de certains accidents recensés dans la base ARIA.
- L'aléa inondation est identifié comme modéré à très fort, or il n'est pas précisé les dispositions prévues pour le prendre en compte dans le cadre du projet.

3.3 Avis de l'Ineris sur la méthode retenue pour mener l'analyse préliminaire des risques (APR)

La méthode d'analyse de risques retenue dite d'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est présentée au chapitre 5.1 du volet C.

Il est bien précisé que l'objectif est d'identifier les phénomènes dangereux susceptibles de générer des effets à l'extérieur des limites du site ou être à l'origine d'effets dominos. Par ailleurs, l'échelle de cotation de l'intensité est fournie.

L'Ineris remarque que l'APR n'a pas été réalisée en groupe de travail, elle a été réalisée par le bureau d'étude en charge de l'élaboration du porter à connaissance ce qui peut nuire à l'identification exhaustive des scénarios accidentels. Néanmoins il est précisé que la cotation en intensité a été réalisée avec l'exploitant de la station.

3.4 Avis de l'Ineris sur le contenu de l'APR

Le chapitre 5.2 présente les tableaux d'analyse de risques des installations. Pour chaque équipement/produit considéré sont associés :

- Un potentiel de danger ;
- Une situation à risque ;
- Un ou plusieurs phénomènes dangereux ;
- Des barrières de sécurité ;

L'Ineris formule la remarque principale que les différentes causes pouvant conduire aux situations à risque ne sont pas détaillées. Il en résulte plusieurs manques :

- Il n'y a pas de nuances dans les situations à risques (ou Evénements Redoutés Centraux). Or, si on prend l'exemple d'une perte de confinement, il peut y avoir plusieurs volumes libérés en fonction des causes considérées.
- Il manque des scénarios, exemples : montée en pression à l'intérieur d'un digesteur conduisant à un rejet par la soupape ou, en cas de soupape bloquée, une perte de confinement de biogaz sur l'équipement le moins résistant du réseau biogaz, montée en pression à l'intérieur du gazomètre et rejet par la garde hydraulique, etc.
Seuls les phénomènes dangereux majorants sont identifiés.
- Les conséquences ne sont pas détaillées. Exemple : en fonction des causes d'entrée d'air dans le digesteur, les conséquences seront différentes. En fonctionnement normal, le volume de l'ATEX représentera le volume du ciel gazeux alors qu'en cas de vidange accidentelle du digesteur (partielle ou totale), le volume de l'ATEX sera plus important voire remplira la totalité du volume.
- Sans identification précise des causes, il semble difficile de mener une démarche de réduction des risques par l'identification de barrières adaptées.
- Les effets dominos n'ont pas été pris en compte.

Parmi les phénomènes dangereux non identifiés dans l'APR, certains ne sont pas susceptibles de générer des distances d'effet à l'extérieur du site. Il apparaît néanmoins nécessaire de compléter l'APR existante afin d'identifier les effets dominos potentiels, revoir la prise en compte de la foudre et de l'inondation. Ceci permettrait de prendre en compte les autres remarques précédentes.

Dans le cadre de cette tierce-expertise, il n'était pas prévu que l'Ineris refasse l'APR. L'Ineris se base donc sur son expérience pour déterminer les phénomènes dangereux susceptibles d'avoir des effets à l'extérieur du site et nécessitant des modélisations pour le confirmer ou l'infirmer :

- **Explosion d'une ATEX air/biogaz dans le local technique suite à une perte de confinement de boues dans le local technique (sur tuyauterie de vidange ou tuyauterie de la boucle de réchauffage) conduisant à l'émission de biogaz dans l'atmosphère du local ;**
- **Feu torche/UVCE/flash fire sur la tuyauterie aérienne de biogaz en sortie de digesteur.**

La question s'est posée de retenir le scénario de fuite sur la tuyauterie enterrée de biométhane en sortie d'épuration mais étant donné les caractéristiques de cette tuyauterie (diamètre/pression), ce scénario n'est pas dimensionnant, en termes de distances d'effet, par rapport aux scénarios de fuite sur les tuyauteries aériennes de biogaz. Des modélisations seront toutefois réalisées en dehors de ce rapport et jointes dans la nouvelle version du volet C.

4 Avis sur le choix de l'outil de modélisation retenu pour le calcul des effets de surpression

4.1 Objet de l'analyse

Sur la base des paragraphes 6.2.2 et 6.2.3 qui présentent les méthodes de modélisation des effets de surpression retenue pour les modélisations et 6.3 qui apporte des précisions sur les modèles de calcul utilisés par phénomène dangereux, l'INERIS donnera son avis sur le choix des méthodes et outils retenus pour le calcul des effets de surpression en fonction des phénomènes dangereux considérés.

4.2 Avis de l'Ineris sur le paragraphe : 6.2.2. Modélisation des effets thermiques et de surpression liés à une explosion non confinée

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la présentation de la méthode de calcul des effets du flash Fire ni sur la modélisation des effets de surpression de l'UVCE.

4.3 Avis de l'Ineris sur le paragraphe : 6.2.3. Modélisation des effets de surpression en cas d'explosion confinée

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la présentation de la méthode multi-énergie. Concernant le choix de l'indice il est dit p41 :

« Si rejet en zone confinée et très encombrée, la surpression peut atteindre une centaine de mbar (équivalent à un indice 4) (cf. essais de Harrison et Eyre effectués dans une enceinte en polyéthylène de 30 m de long, 10 m de haut et 20 m de large avec plusieurs séries d'obstacles successifs formés par des rangées verticales de tuyauteries horizontales parallèles de diamètre 0,315 m et essais de Harris et Wickens réalisés en tunnel de 45 m de long et en présence d'obstacles sphériques).

Si rejets turbulents, la surpression atteinte est inférieure à 100 mbar (source : essais INERIS dans le cadre du projet européen EMERGE (Extended Modelling and Experimental Research into Gaz Explosion) et essais similaires menés par Shell). »

La surpression de l'explosion d'un rejet de méthane dans une zone encombrée peut atteindre quelques bars. Des essais de rejet à grande échelle¹, avec des nuages inflammables d'une centaine de mètres remplissant une zone encombrée d'environ 125 m³ et constituées de tubes verticaux et horizontaux ont permis de mesurer des pressions allant jusqu'à environ 10 bar.

Lors des mêmes essais, les pressions mesurées dans un jet libre ont atteint environ 200 mbar. Le choix de l'indice doit prendre en compte l'intensité du terme source, c'est-à-dire les dimensions du nuage inflammable, le niveau de turbulence dans le nuage au moment de l'inflammation, l'énergie d'inflammation et le niveau d'encombrement. Même si le biogaz est moins réactif que le méthane, il faut considérer qu'en fonction des paramètres cités, l'indice multi-énergie peut varier entre 2-3 jusqu'à 5-6.

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la méthode pour le calcul de l'énergie de Brode.

¹ Hisken et al., "Assessing the influence of real releases on explosions: selected results from large-scale experiments", ISPMIE 2020

5 Avis sur les hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effets des phénomènes dangereux, résultats obtenus et modélisations complémentaires

5.1 Objet de l'analyse

Sur la base du chapitre 6 du volet C du porter à connaissance, l'INERIS donne son avis sur les données d'entrée utilisées pour calculer les distances d'effet de chaque phénomène dangereux : volume de biogaz considéré, débit de fuite, durée de fuite, pression, etc.

Dans le cas où certaines hypothèses ne seraient pas validées, l'INERIS précisera s'il est nécessaire de reprendre les modélisations. Lorsque les hypothèses seront validées, l'Ineris vérifiera l'ordre de grandeur des distances d'effets calculées.

Par ailleurs, à la demande de la société nîmoise de l'eau, l'INERIS a réalisé les modélisations :

- des phénomènes dangereux modélisés dans le volet C mais pour lesquels l'Ineris a formulé des remarques sur la méthode mise en œuvre ou les résultats obtenus ;
- des phénomènes dangereux identifiés comme manquants par l'Ineris.

5.2 Avis de l'Ineris sur la modélisation des PhD1a - Explosion du ciel gazeux du digesteur en fonctionnement, PhD1b - Explosion du ciel gazeux du digesteur à vide, PhD2 - Explosion de la bêche à boue digérée et du PhD3a - Explosion confinée du gazomètre

5.2.1 Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du PhD1a

Deux méthodes sont utilisées, un calcul à l'aide de l'énergie de Brode en évaluant la pression de rupture des parois et en considérant que la totalité des parois cèdent simultanément (pas d'événements) et un calcul à l'aide de la méthode multi-énergie en considérant la présence d'événements, et l'explosion d'un nuage secondaire à l'indice 5. Cette dernière méthode a finalement été choisie.

Avis de l'Ineris sur le choix de la méthode : ce choix doit être motivé par la présence ou non d'événements ou de partie soufflable sur la structure. Si l'on considère que le toit sera ouvert à une pression plus faible que la structure, l'éjection des gaz non brûlés à travers les parois soufflables va former une boule de feu externe dont les effets de pression peuvent être évalués à l'aide de la méthode multi-énergie. Cependant, la pression de rupture statique du toit étant ici évaluée à 200 mbar, la pression atteinte dans la boule de feu externe sera supérieure et donc l'indice multi-énergie correspondant est compris entre les indices 5,5 et 6².

Si l'on considère que la totalité de la structure va céder à la pression de rupture, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de surface éventable sur la structure, les effets de l'explosion peuvent être évalués à partir de la pression statique, à l'aide du facteur DLF (Dynamic Load Factor ou facteur de chargement dynamique) que l'on peut considérer égal à 2 de façon conservative.

5.2.2 Modélisation par l'INERIS du PhD1a et du PhD1b

D'après les informations transmises par la SEMN, il sera considéré pour cette modélisation que le toit constitue une surface soufflable.

La modélisation des distances d'effets dues à l'explosion d'un digesteur consiste dans un premier temps à évaluer la pression maximale atteinte dans le digesteur ainsi que la quantité correspondante de gaz brûlés dans le digesteur. Ce calcul est réalisé à l'aide de l'outil EFFEX dont une brève description est fournie en annexe. Cette première explosion dans le digesteur (dite primaire) éjecte à l'extérieur un mélange de gaz brûlés et frais à travers toutes les ouvertures et les brèches. Le nuage formé à C'est compliqué

5.2.2.1 Caractéristiques du biogaz

Le biogaz issu de la digestion des boues a la composition suivante :

| | |
|--|----------|
| Méthane | 65 %vol. |
| Dioxyde de carbone | 30 %vol. |
| Diazote | 2 %vol. |
| Dihydrogène | 1 %vol. |
| Autres (dioxygène, Sulfure d'hydrogène, etc...) | 2 %vol. |

Tableau 1 : Composition du biogaz (données fournies par SEMN)

A l'intérieur de l'ouvrage, il est considéré dans les modélisations que le biogaz est mélangé à l'air dans des conditions proches de la stœchiométrie, à la pression atmosphérique, et à une température d'environ 15 °C. Les propriétés du mélange inflammable sont les suivantes :

| | | |
|---------------------------------|----------|------|
| Vitesse laminaire de flamme | [m/s] | 0,3 |
| Taux d'expansion | [-] | 6 |
| Energie de combustion (méthane) | [MJ/mol] | 0,8 |
| Energie de combustion (biogaz) | [MJ/mol] | 0,46 |

Tableau 2 : Caractéristiques du mélange inflammable

5.2.2.2 Caractéristiques du digesteur

Le digesteur est constitué d'un corps cylindrique en béton de 19,6 m de diamètre et de 19,4 m de hauteur. Lorsque le digesteur est plein de digestat, la hauteur de marnage est de 17,2 m.

Le volume total du digesteur à vide est de 5853 m³ correspondant au volume de la partie cylindrique (virole). Les scénarios d'explosion du digesteur plein et vide sont envisagés.

La surface éventable considérée correspond au toit. Elle est composée d'une couverture en béton de masse surfacique totale estimée à 625 kg/m² correspondant à 25 cm d'épaisseur de béton, de poutres de soutien, dont le poids réparti uniformément sur la surface correspond à une masse volumique surfacique de 286 kg/m² et environ 25 kg/m² d'isolation et d'étanchéité, soit un total de 936 kg/m².

En l'absence de données précises sur la dynamique d'ouverture du toit, il est considéré que celui-ci se soulève verticalement après rupture des attaches sur la périphérie et que l'ouverture du toit est totale. La pression à partir de laquelle le toit va commencer à se soulever est estimée à 200 mbar. Un résumé des données d'entrée utilisées est présenté dans le tableau suivant :

| | | |
|--------------------------------------|-------------------|-------|
| Diamètre | m | 19,6 |
| Hauteur totale | m | 19,4 |
| Hauteur de boue | m | 17,37 |
| Volume Ciel gazeux - Digesteur plein | m ³ | 455 |
| Volume Ciel gazeux - Digesteur vide | m ³ | 5853 |
| Section de la virole | m ² | 302 |
| Masse surfacique du toit | kg/m ² | 936 |
| Surface de brèche | m ² | 302 |
| Pression ouverture | mbar | 200 |
| Périmètre de brèche | m | 62 |

Tableau 3 : Données d'entrée pour le digesteur (données fournies par SEMN)

5.2.2.3 Résultats des modélisations

Les évolutions de la pression primaire dans le cylindre et de de la masse inflammable éjectée formant la boule de feu extérieure et participant aux effets de l'explosion secondaire sont présentées sur la figure suivante (digesteur vide et plein) en considérant que les parois béton de la virole résistent :

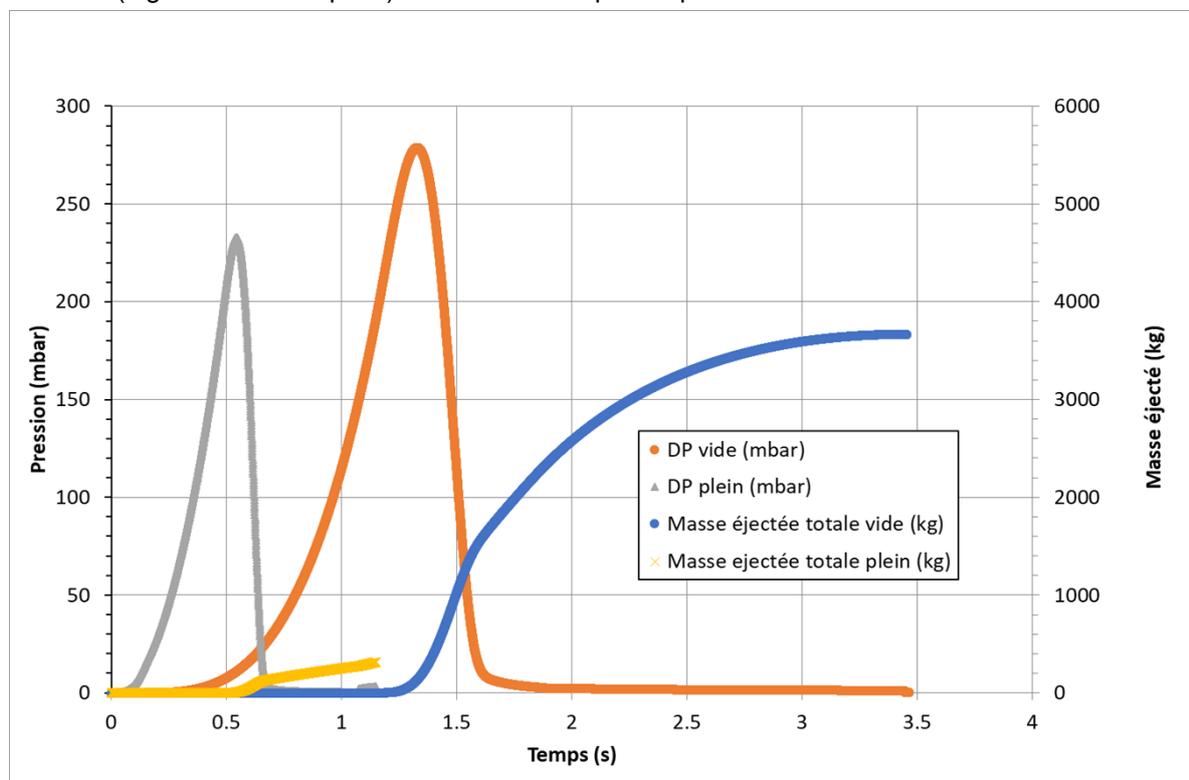


Figure 1 : Résultats du calcul EFFEX : évolution de la pression interne et de la masse de gaz frais éjectés en fonction du temps

La pression maximale atteinte en configuration de fonctionnement normal est sensiblement inférieure à celle atteinte lorsque le digesteur est vide. La géométrie de la zone permet dans le second cas une expansion sphérique de la flamme facilitant son accélération. En effet, la flamme ne peut que très peu se développer dans le sens de la hauteur.

5.2.2.4 Distances d'effets

Les distances d'effets ainsi que les résultats de calculs intermédiaires sont résumés dans le tableau suivant :

| | Ineris | | Volet C du Porter à connaissance | |
|--|--------|-------|----------------------------------|-------|
| Volume (m ³) | 5853 | | | |
| Pression d'ouverture du toit (mbar) | 200 | | | |
| Remplissage en boue | Vide | Plein | Vide | Plein |
| Pression maximale atteinte dans le digesteur (explosion primaire) (mbar) | 279 | 233 | | |
| Pression maximale atteinte dans le nuage expulsé (explosion secondaire) (mbar) | 347 | 316 | | |

| | | | | |
|---|------|-----|-----|-----|
| Masse inflammable participant à l'explosion secondaire (bouffée) (kg) | 3665 | 315 | | |
| Energie correspondante (MJ) | 3643 | 313 | | |
| Distances d'effet aux seuils à compter depuis la virole (en m) : | | | | |
| 200 mbar | 33 | 14 | 32 | 13 |
| 140 mbar | 48 | 20 | 48 | 20 |
| 50 mbar | 125 | 50 | 136 | 58 |
| 20 mbar | 250 | 100 | 343 | 146 |

Tableau 4 : Résultats des modélisations et distances d'effets

Pour le PhD 1, l'Ineris confirme les ordres de grandeur des distances d'effet, sauf pour le seuil des 20 mbar.

5.2.3 Modélisation par l'INERIS du PhD2

Ce PhD 2 est l'explosion de la bache à boue digérée.

5.2.3.1 Caractéristiques de la bache

La bache est un ouvrage de forme cylindrique en béton équipée de trappes de masse surfacique de 11 kg/m² simplement posées. Leur pression d'ouverture est donc de 1,1 mbar. La modélisation de l'explosion de biogaz dans la bache est réalisée à l'aide d'une méthode identique à celle du digesteur. Seule la géométrie change, les données d'entrée utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

| | | |
|-----------------------------------|-------------------|------|
| Diamètre | m | 12,2 |
| Hauteur totale | m | 5,9 |
| Hauteur de boue | m | 5,2 |
| Volume Ciel gazeux – bâche pleine | m ³ | 82 |
| Volume Ciel gazeux – bâche vide | m ³ | 690 |
| Surface des trappes | m ² | 2,8 |
| Périmètre des trappes | m | 10,8 |
| Pression d'ouverture des trappes | mbar | 1,1 |
| Masse surfacique des trappes | kg/m ² | 11 |
| Section de la virole | m ² | 117 |
| Masse surfacique du toit | kg/m ² | 500 |
| Surface de brèche | m ² | 117 |
| Pression ouverture | mbar | 200 |
| Périmètre de brèche | m | 38 |

Tableau 5 : Données d'entrée pour la bâche (données fournies par SEMN)

5.2.3.2 Résultats des modélisations

Les évolutions de la pression primaire dans le cylindre et de de la masse inflammable éjectée formant la boule de feu extérieure et participant aux effets de l'explosion secondaire sont présentées sur la figure suivante (digesteur vide et plein) en considérant que les parois béton de la virole résistent :

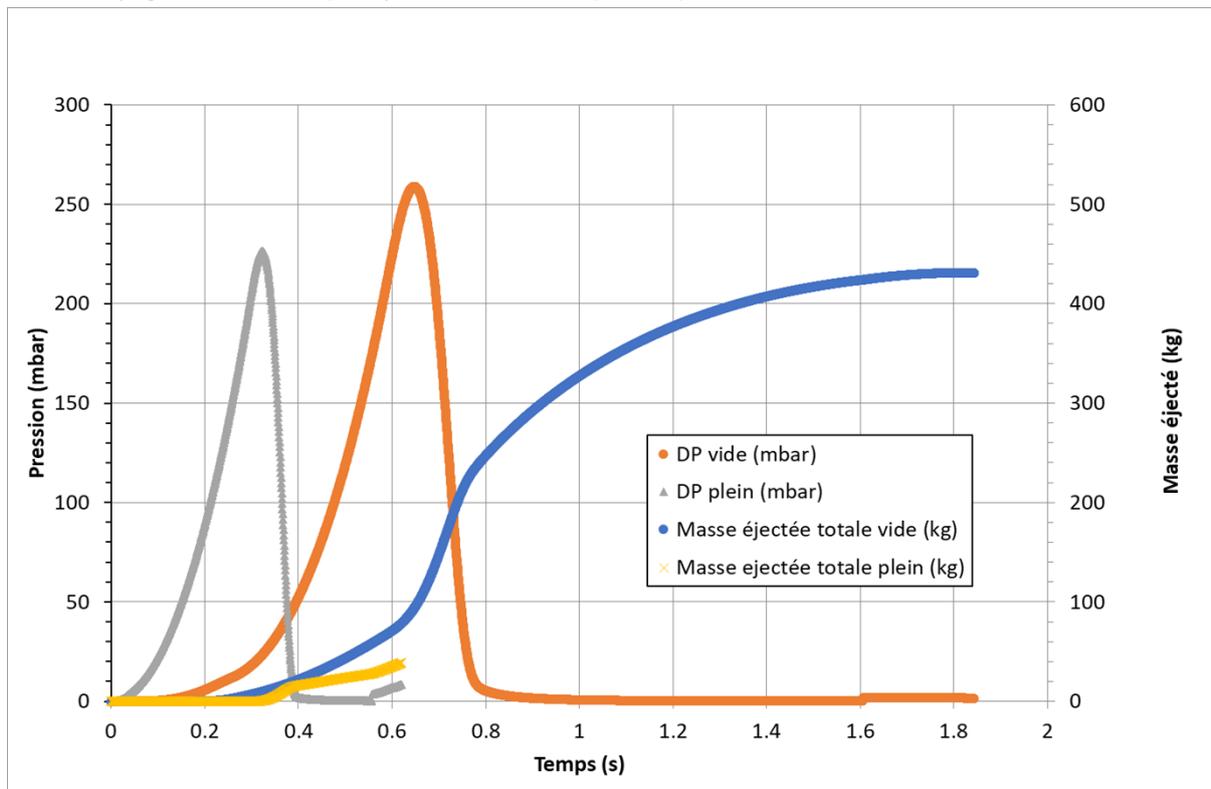


Figure 2 : Résultats du calcul EFFEX : évolution de la pression interne et de la masse de gaz frais éjectés en fonction du temps

Comme précédemment et pour les mêmes raisons, la pression maximale atteinte en configuration de fonctionnement normal est sensiblement inférieure à celle atteinte lorsque le digesteur est vide.

5.2.3.3 Distances d'effets

Les distances d'effets ainsi que les résultats de calculs intermédiaires sont résumés dans le tableau suivant :

| | Ineris | | Volet C du Porter à connaissance |
|--|--------|-------|----------------------------------|
| Volume (m ³) | 690 | | |
| Pression d'ouverture du toit (mbar) | 200 | | |
| Remplissage en boue | Vide | Plein | Plein |
| Pression maximale atteinte dans la bêche à boues (explosion primaire) (mbar) | 259 | 226 | |
| Pression maximale atteinte dans le nuage expulsé (explosion secondaire) (mbar) | 334 | 311 | |
| Masse inflammable participant à l'explosion secondaire (bouffée) (kg) | 431 | 39 | |
| Energie correspondante (MJ) | 428 | 38 | |
| Distances d'effet aux seuils à compter depuis la virole (en m) : | | | |
| 200 mbar | 15 | 7 | 15 |
| 140 mbar | 23 | 10 | 23 |
| 50 mbar | 60 | 25 | 65 |
| 20 mbar | 120 | 50 | 164 |

Tableau 6 : Résultats des modélisations et distances d'effets

Pour le PhD 2, l'Ineris confirme les ordres de grandeur des distances d'effet, sauf pour le seuil des 20 mbar.

5.2.4 Modélisation par l'INERIS du PhD3a

Le PhD3a concerne l'explosion confinée du gazomètre.

En utilisant la méthode décrite ci-avant, on obtient les distances suivantes :

| Distances de surpression aux seuils : | | Ineris | Volet C du Porter à connaissance |
|---------------------------------------|-----|-------------|----------------------------------|
| 200 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint |
| 50 mbar | [m] | 32 | 46 |
| 20 mbar | [m] | 64 | 114 |

Tableau 7 : Distances d'effets de surpression du scénario d'explosion interne du gazomètre

Pour le PhD 3a, l'Ineris obtient des ordres de grandeur des distances d'effet plus faibles.

5.3 Avis de l’Ineris sur la modélisation du Phd3b - Explosion de biogaz rejeté lors de la ruine du gazomètre

5.3.1 Avis de l’Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du Phd3b

Le scénario traité n’est pas la ruine mais une fuite de l’enveloppe. Si le scénario lui-même est physiquement possible et probablement plus réaliste que l’effacement total et instantané de l’enveloppe, il paraît difficile de justifier le choix de la taille de brèche et ce n’est, de plus, pas nécessairement le scénario majorant, en particulier pour les distances thermiques du flash-fire.

5.3.2 Modélisation par l’INERIS du Phd3b

Ce scénario concerne la ruine du gazomètre en fonctionnement normal, c’est-à-dire la libération brutale et la dispersion atmosphérique de la totalité du gaz disponible dans le gazomètre. Les hypothèses de modélisations de la dispersion sont présentées en annexe 2 et les hypothèses et outils utilisées pour l’UVCE sont présentées en annexe 3 Les conditions dans le gazomètre au moment de la rupture sont les conditions normales de fonctionnement présentées dans le tableau suivant :

| | | |
|----------------------------|-------------------|------|
| Volume de gaz disponible | [m ³] | 1190 |
| Pression dans le gazomètre | [mbar] | 25 |
| Température du gaz | [°C] | 15 |

Tableau 8 : Données d’entrée

Le nuage de gaz libéré, en se mélangeant à l’air va former un nuage inflammable. 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 : Unconfined Vapour Cloud Explosion) qui seront plus ou moins importants en fonction du lieu et du moment de l’inflammation. Les résultats de modélisation suivant la méthode présentée dans l’annexe « Dispersion » sont présentés dans le tableau suivant (pour chaque condition météorologique, seules les distances les plus grandes sont présentées) :

| | | Ineris | | Volet C du Porter à connaissance |
|--|------|-------------|-------------|----------------------------------|
| Conditions météorologiques | | D5 | F3 | |
| Distance à la LIE maximale | [m] | 55 | 45 | |
| Hauteur du nuage | [m] | 25 | 30 | |
| Distance à la LIE au sol | [m] | 40 | 25 | 23 |
| Volume inflammable | [m3] | 5580 | 5580 | |
| Point d'inflammation | [m] | 20 | 10 | |
| Distances du Flash Fire aux seuils : | | | | |
| SEL et SELS | [m] | 40 | 25 | 23 |
| SEI | [m] | 45 | 30 | 25 |
| Surpressions | | | | |
| Energie d'explosion | [MJ] | 18000 | 18000 | |
| Indice multi-énergie | [-] | 4 | 4 | |
| Distances de surpression aux seuils : | | | | |
| 200 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint | Non atteint |
| 50 mbar | [m] | 95 | 85 | 97 |
| 20 mbar | [m] | 170 | 160 | 242 |

*Tableau 9 : Résultats des calculs de dispersion et des effets de surpression en champ libre (seules les distances les plus pénalisantes sont présentées). Les distances sont à compter **depuis le centre du gazomètre***

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

Pour le PhD 3b, l'Ineris confirme les ordres de grandeur des distances d'effet, sauf pour le seuil des 20 mbar.

5.4 Avis de l'Ineris sur la modélisation du PhD4 - Explosion dans le container à membranes

5.4.1 Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du PhD4

La pression de l'explosion dans le container va dépendre :

- de la fuite : c'est-à-dire du niveau de turbulence au niveau du jet,
- de la pression de rupture des parois du container,
- de la présence éventuelle de parois soufflables telles que des portes, des fenêtres ou des dispositifs d'évents,
- de la réactivité du gaz.

La fuite correspond ici à une fuite de biométhane sous haute pression (8 bars abs.). L'indice 4 choisi semble donc faible au regard de l'importance de la fuite et de la réactivité du gaz.

5.4.2 Modélisation par l'INERIS du PhD4

Un exemple de modélisation d'un cas similaire est donné dans le rapport INERIS-DRA-14-133344-01580A dont les résultats sont reportés dans le tableau suivant :

| Distances de surpression aux seuils : | | INERIS-DRA-14-133344-01580A | Volet C du Porter à connaissance |
|---------------------------------------|-----|-----------------------------|----------------------------------|
| 200 mbar | [m] | 10 | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | 12 | Non atteint |
| 50 mbar | [m] | 25 | 15 |
| 20 mbar | [m] | 50 | 38 |

Tableau 10 : Distances d'effets de pression du scénario d'explosion du conteneur à membrane

Les distances modélisées par l'Ineris sont légèrement plus grandes que celles présentées dans le PAC.

5.5 Avis de l'Ineris sur la modélisation du PhD5 - Explosion dans le poste d'injection

5.5.1 Avis de l'Ineris sur les hypothèses retenues pour la modélisation du PhD5

Comme pour le paragraphe précédent, les hypothèses sur l'indice ne correspondent pas à une fuite à haute pression.

5.5.2 Modélisation par l'INERIS du PhD5

Ce scénario correspond à l'explosion du local injection suite à l'accumulation du biométhane issu d'une rupture de la tuyauterie de 43 mm ID, 8 bars abs.

Les caractéristiques géométriques du bâtiment sont présentées sur le schéma et dans le tableau suivant :

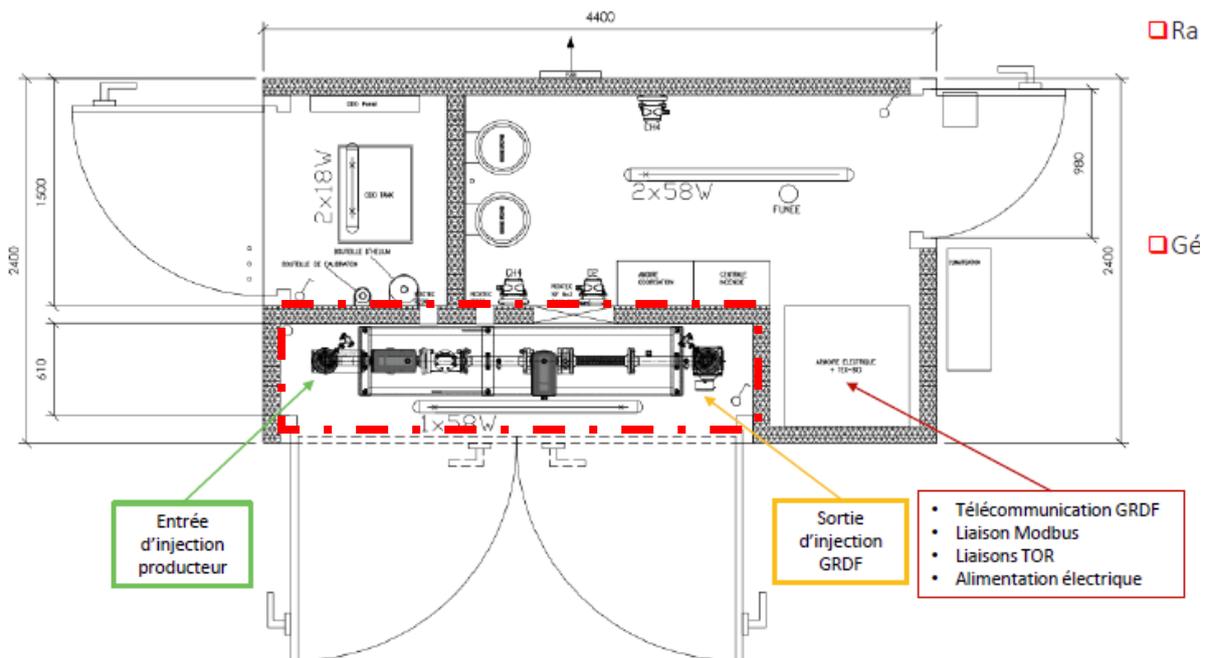


Figure 3 : Caractéristiques géométriques du local

Le bâtiment est construit sur un vide sanitaire qui peut également être rempli par le nuage inflammable et dont les caractéristiques sont les suivantes :

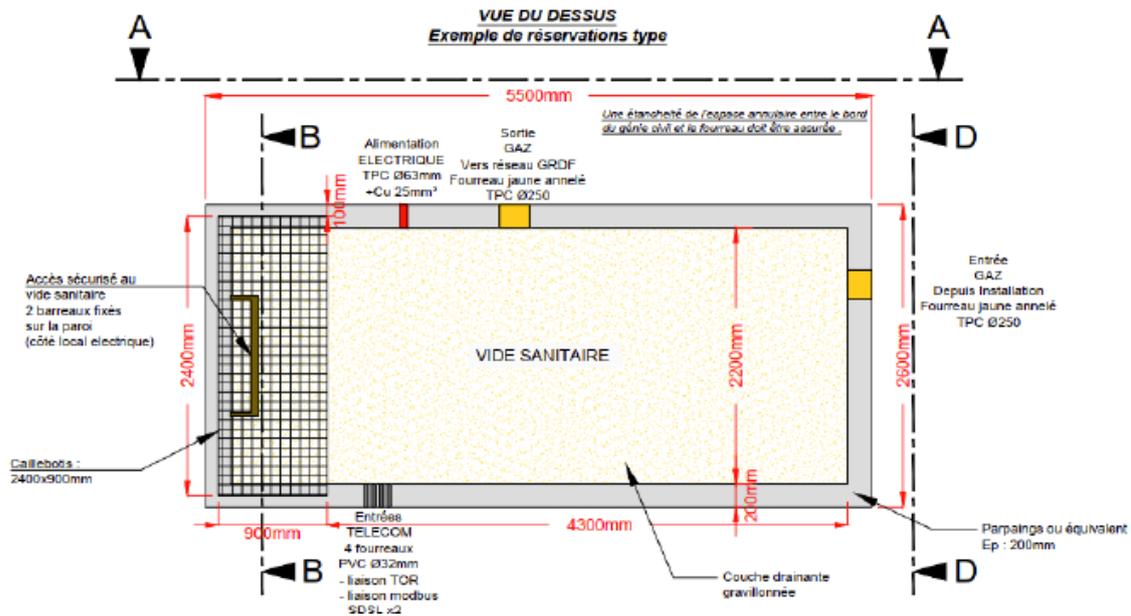


Figure 4 : Caractéristiques géométriques du vide sanitaire

Les dimensions sont :

| | | Local injection | Vide sanitaire |
|-------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| Hauteur | [m] | 2,5 | 0,9 |
| Longueur | [m] | 3 | 5,2 |
| Largeur | [m] | 0,8 | 2,2 |
| Volume | [m ³] | 6 | 10,3 |
| Taux d'occupation du bâtiment | [-] | 10% | 0% |
| Surfaces soufflables | | | |
| Porte double battants | [m]* [m] | 3*2 | |
| Caillebotis | [m]* [m] | | 2,2*0,9 |

Tableau 11 : Caractéristiques du local

La résistance à l'explosion de la porte est estimée à 50 mbar. La porte jouant le rôle de surface éventable, les effets sont à considérer uniquement depuis la porte.

Pour chaque cas, la pression maximale atteinte dans les bâtiments est calculée à l'aide de l'outil EFFEX à partir des données d'entrée pour la combustion présentée dans le tableau suivant :

| | |
|-------------------------------------|---------------|
| Concentration de méthane dans l'air | Stœchiométrie |
| Vitesse laminaire de flamme (m/s) | 0,42 |
| Taux d'expansion (-) | 7 |

Tableau 12 : Données d'entrée pour la combustion

| | Unité | Ineris | | Volet C du Porter à connaissance |
|---|--------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| | | Local injection | Vide sanitaire | |
| Pression maximale atteinte à l'intérieur du local (explosion primaire) | [mbar] | 1550 | 93 | |
| Pression maximale atteinte dans le nuage expulsé (explosion secondaire) | [mbar] | >500 | 195 | |
| Masse inflammable participant à l'explosion secondaire (bouffée) | [kg] | 2,7 | 3,5 | |
| Energie correspondante | [MJ] | 6 | 7,7 | |
| Distances d'effet aux seuils au niveau du sol : | | | | |
| 200 mbar | [m] | 6 | Non atteint | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | 8 | 3 | Non atteint |
| 50 mbar | [m] | 20 | 10 | 11 |
| 20 mbar | [m] | 40 | 20 | 27 |

Tableau 13 : Distances d'effet dues à l'explosion

Les distances modélisées par l'Ineris sont légèrement plus grandes que celles présentées dans le PAC.

5.6 Avis de l'Ineris sur la modélisation du PhD6 - Explosion de biogaz rejeté en cas d'extinction ou non allumage de la torchère

L'Ineris n'a pas de remarque sur ce scénario.

5.7 Avis de l'Ineris sur la modélisation du PhD7 - Fuite sur la canalisation aérienne de biogaz

L'Ineris n'a pas de remarque sur ce scénario.

5.8 Avis de l'Ineris sur la modélisation du PhD8 - Fuite de biogaz depuis la soupape du digesteur

L'Ineris n'a pas de remarques sur ce scénario.

5.9 Modélisation par l'INERIS des phénomènes dangereux manquants

5.9.1 Rupture de la tuyauterie basse pression reliant le digesteur au gazomètre

Le scénario envisagé est une fuite sur la tuyauterie de maillage de 200 mm reliant le digesteur au gazomètre sur la partie aérienne de descente le long du digesteur. Les débits amont et aval sont assurés par la vidange du gazomètre et du digesteur. Les données d'entrée permettant l'évaluation du terme source sont présentées dans le tableau suivant :

| | | Amont | Aval |
|-----------------------------|-------------------|-------|------|
| Pression | [mbar] | 28 | 28 |
| Diamètre de la canalisation | [mm] | 200 | 200 |
| Volumes | [m ³] | 5953 | 1190 |
| Température | [°C] | 35 | 35 |

Tableau 14 : Données d'entrée

Le terme source total correspondant est présenté dans le tableau suivant :

| | | Amont (DN200) | Aval (DN200) | Total |
|----------------------|--------|---------------|--------------|-------|
| Débit | [kg/s] | 1,5 | 1,5 | 3 |
| Vitesse d'écoulement | [m/s] | 44 | 44 | 44 |
| Température | [°C] | 35 | | |
| Direction du rejet | [-] | Horizontal | | |

Tableau 15 : Terme source

Les distances d'effets thermiques et de surpression liées à l'explosion du nuage sont présentées dans le tableau suivant :

| | | | |
|---------------------------------|------|-----|-----|
| Conditions météorologiques | | D5 | F3 |
| Distance à la LIE | [m] | 17 | 17 |
| Diamètre maximale du nuage | [m] | 2,2 | 2,2 |
| Volume inflammable * | [kg] | 5,5 | 5,5 |
| Flash Fire | | | |
| Distance aux seuils SEL et SELS | [m] | 17 | 17 |
| Distance au seuil SEI | [m] | 19 | 19 |

| Surpressions | | | |
|---------------------------------------|------|-------------|-------------|
| Energie d'explosion** | [MJ] | 18 | 18 |
| Indice multi-énergie | [-] | 4 | 4 |
| Distances de surpression aux seuils : | | | |
| 200 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint |
| 50 mbar | [m] | 18 | 18 |
| 20 mbar | [m] | 26 | 26 |

Tableau 16 : Distances d'effets (suppression et flash fire) à compter de puis le point de rejet

* calculé à partir du volume de l'hémisphère inscrit dans le nuage, c'est-à-dire la méthode présentée en annexe 3.

Les distances des effets thermiques dues au jet enflammé sont présentées dans le tableau suivant :

| | | | |
|---------------------------------------|-----|----|----|
| Conditions météorologiques | | D5 | F3 |
| Longueur de flamme | [m] | 20 | 19 |
| Distances de surpression aux seuils : | | | |
| 8 kW/m ² | [m] | 20 | 20 |
| 5 kW/m ² | [m] | 25 | 22 |
| 3 kW/m ² | [m] | 30 | 30 |

Tableau 17 : Distances d'effets thermiques

5.9.2 Explosion du local technique du digesteur

Ce scénario correspond à l'explosion du bâtiment digesteur suite à l'accumulation du biogaz issu d'une fuite sur une canalisation de boue située en pied de digesteur.

Lors de la fuite, le digesteur se vidange de ses boues. Le bâtiment se remplit donc progressivement de boues laissant du biogaz s'échapper progressivement avant que le mélange air/biogaz n'atteigne des conditions inflammables dans tout le bâtiment.

Les caractéristiques géométriques du bâtiment sont présentées sur le schéma et dans le tableau suivant :

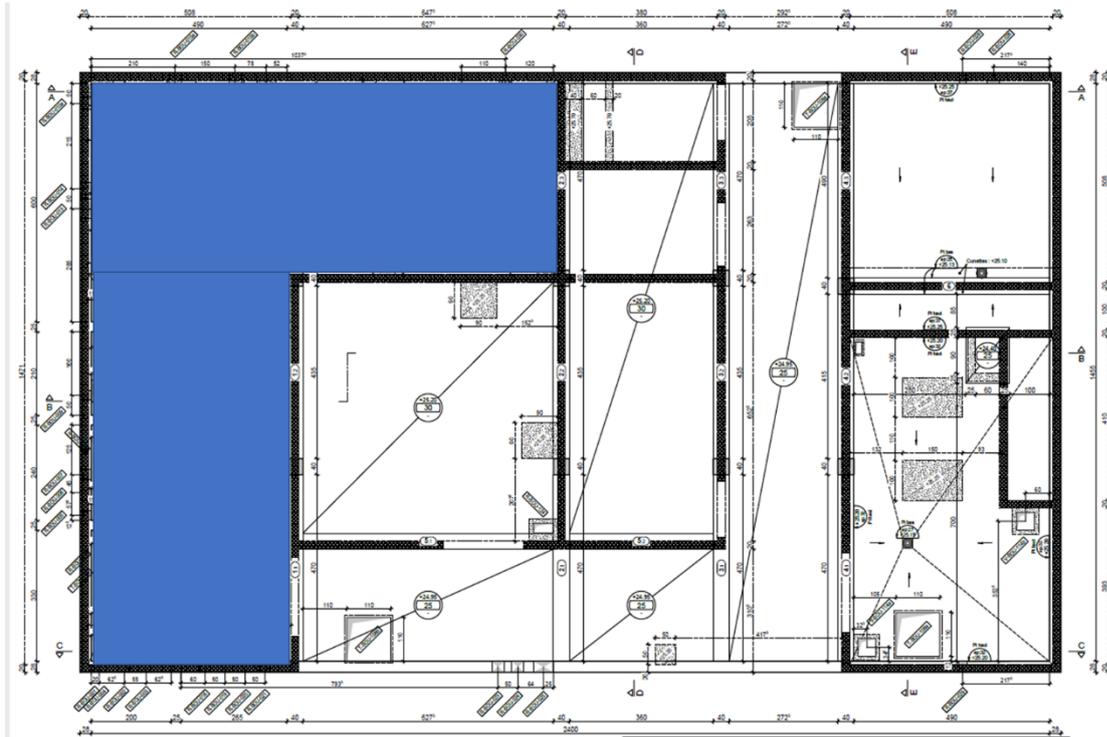


Figure 5 : Caractéristiques géométriques du local

Ses dimensions sont :

| | | |
|----------------------------|-----|------------------|
| Hauteur du local | [m] | 3,55 |
| Grande longueur intérieure | [m] | 14,71 |
| Grande largeur intérieure | [m] | 11,57 |
| Petite longueur intérieure | [m] | 4,7 |
| Petite largeur intérieure | [m] | 4,9 |
| Épaisseur des murs | [m] | 0,2 (béton armé) |

| | | |
|---|-------------------|------------------------|
| Épaisseur de la dalle toiture | [m] | 0,25 (béton armé) |
| Volume | [m ³] | 367,2 |
| Taux d'occupation du bâtiment | [-] | 10% |
| Surface soufflable | | |
| 5 fenêtres | [m]* [m] | 1,71*0,95 (chacune) |
| 1 porte | [m]* [m] | 2,1*2 |
| Ouverture en toiture (manutention) | [m]* [m] | 4,8*3 |
| Pression d'ouverture des surfaces soufflables | mbar | 50 |

Tableau 18 : Caractéristiques du local

Deux hypothèses sont présentées sur la hauteur de boue et sur le temps nécessaire pour obtenir un mélange stœchiométrique :

| | | | |
|---|---------------------|-------|-------|
| Hauteur de boue | [m] | 1 | 2 |
| Débit de biogaz | [m ³ /h] | 8,6 | 17,2 |
| Volume libre dans le local | [m ³] | 234,4 | 144,3 |
| Temps d'attente pour obtenir un mélange stœchiométrique | [h] | 4 | 1 |

Tableau 19 : Influence de la hauteur de boue sur le volume libre et le temps d'attente pour atteindre la stœchiométrie

Le local est pourvu d'une couverture et de murs en béton armé de 20 cm d'épaisseur. La résistance à l'explosion de cette couverture est supposée de l'ordre de 250 mbar.

Pour chaque cas, la pression maximale atteinte dans les bâtiments est calculée à l'aide de l'outil EFFEX à partir des données d'entrée pour la combustion présentée dans le tableau suivant :

| | |
|-------------------------------------|---------------|
| Concentration de méthane dans l'air | Stœchiométrie |
| Vitesse laminaire de flamme (m/s) | 0,3 |
| Taux d'expansion (-) | 6 |

Tableau 20 : Données d'entrée pour la combustion

| | | | |
|---|--------|-------------|-------------|
| Hauteur de boues | | 1 | 2 |
| Pression maximale atteinte dans le local (explosion primaire) | [mbar] | 50,1 | 50 |
| Pression maximale atteinte dans le nuage expulsé (explosion secondaire) | [mbar] | 142 | 141 |
| Masse inflammable participant à l'explosion secondaire (bouffée) | [kg][| 160 | 96 |
| Energie correspondante | [MJ] | 505 | 303 |
| Distances d'effet aux seuils au niveau du toit : | | | |
| 200 mbar | [m] | Non atteint | Non atteint |
| 140 mbar | [m] | 8 | 7 |
| 50 mbar | [m] | 30 | 25 |
| 20 mbar | [m] | 60 | 50 |

Tableau 21 : Distances d'effet dues à l'explosion secondaire

6 Avis sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques prévues par l'exploitant et de leur caractère adapté

6.1 Objet de l'analyse

Dans le chapitre 7 du volet C, les scénarios conduisant à des effets en dehors des limites du site sont caractérisés en probabilité et en gravité. Il s'agit des phénomènes suivants :

- 1a : explosion du ciel gazeux du digesteur (digesteur plein) ;
- 1b : explosion du ciel gazeux du digesteur (digesteur vide) ;
- 2 : explosion de la bache à boues digérées ;
- 3b : explosion de biogaz rejeté lors de la ruine du gazomètre ;
- 5 : explosion dans le poste d'injection.

L'évaluation de la probabilité s'appuie sur la réalisation de nœuds papillons (PhD n°1a, 1b et 2), l'utilisation de bases de données pour caractériser les fréquences d'occurrence des événements initiateurs, des dires d'expert pour les probabilités d'inflammation et les taux de décote associés aux barrières de sécurité pour les PhD n°1a, 1b et 2 ou sur une approche qualitative pour les PhD n°3b et 5.

Les mesures de maîtrise des risques valorisées dans les nœuds papillons sont les suivantes :

- PhD 1a et 1b : « opération de maintenance décennale procédurée, planifiée, opérateurs formés » ;
- PhD 1a et 1b : « opération de maintenance sur une pompe de recirculation procédurée, planifiée, opérateurs formés » ;
- PhD1a, 1b et 2 : « équipement technique de protection contre la foudre » ;
- PhD1b : « prise en compte des données météorologiques pour l'organisation de la maintenance »

Ces MMR n'ont pas fait l'objet d'une évaluation de leurs critères de performance. Les décotes de probabilités attribuées aux barrières de sécurité sont déterminées sur la base de dire d'expert moyennant une approche basée sur le retour d'expérience

Pour les probabilités évaluées sur la base de nœuds papillons, l'Ineris a vérifié :

- la démarche de construction des nœuds papillons,
- la pertinence du choix des données de fréquences pour les événements initiateurs et les probabilités d'inflammation retenues,
- l'ordre de grandeur des classes de probabilités obtenues pour les phénomènes dangereux.

Il n'est pas possible de donner un avis sur les décotes attribuées aux mesures de maîtrise des risques étant donné qu'elles sont issues de dires d'expert.

Par ailleurs, l'Ineris n'a pas refait les nœuds papillons, réévalué les probabilités ni évalué les MMR selon les référentiels Oméga 10 et Oméga 20 développés par l'INERIS.

Si cela s'avère pertinent, l'Ineris proposera des pistes d'amélioration de ces nœuds papillons et d'éventuelles mesures de maîtrise des risques complémentaires valorisables.

6.2 Avis de l'Ineris sur l'évaluation de la probabilité du PhD1a « Explosion du digesteur plein » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées

Bien que les causes n'aient pas été identifiées en APR ou du moins reportées dans le tableau, les événements initiateurs pris en compte pour l'élaboration du nœud-papillon correspondent globalement à ceux retenus communément. Les ordres de grandeur des probabilités d'occurrence des événements initiateurs semblent corrects.

Les deux mesures de maîtrise des risques valorisées dans le PAC sont :

- Opération procédurée, planifiée, opérateurs formés – Niveau de confiance 1 (NC1)
- Equipement technique de protection contre la foudre sur site – Niveau de confiance 2 (NC2)

Concernant plus la procédure correspondant à la maintenance décennale, il aurait été plus pertinent de valoriser les opérations précises prévues dans la procédure permettant de prévenir la formation d'une atmosphère explosive dans le digesteur. Ensuite, un NC de 1 pourrait effectivement être proposé sous réserve d'énumérer les critères de performance de la MMR.

L'équipement technique de protection contre la foudre a été proposé comme MMR. Toutefois, cet équipement intervient sur la cause « foudre » qui peut effectivement présenter un potentiel d'inflammation. Comme recommandé dans la circulaire du 10 mai 2010, la foudre est un événement initiateur à considérer dans l'analyse de risques, sans estimation de la fréquence (sous réserve de démontrer le respect strict, intégral et justifié de la réglementation associée). En conséquence, l'équipement technique de protection foudre peut être retenu comme une barrière de sécurité mais non comme une MMR et la branche du nœud papillon correspondant à la cause « Impact foudre sur le digesteur plein » serait à supprimer.

De plus, dans le PAC, une probabilité d'inflammation à l'intérieur du digesteur forfaitaire de 10^{-2} a été estimée. Celle-ci intègre toutes les sources d'inflammation et notamment la foudre. Le biogaz étant faiblement réactif et étant donné qu'il n'existe pas de source d'inflammation à l'intérieur d'un digesteur, cette valeur est conforme aux valeurs proposées dans le rapport INERIS-DRA-13-133211-12545A « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation ».

Au final, une probabilité de $1,97 \cdot 10^{-5}$ soit une fréquence F4 a été retenue pour le phénomène dangereux 1a, l'ordre de grandeur retenu est correct.

Par ailleurs, le phénomène dangereux 1a étant positionné dans une case « acceptable » de la matrice d'acceptabilité des risques, il est considéré que les mesures de maîtrise des risques retenues sont suffisantes.

6.3 Avis de l'Ineris sur l'évaluation de la probabilité du PhD1b « Explosion du digesteur vide » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées

Bien que les causes n'aient pas été identifiées en APR ou du moins reportées dans le tableau, les événements initiateurs pris en compte pour l'élaboration du nœud-papillon correspondent globalement à ceux retenus communément. Les ordres de grandeur des probabilités d'occurrence des événements initiateurs semblent corrects.

Les trois mesures de maîtrise des risques valorisées sont :

- Opération procédurée, planifiée, opérateurs formés – Niveau de confiance 1 (NC1)
- Equipement technique de protection contre la foudre sur site – Niveau de confiance 2 (NC2)
- Procédure de maintenance (prise en compte des données météorologiques pour l'organisation de la maintenance) – Niveau de confiance 1 (NC1)

Concernant les deux procédures, comme indiqué précédemment, il aurait été plus pertinent de valoriser les opérations précises prévues dans les procédures permettant de prévenir la formation d'une atmosphère explosive dans le digesteur et l'inflammation par la foudre.

De même, comme indiqué au paragraphe précédent, l'équipement technique de protection foudre peut être retenu comme une barrière de sécurité mais non comme une MMR et la branche du nœud papillon correspondant à la cause « Impact foudre sur le digesteur » serait à supprimer.

Concernant la probabilité d'inflammation à l'intérieur du digesteur, une probabilité de 10^{-2} a été retenue. Le biogaz étant faiblement réactif et n'existant pas de source d'inflammation à l'intérieur d'un digesteur, cette valeur est conforme aux valeurs proposées dans le rapport INERIS-DRA-13-133211-12545A « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation ».

Au final, une probabilité de $8,71 \cdot 10^{-6}$ soit une fréquence F5 a été retenue pour le phénomène dangereux 1b. Il est en général retenu une fréquence F4 (D) ou F5 (E) pour ce phénomène dangereux. En considérant que les niveaux de confiance attribués aux barrières sont exacts, l'ordre de grandeur retenu est donc correct.

Par ailleurs, le phénomène dangereux 1b étant positionné dans une case « acceptable » de la matrice d'acceptabilité des risques, il est considéré que les mesures de maîtrise des risques retenues sont suffisantes. Notons que le phénomène dangereux 1b serait également positionné dans une case « acceptable » en retenant une probabilité D (F4).

6.4 Avis de l'Ineris sur l'évaluation de la probabilité du PhD2 « Explosion de la bâche à boues digérées » et sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques associées

L'Ineris a les mêmes remarques que pour le phénomène dangereux 1a concernant les événements initiateurs pris en compte pour l'élaboration du nœud-papillon et les ordres de grandeur des probabilités d'occurrence associés retenus.

La mesure de maîtrise des risques valorisée est :

- Equipement technique de protection contre la foudre sur site – Niveau de confiance 2 (NC2).

L'Ineris a les mêmes remarques que dans les paragraphes précédents concernant cette barrière.

Notons que la probabilité retenue pour le phénomène dangereux 2 serait la même sans prise en compte de cette barrière.

Comme indiqué précédemment, la probabilité d'inflammation retenue est correcte.

Au final, une probabilité de $4,76 \cdot 10^{-5}$ soit une fréquence F4 (D) a été retenue pour le phénomène dangereux 2, l'ordre de grandeur retenu est correct.

Par ailleurs, le phénomène dangereux 2 étant positionné dans une case « acceptable » de la matrice d'acceptabilité des risques, il est considéré que la mesure de maîtrise des risques retenue est suffisante.

6.5 Avis de l'Ineris sur l'évaluation de la probabilité du PhD3b « Ruine du gazomètre »

La méthode retenue pour l'évaluation de la probabilité de ce phénomène dangereux est une approche qualitative. Sur la base de plusieurs de facteurs tendant à limiter l'occurrence de ce phénomène dangereux, il est proposé de retenir un niveau de probabilité de E.

D'après les éléments disponibles dans les bases de données pour les ruines d'équipements et le fait de retenir une probabilité d'inflammation de 10^{-1} pour une inflammation du biogaz à l'air libre, valeur conforme aux valeurs proposées dans le rapport INERIS-DRA-13-133211-12545A « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation », l'ordre de grandeur de la probabilité retenue pour le PhD3b est correct.

6.6 Avis de l'Ineris sur l'évaluation de la probabilité du PhD5 « Explosion confinée du poste d'injection »

La méthode retenue pour l'évaluation de la probabilité de ce phénomène dangereux est une approche qualitative. Sur la base d'une approche à dire d'expert, il est proposé de retenir un niveau de probabilité de D.

D'après les éléments disponibles dans les bases de données sur les fuites de tuyauteries et le fait de retenir une probabilité d'inflammation de 10^{-1} pour une inflammation du biométhane à l'intérieur du local, valeur conforme aux valeurs proposées dans le rapport INERIS-DRA-13-133211-12545A « Proposition d'une méthode semi-quantitative d'évaluation des probabilités d'inflammation », le niveau de probabilité du PhD5 aurait pu être E, la valeur retenue est donc a fortiori correcte.

7 Conclusion

La société nîmoise de l'eau a sollicité l'Ineris pour réaliser une tierce expertise du volet C du porter à connaissance « Analyse du projet sur le volet risques industriels ». Conformément à l'article 8 du projet d'arrêté préfectoral, l'examen critique doit porter notamment sur les points suivants :

- Pertinence des phénomènes dangereux retenus par l'exploitant et identification des éventuels phénomènes et scénarii manquants (y compris les effets dominos) ;
- Choix de l'outil de modélisation retenu par l'exploitant pour les phénomènes conduisant à des effets de surpression ;
- Hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effets des phénomènes dangereux étudiés et résultats obtenus ;
- Suffisance des mesures de maîtrise des risques prévues par l'exploitant et de leur caractère adapté.

Dans le cas où ce dernier point ne serait pas validé, il pourra être proposé de nouvelles mesures en identifiant clairement leurs avantages, contraintes, conditions de mise en œuvre et coûts.

Les principales conclusions de la tierce expertise objet de ce présent rapport sont reportées ci-dessous :

- ✚ Avis sur la pertinence des phénomènes dangereux retenus et identification des éventuels phénomènes et scénarii manquants :

Parmi les phénomènes dangereux non identifiés dans l'APR, certains ne sont pas susceptibles de générer des distances d'effet à l'extérieur du site.

Il apparaît néanmoins nécessaire de compléter l'APR existante afin de prendre en compte les différentes remarques formulées par l'Ineris au paragraphe 3.

Dans le cadre de cette tierce-expertise, il n'était pas prévu que l'Ineris refasse l'APR, l'Ineris se base donc sur son expérience pour déterminer les phénomènes dangereux susceptibles d'avoir des effets à l'extérieur du site et nécessitant des modélisations pour le confirmer ou l'infirmier :

- Explosion d'une ATEX air/biogaz dans le local technique suite à une perte de confinement de boues dans le local technique (sur tuyauterie de vidange ou tuyauterie de la boucle de réchauffage) conduisant à l'émission de biogaz dans l'atmosphère du local ;
- Feu torche/UVCE/flash fire sur la tuyauterie aérienne de biogaz en sortie de digesteur.

Par ailleurs, les effets dominos n'ont pas été pris en compte dans l'APR.

- ✚ Avis sur le choix de l'outil de modélisation retenu pour le calcul des effets de surpression :

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la méthode utilisée pour le calcul des effets d'un Flash Fire et des effets de surpression d'un UVCE.

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la méthode pour le calcul de l'énergie de Brode.

L'Ineris n'a pas de commentaires sur la présentation de la méthode multi-énergie.

- ✚ Avis sur les hypothèses retenues pour le calcul des distances d'effets des phénomènes dangereux, résultats obtenus et modélisations complémentaires :

L'Ineris a formulé des commentaires sur les hypothèses et/ou les résultats obtenus pour le calcul des distances d'effet de certains phénomènes dangereux. A la demande de la société nîmoise de l'eau, l'Ineris a refait les modélisations de ces phénomènes dangereux et a réalisé les modélisations pour les 2 phénomènes dangereux non retenus dans l'APR. Il s'agit des phénomènes dangereux suivants :

- PhD1a - Explosion du ciel gazeux du digesteur en fonctionnement ;
- PhD1b - Explosion du ciel gazeux du digesteur à vide ;
- PhD2 - Explosion de la bache à boue digérée ;
- PhD3a - Explosion confinée du gazomètre ;
- PhD3b - Explosion de biogaz rejeté lors de la ruine du gazomètre ;
- PhD4 - Explosion dans le container à membranes ;
- PhD5 - Explosion dans le poste d'injection ;
- Rupture de la tuyauterie biogaz basse pression reliant le digesteur au gazomètre ;
- Explosion du local technique du digesteur.

- ✚ Avis sur la suffisance des mesures de maîtrise des risques prévues par l'exploitant et de leur caractère adapté :

L'Ineris valide les ordres de grandeur des niveaux de probabilité retenus pour les phénomènes dangereux 1a, 1b, 2, 3b et 5.

Concernant les mesures de maîtrise des risques valorisées dans les nœuds-papillon, l'Ineris formule le commentaire que leur performance n'a pas été évaluée selon les critères de l'Omega 10 et de l'Omega 20.

Néanmoins, étant donné que les phénomènes dangereux sont positionnés dans des cases « acceptable » de la matrice d'acceptabilité, il est considéré que les mesures de maîtrise des risques retenues sont suffisantes.

En complément, voici quelques bonnes pratiques permettant d'optimiser la maîtrise des risques :

- supervision attentive et contrôle du respect du mode opératoire pour les phases de démarrage et d'arrêt des digesteurs qui sont des phases sensibles ;
- prévoir des protections mécaniques pour la totalité des tuyauteries et équipements aériens contenant du biogaz ou du biométhane lorsque leur localisation les rend vulnérables à une agression mécanique ;
- prévoir des protections contre les agressions mécaniques des tuyauteries boues lorsque leur localisation les rend vulnérables à une agression mécanique ;
- prévoir de détecter une variation anormale du niveau de boues dans le digesteur ;
- prévoir la vidange du gazomètre avant toute opération de grutage à proximité ;
- prévoir un rejet des évènements, soupapes et gardes hydrauliques dans des zones sûres, c'est-à-dire exemptes de travailleur, en hauteur et éloignées de toute source d'inflammation potentielle ;
- étudier la possibilité de mise en place d'un asservissement permettant un arrêt d'urgence sûr de l'installation d'épuration en cas de fermeture de la vanne d'injection par GRDF.

8 Annexes

Liste des annexes :

- Annexe 1 : Projex
- Annexe 2 : Dispersion atmosphérique
- Annexe 3 : UVCE
- Annexe 4 : Jets enflammés
- Annexe 5 : méthode multi-énergie
- Annexe 6 : EFFEX

Annexe 1 PROJEX

Pour estimer les effets de pression consécutifs à l'éclatement d'un réservoir, il est recommandé de distinguer un champ proche et un champ lointain.

Dans le champ proche, la propagation des ondes de pression s'apparente à ce qui se passe dans les « tubes à choc » et la phénoménologie dépend de la nature et de l'état des gaz initialement contenus dans le réservoir et de la géométrie de la "source" (volume, forme, effets directionnels).

Dans le champ lointain, les caractéristiques de l'onde de souffle dépendent essentiellement de l'énergie totale libérée et des caractéristiques de l'atmosphère.

D'après BRODE, le paramètre qui permet de différencier champ proche et champ lointain est la masse de gaz contenue dans la capacité avant éclatement. On estime que le champ proche s'étend sur une zone de rayon R_0 donné par :

$R_0 < 1,7 * (M_r / \rho_0)^{1/3}$ où ρ_0 (kg/m³) est la masse volumique de l'air et M_r la masse de gaz dans le réservoir

Une estimation précise des niveaux de pression dans le champ proche requiert en principe le recours à un code de calcul car le champ de pression résulte d'interactions complexes entre ondes de choc et ondes de détente. Toutefois, une estimation par excès de la pression maximale auprès du réservoir peut être obtenue en calculant la « pression de contact » P_c entre le gaz du réservoir et l'atmosphère environnante, juste après l'explosion, obtenue d'après la théorie des tubes à choc.

$$\frac{P_r}{P_0} = \left(\frac{P_c}{P_0} \right) \left[1 - \frac{(\gamma_r - 1) \left(\frac{a_0}{a_r} \right) \left(\frac{P_c}{P_0} - 1 \right)}{\left[2\gamma_0 \left(2\gamma_0 + (\gamma_0 + 1) \left(\frac{P_c}{P_0} - 1 \right) \right) \right]^{1/2}} \right]^{-2\gamma_r / (\gamma_r - 1)}$$

Les indices "r" et "0" correspondent respectivement aux conditions du réservoirs et de l'atmosphère.

S'agissant du champ lointain, les caractéristiques de l'onde de souffle peuvent être obtenues au moyen des abaques qui décrivent l'évolution de la pression maximale (de l'onde de choc) en fonction de la distance au centre de l'explosion. On utilise par exemple la courbe d'indice 10 de l'abaque Multi-Energy (figure 1). Ces abaques ont été établis sur la base de résultats de simulations numériques d'expansion (sous l'effet d'une combustion par exemple) de charges hémisphériques de gaz. l'évolution de la surpression est donnée en fonction d'une distance réduite qui s'exprime à l'aide de l'énergie totale E libérée lors de l'éclatement. D'après BRODE, une bonne estimation de E est $(P_r - P_0) * V_{réservoir} / (\gamma_r - 1)$.

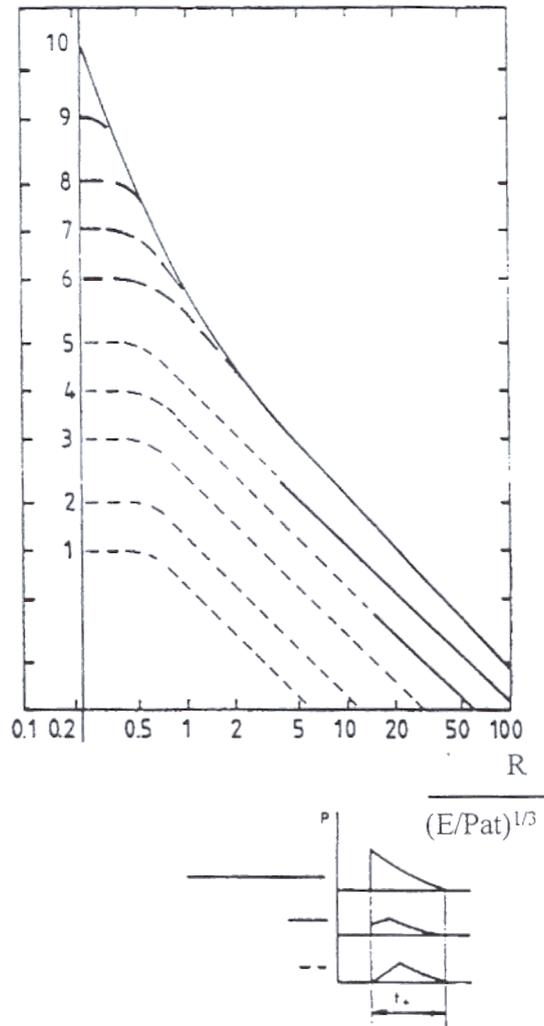


Figure 1 : Abaque relatif à la méthode Multi-Energie donnant des surpressions engendrées par des déflagrations à vitesse de flamme constante de volumes explosibles hémisphériques posés au sol

L'application de ce modèle aux cas d'éclatements de réservoirs de gaz sous pression a été validée expérimentalement (figure 2), et confrontée au retour d'expérience (figure 3).

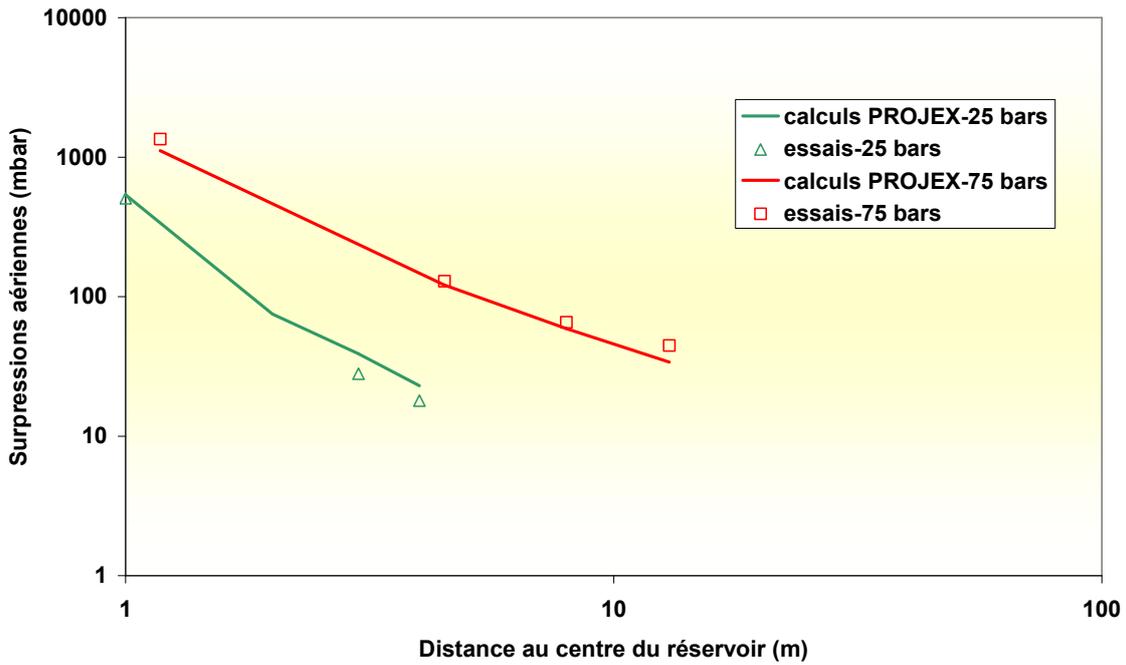


Figure 2 : Comparaison des niveaux de surpression calculés à l'aide de PROJEX et mesurés lors de l'éclatement de réservoirs de gaz

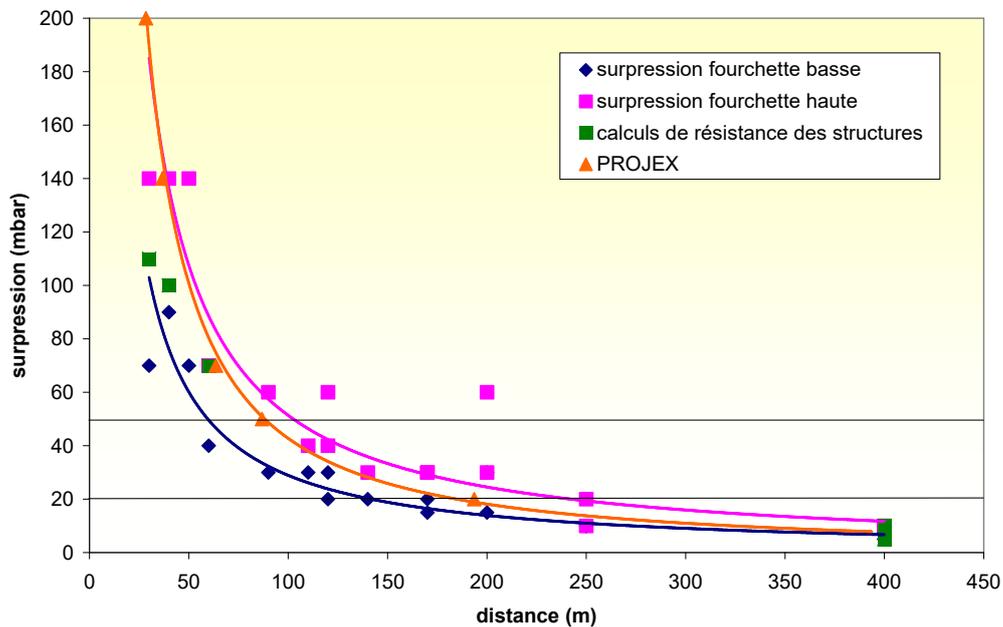


Figure 3 : Comparaison de l'estimation des effets de pression suite à l'éclatement d'une citerne de 20 m³ de propane vide de liquide (accident de Dagneux – 7 mai 2007) avec la courbe théorique calculée avec PROJEX

Prédiction de la trajectoire des fragments

Un fragment projeté par l'éclatement d'une enceinte ou la ruine d'une structure obéit à des équations de balistique classique, du type :

$$M_f \frac{d[V_f(t)]}{dt} = -M_f g z + \frac{1}{2} C_x S_f \rho_0 \cdot \|U - V_f\| \cdot (U - V_f)$$

avec :

- U et V_f , les vecteurs vitesse de l'écoulement issu de la brèche et du fragment dans un repère fixe,
- z , le vecteur unité de direction verticale dirigé vers le haut,
- M_f et S_f , les masse et surface du fragment (surface projetée dans le plan perpendiculaire à l'écoulement),
- C_x , le coefficient de traînée du fragment, typiquement de l'ordre de 1 pour une plaque mince (Heudier, 2004),
- ρ_0 , la masse volumique de l'atmosphère.

Cette modélisation, qui tient compte des effets de traînée et de la compressibilité de l'air non négligeable à grande vitesse, permet de calculer :

- la trajectoire du fragment déduite du bilan des forces extérieures appliquées au fragment,
- les caractéristiques du point d'impact au sol telles que : la distance, la vitesse et l'angle de la trajectoire du fragment par rapport au sol.

Le fragment est supposé offrir sa plus grande surface à l'écoulement pendant toute la durée de la trajectoire, ce qui maximise la poussée reçue, mais accroît par ailleurs le freinage. On admet que ces deux effets contraires se compensent. Enfin, les mouvements de rotation du fragment, de même que les effets de portance, ne sont pas considérés dans la modélisation du phénomène.

La comparaison des calculs numériques et de quelques résultats expérimentaux a montré que cette méthode de calcul permet d'estimer les caractéristiques du point d'impact avec une précision satisfaisante (Proust, 2000).

Un exemple de trajectoire de bardages projetés par une explosion en enceinte est présenté sur la figure 4.

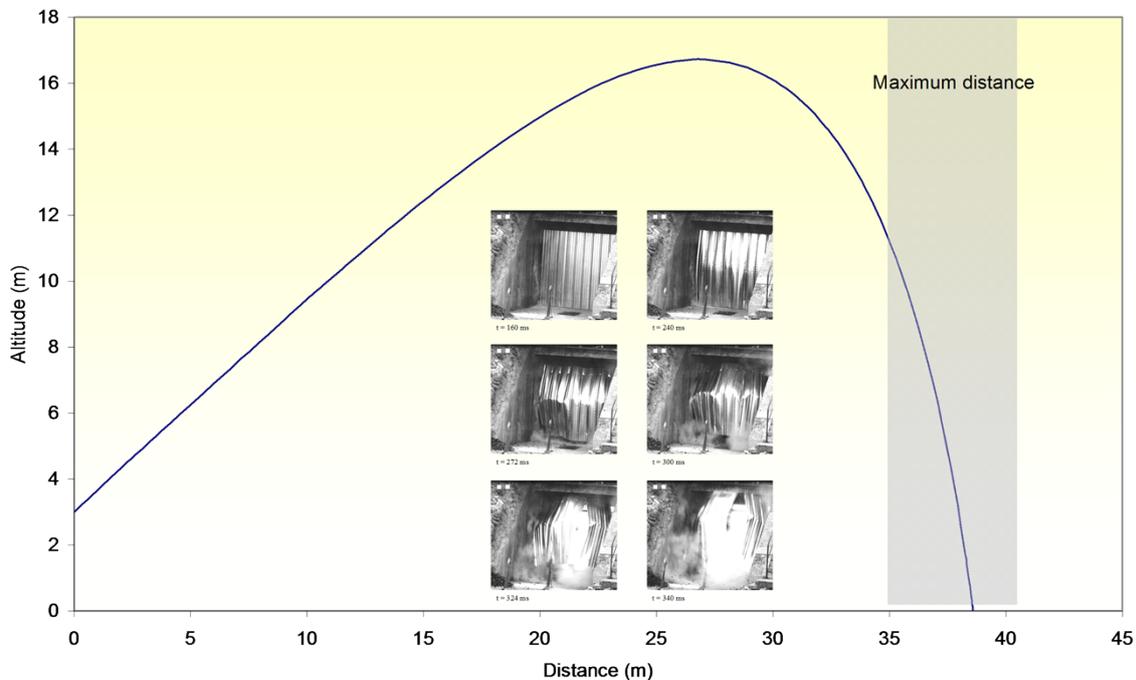


Figure 4 : trajectoire de bardages projetés par une explosion dans une chambre de 100 m³.
Essais INERIS

Outre les caractéristiques du fragment, une donnée essentielle est la vitesse initiale. Dans PROJEX, elle est déduite du calcul de l'impulsion de pression communiquée par le jet de gaz issu de la brèche. L'impulsion est une fonction de la surpression maximale et du temps de décharge du réservoir. Dans le cas d'un gaz sous pression, ce temps résulte de la propagation d'ondes soniques. Dans le cas d'un liquide qui se vaporise, ce temps résulte de la propagation d'une « onde de vaporisation ».

Références

1. HEUDIER L., 2004, *Les éclatements de réservoir – Phénoménologie et Modélisation des effets*, rapport INERIS Q15, téléchargeable sur www.ineris.fr.
- PROUST Ch., 2000, *Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement*, EFFEX, un outil de simulation, www.ineris.fr, réf. 22751.

Annexe 2

Dispersion atmosphérique

La modélisation de la dispersion atmosphérique des nuages formés 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 stricte³. Le rapport d'évaluation⁴ est disponible sur le site internet de l'INERIS (www.ineris.fr). La version 6.4 se place dans la continuité des versions évaluées.

Ce logiciel est un logiciel 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 finis⁵.

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 sont à noter :

- le terrain est considéré comme plat, de rugosité uniforme et non encombré d'obstacles ;
- la vitesse du vent doit être au moins égale à 1 m/s pour obtenir des résultats plausibles ;
- la dispersion du nuage se fait dans l'air atmosphérique frais (concentration nulle dans l'environnement du produit dont la dispersion est étudiée).
- 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. Dans ce cas, les calculs de la dispersion atmosphérique du polluant en phase gaz doivent être réalisés à l'aide du code de calcul de mécanique des fluides. Ce type d'outil de modélisation tridimensionnelle permet en particulier de prendre en compte l'occupation du site par différents bâtiments ainsi que sa topographie.

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.

Voici quelques définitions relatives aux propriétés des nuages inflammables :

Distance à la LIE (m) : 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.

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

³ 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).

⁴ 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.

⁵ 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,

Régime établi (s) : Le régime établi correspond au temps nécessaire à la formation du nuage explosible de masse et de taille maximale. Le jet est dit établi lorsque, dans des conditions de rejet (pression, débit) constantes, les propriétés du jet (champs de concentration et de vitesse, volume inflammable) sont indépendantes de sa durée. En régime établi une situation d'équilibre est atteinte, par laquelle l'apport de produit inflammable à la brèche est compensé par la dilution du produit, en limite du jet, à une concentration inférieure à la LIE. Le régime établi est précédé d'un régime transitoire de durée variable selon les conditions du rejet.

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 suivant :

| Condition météorologique | | D5 | F3 |
|--------------------------|---------|-----|----|
| Stabilité atm. | - | D | F |
| Vitesse du vent | [m/s] | 5 | 3 |
| T° ambiante | [°C] | 20 | 15 |
| T° du sol | [°C] | 20 | 15 |
| Humidité relative | [%] | 70 | 70 |
| Ray. solaire | [kW/m2] | 0,5 | 0 |

Tableau 22 : 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.

Annexe 3

UVCE

Le rejet d'un produit inflammable suite à une brèche ou à une rupture totale du contenant entraîne la formation d'un nuage inflammable susceptible d'exploser. Les niveaux de surpression produits par une telle explosion sont prédits à l'aide de la méthode Multi-énergie.

La méthode vise à prendre en compte le fait qu'une explosion de gaz n'est susceptible d'engendrer de fortes surpressions que si :

- les flammes atteignent une vitesse de propagation importante (plusieurs dizaines de mètres par seconde),
- 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 encombrées⁶ séparées entre elles par des zones libres, il est admis que les surpressions importantes seront engendrées par le passage des flammes 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 des flammes, parmi lesquels peuvent être cités :

- 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 C.

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, il est donc nécessaire, pour un rejet se produisant à l'extérieur, 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. 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,

⁶ Dans ce contexte, le terme « zones encombrées » désigne des lieux contenant à la fois des obstacles et des espaces qui peuvent être partiellement confinés

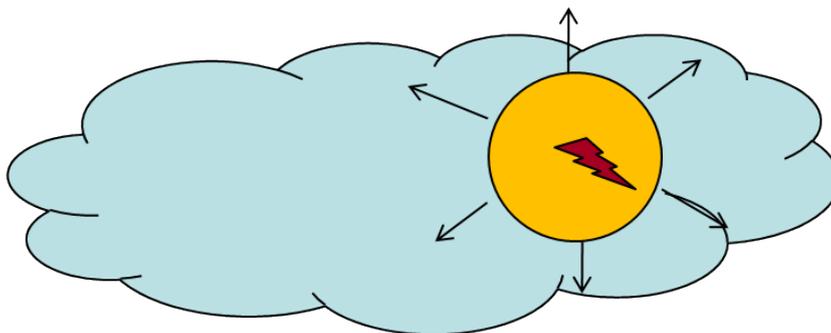


Figure 6 : Explosion sphérique dans un jet libre

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

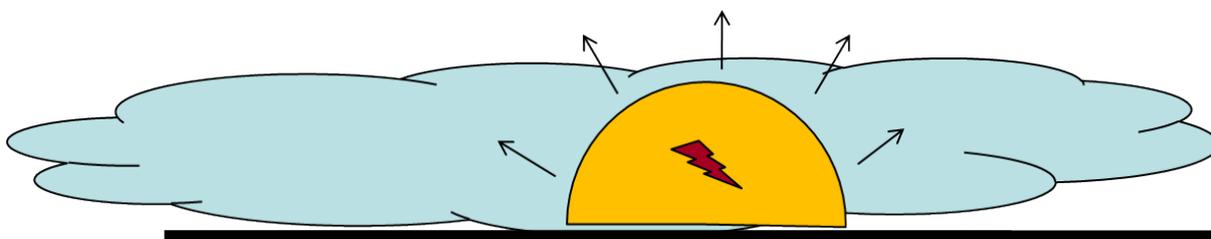


Figure 7 : Explosion hémisphérique dans un jet (ou nuage) rampant

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 avec la méthode précédente et est comparée à l'énergie calculée à partir 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 :

1. du niveau de turbulence (très élevé près de la brèche jusqu'à quasi-nul au bout du nuage),
2. des zones encombrées présentes qui seraient susceptibles d'accélérer la flamme,
3. 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.

Modélisations des effets

A partir des conditions de stockage, le terme source est évalué (débit, vitesse, ...). 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...).

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.

Par exemple, la figure 2 de l'annexe montre qu'une surpression maximale de 0,5 bar correspond à un indice Multi-Energy égal à 6.

Annexe 4

Modélisations 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 modèles⁷ 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 :

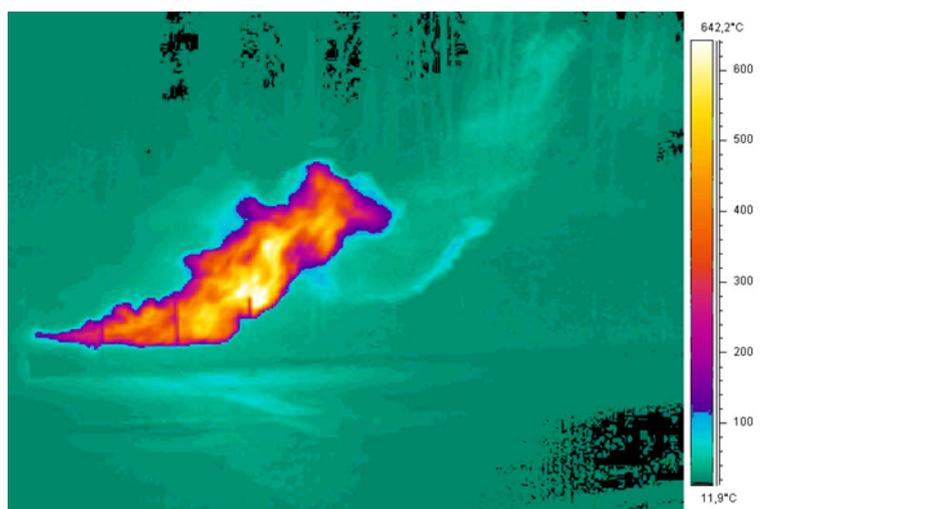


Figure 8 : Image d'un feu torche obtenue avec une caméra Infrarouge

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.

⁷ <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/referentiel-omega8-final1-couverture-1395914430.pdf>

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.

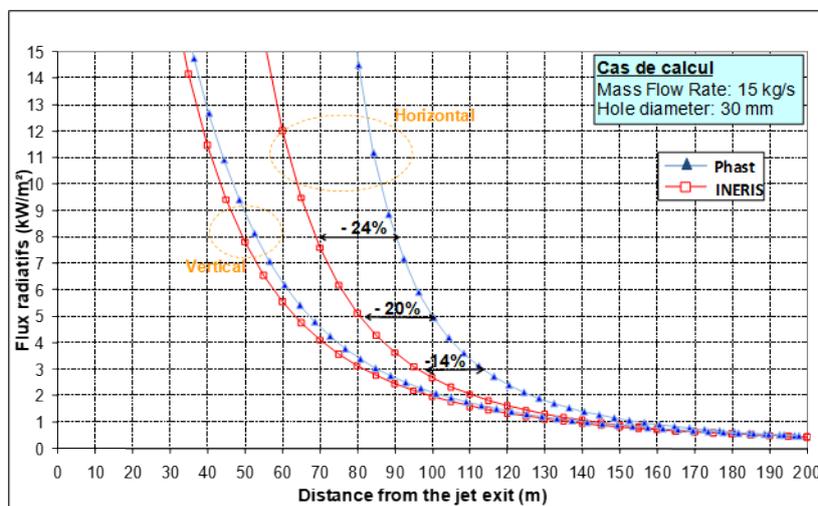


Figure 9 : Comparaison des distances d'effets liées à des feux torches obtenues avec Phast v6.5 et le modèle Ineris

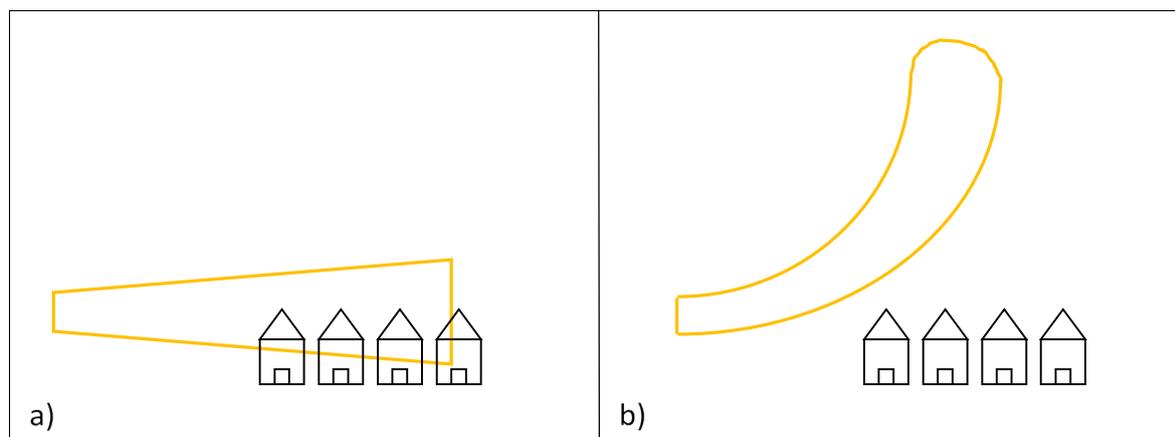


Figure 10: Modélisation de l'impact d'un jet enflammé de GPL sur des maisons
 a) Modèle classique - b) Modèle Ineris

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 jet⁸ à savoir :

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

⁸ en sortie de zone d'expansion dans le cas des jets supersoniques

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

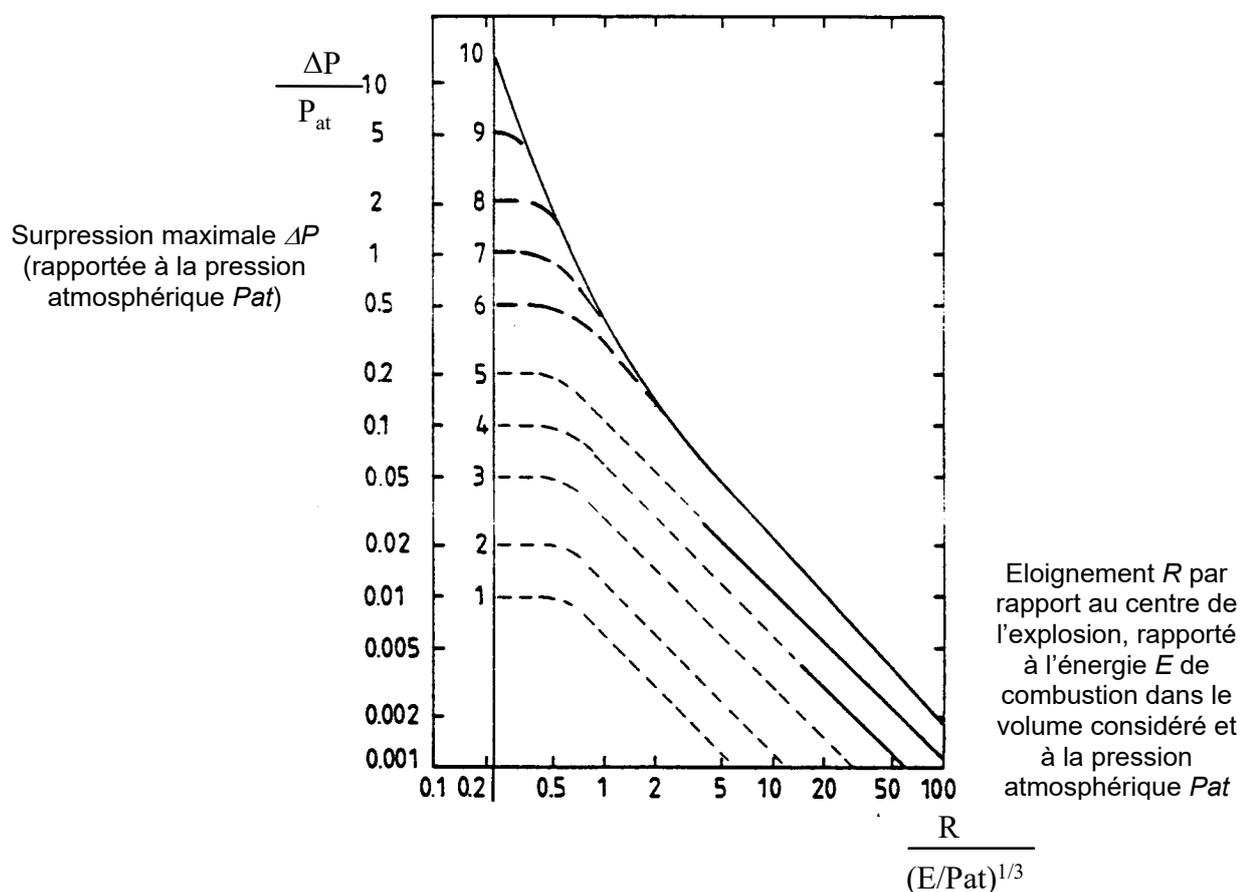
- la température extérieure,
- le degré d'humidité,
- l'élévation du rejet,
- la direction du rejet,
- l'angle entre le vent et l'axe du jet,
- la vitesse du vent,
- la stabilité atmosphérique.

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.

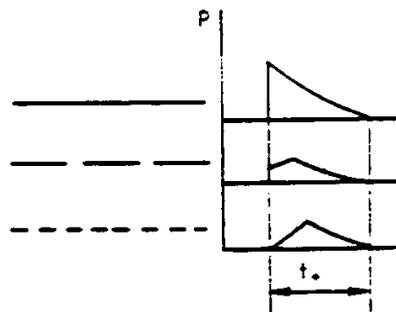
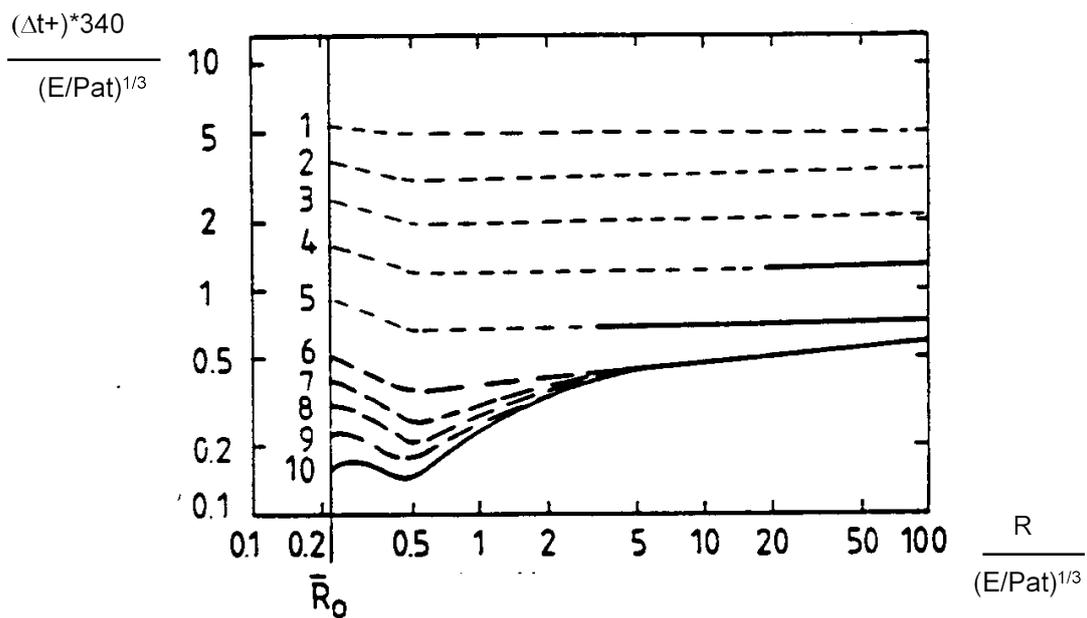
Annexe 5

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 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 6

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.

