

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département QHSE-GRI

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme
D'ingénieur d'état en QHSE-GRI

Intitulé

**Comparaison entre les méthodes de
modélisation des explosions
Cas de Sonatrach Hassi Rmel, Module 4 et
CSTF.**

Réalisé par : TAIEBI AHMED Djamel

Encadré par :

- KERTOUS Aboubakr (ENP)
- BOUDA Mohamed El Abbas (SONATRACH)

Promotion 2015

Table des matières

ملخص	I
Résumé.....	I
Abstract	I
Dédicace	II
Remerciement.....	III
Liste des tableaux	IV
Liste des figures	V
Liste des abréviations	VI
Introduction générale.....	1

Chapitre 1: Cadrage de l'étude

Introduction	3
1. Objectifs	3
2. Les enjeux de l'étude.....	4
3. Problématique.....	5
Conclusion	5

Chapitre 2 : Généralité sur la modélisation des effets de surpression d'un VCE

Introduction	6
1. Définition de l'explosion	6
2. Les régimes d'explosion.....	6
2.1. Déflagration.....	6
2.2. Détonation	6
3. Les types d'explosion	6
3.1. Explosion de solides condensés	6
3.2. Explosion de gaz.....	7
3.3. Explosion de poussières.....	8
3.4. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)	8
3.5. Explosion de gaz non confiné (Vapour Cloud Explosion VCE)	8
4. Type de propagation	13
5. Onde de choc	13
6. Limites d'explosivité	15
7. La dispersion atmosphérique	16
7.1. Rejets continus	16

7.2.	Les rejets instantanés	16
7.3.	Les conditions climatologiques.....	17
7.4.	Environnement de rejet.....	17
8.	Modélisation des effets d'explosion	18
8.1.	Méthode TNT	18
8.2.	La méthode Multi-Energie.....	20
8.3.	Baker-Sterhlow.....	26
8.4.	Méthode de CAM (Congestion Assessment Method).....	27
9.	Tableau comparatif.....	31
	Conclusion	33
Chapitre 3 : Modélisation des effets de surpression par logiciel PHAST, cas de Hassi R'mel		
1.	Présentation du champ de Hassi R'mel	34
1.1.	Situation géographique	34
1.2.	Organisation du champ	34
1.3.	Module MPP4.....	35
1.4.	Description du process.....	36
1.5.	Présentation de CSTF	37
1.6.	Sphère de GPL.....	37
1.7.	Ballon D108	38
2.	Description de logiciel PHAST	38
3.	Résultats de la modélisation par logiciel PHAST	40
3.1.	Ballon de reflux de GPL (D108).....	41
3.2.	Sphère de stockage de GPL (CSTF)	51
3.3.	Modélisation par la méthode CAM.....	61
	Conclusion	62
	Conclusion générale	63
	Bibliographie.....	64
	Annexes.....	65

ملخص

هذه الدراسة عبارة عن مقارنة بين الطرق المختلفة لنمذجة ومحاكاة تأثير الضغط الزائد، الناتج عن انفجار الغازات في الهواء الطلق. تعتمد هذه الدراسة على سرد نظري لمختلف الطرق المستعملة في نمذجة وقياس الضغط الزائد، ثم القيام بمحاكاة ومقارنة هذه الطرق بواسطة برنامج فاست. **كلمات مفتاحية:** انفجار، الغازات في الهواء الطلق، النمذجة، سوناتراك، برنامج فاست.

Résumé

Cette étude est une comparaison entre les différentes méthodes utilisées pour la modélisation des effets de surpression causées par l'explosion d'un gaz à l'air libre.

La démarche utilisée dans cette étude est la citation théorique des différentes méthodes de modélisation des effets de surpression, suivie par une comparaison entre elles par la simulation par logiciel PHAST.

Mot clé : explosion, nuage gazeux, modélisation, SONATRACH, logiciel PHAST.

Abstract

This study is a comparison of the different methods used for modeling the effects of overpressure caused by the explosion of a gas in the open air.

The approach used in this study is the theoretical citation of the various methods of modeling the effects of overpressure, followed by a comparison between them through simulation in PHAST software.

Keywords : explosion, vapor cloud, modeling, SONATRACH, PHAST software.

Dédicace

À mes chers parents

À mes frères et mes sœurs

À tous mes amis

Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier notre Dieu, notre créateur, pour le courage et la patience qu'il m'a donné pour accomplir ce travail.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à mes tuteurs académiques, **Mr. KERTOUS aboubakr** (assistant à l'ENP) et **Mme. HARIK Djamil** (professeur à l'ENP), et à mon encadreur de l'entreprise de SONATRACH **Mr. BOUDA Mohamed El Abbas** (chef service sécurité SH/DP/HR), pour leur temps et leur aimable aide pour réaliser mon modeste travail.

Mes remerciements sont également adressés au **Mr. CHERGUI Abd El Malek** docteur à l'Ecole Nationale Polytechnique de me faire l'honneur de présider le jury de mémoire.

Je tiens à également remercier **Mr. BENMOKHTAR Amin** maître assistant à l'Ecole Nationale Polytechnique et **Mr. TOUAHER Bachir** maître assistant à l'Ecole Nationale Polytechnique et **Mr. CHENENNOU Mourad** chef service sécurité à SONATRACH d'avoir accepté d'évaluer mon travail et de participer à mon jury en tant que examinateurs.

Je tiens aussi à remercier infiniment **Mr. ANNOU Mohamed Ibrahim** (chef de division sécurité SH/DP/HR).

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents qui ont cru toujours à moi, et lesquels, je n'en serais peut-être arrivé là aujourd'hui.

Mes derniers remerciements et qui vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

TAIEBI AHMED Djamel

Liste des tableaux

Tableau 1: Exemples sur les accidents d'explosion	1
Tableau 2: Ordres de grandeurs des zones de dégâts sur les constructions	11
Tableau 3: Dégâts matériels en fonction des pressions aériennes	11
Tableau 4: LIE et LSE de quelque gaz[7]	15
Tableau 5: Les classes de stabilité climatologique.....	17
Tableau 6: Correspondance entre indices de sévérité et surpressions maximales	21
Tableau 7: Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Kinsella, 1993).....	23
Tableau 8: Détermination de la surpression maximale pour la méthode Baker-Sterhlow	27
Tableau 9: Facteur de correction pour quelques combustibles	29
Tableau 10: Comparaison entre les méthodes d'évaluation des effets de surpression.....	31
Tableau 11: Caractéristiques de sphère de stockage de GPL	37
Tableau 12: Caractéristiques de ballon de reflux de GPL (D108).....	38
Tableau 13: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (TNT))	43
Tableau 14: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (TNT))	44
Tableau 15: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))	46
Tableau 16: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (ME))	47
Tableau 17: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (BS))	49
Tableau 18: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (BS))	50
Tableau 19: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (TNT))	53
Tableau 20: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (TNT))	54
Tableau 21: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (TNT))	56
Tableau 22: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (ME)).....	57
Tableau 23: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (BS)).....	59
Tableau 24: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (BS)).....	60
Tableau 25: Distances d'effets de surpression (CAM)	61

Liste des figures

Figure 1: Synoptique de développement d'une explosion[4]7

Figure 2: Explosion de gaz non confinée[4]8

Figure 3: Profil d'onde de choc d'une détonation13

Figure 4: Profil d'une onde de choc d'une déflagration.....14

Figure 5: Domaine d'explosivité15

Figure 6: Rejet continu dans un réservoir.....16

Figure 7: Rejet en continu16

Figure 8: La démarche de la méthode Multi-Energie [8]20

Figure 9: Arbre de décision pour le choix d'un indice Multi-Energie.....22

Figure 10 : Graphe comparative entre les quatre méthodes [7]32

Figure 11: Rose de vent de Hassi R'mel34

Figure 12: La carte de champ de Hassi R'mel35

Figure 13: Dispersion de GPL lors de rupture catastrophique41

Figure 14: Dispersion de GPL lors d'une brèche41

Figure 15: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique du ballon D108(TNT)) .42

Figure 16: Illustration de surpression (rupture catastrophique du ballon D108 (TNT)).....42

Figure 17 : La surpression en fonction de la distance (brèche sur le ballon D108 (TNT))43

Figure 18: Illustration de surpression (brèche du ballon D108 (TNT))44

Figure 19: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))..45

Figure 20: Illustration de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))45

Figure 21: La surpression en fonction de la distance (brèche sur D108 (ME)).....46

Figure 22: Illustration de surpression (brèche sur ballon (ME))47

Figure 23: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de ballon (BS))48

Figure 24: Illustration de surpression (rupture catastrophique de ballon (BS))48

Figure 25: La surpression en fonction de la distance (brèche sur le ballon (BS)).....49

Figure 26: Illustration de surpression (brèche sur le ballon (BS))50

Figure 27 : Dispersion de rupture catastrophique de sphère51

Figure 28: Dispersion de brèche sur la sphère51

Figure 29: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (TNT)).....52

Figure 30: Illustration de surpression (rupture de sphère (TNT))52

Figure 31: La surpression en fonction de la distance (brèche de sphère (TNT)).....53

Figure 32: Illustration de surpression (brèche de sphère (TNT))54

Figure 33: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (ME))55

Figure 34: Illustration de surpression (rupture catastrophique de sphère (ME))55

Figure 35: La surpression en fonction de la distance (brèche de sphère (ME))56

Figure 36: Illustration de surpression (brèche de sphère (ME))57

Figure 37: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (BS))58

Figure 38: Illustration de surpression (rupture catastrophique de sphère (BS))58

Figure 39: La surpression en fonction de la distance (brèche sphère (BS))59

Figure 40: Illustration de surpression (brèche sphère (BS)).....60

Liste des abréviations

BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

BS : La méthode de Baker-Strehlow

CAM : Congestion Assesment Method.

CSTF : Centre De Stockage Et Transfert Des Fluides

GAME : Guidance for the Application of the *Multi Energy* method

GPL: Gaz De Pétrole Liquéfié

HAZOP : Hazard And Opérability Study

LIE : Limite Inferieure D'explosivité

LSE : Limite Supérieure D'explosivité

ME : La méthode Multi-Energie

MPP4 : Module Processing Plant 4

ORSEC : Organisation De Secours

PHAST : Process Hazard Analysis Software Tool

POI : Plan D'organisation Interne

PPRT : Plan De Prévention Des Risques Technologiques

QRA : Quantitative Risk Assesment

SRGA: Station De Récupération Des Gaz Associée

TNO : Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée)

TNT : trinitrotoluène ou tolite

VCE : Vapeur Cloud Explosion

Introduction générale

L'industrie des hydrocarbures présente des risques des différentes natures dont les effets et les impacts peuvent être très graves sur les travailleurs, la population riveraine, les biens et l'environnement. Parmi ces risques, le risque de l'explosion des gaz à champ libre.

L'importance de dommage causé par les explosions au cours de l'histoire (accidents de l'industrie ou dans la société), fait les industriels et les scientifiques s'intéresser par ce phénomène, pour le contrôler ou limiter les dégâts s'il survient par des mesures préventives ou protectrices en procédant par la modélisation et l'évaluation de l'explosion.

Tableau 1: Exemples sur les accidents d'explosion

Accident	lieu	date	Dégâts
Accident d'Oufa : Nuage de GPL créé par une fuite dans une canalisation	La ville d'Oufa (Union Soviétique)	04 juillet 1989	500 morts et 700 à 800 blessés[1]
Catastrophe de Flixborough : explosion d'un nuage de cyclohexane	Ville Flixborough, Angleterre	01 juin 1974	28 morts et 36 blessés[2]
Accident de GL1K : explosion de GNL	Skikda, Algérie	19 janvier 2004	27 morts, 74 blessés et 1 milliard USD de pertes
Accident à la cité universitaire BAKHTI Abd El Madjid : accumulation et explosion de gaz sous le sol du restaurant universitaire	Tlemcen, Algérie	25 mai 2012	9 morts

Dans le monde, les pays ont obligé par réglementation, les entreprises qui présentent un risque majeur d'élaborer une étude de danger.

Avec l'évolution des exigences réglementaire algériennes, la société SONATRACH DP HR devient obligée d'élaborer une étude de danger pour se conformer aux exigences et déterminer le niveau du risque sur l'agglomération qui entoure les unités de production et de traitement de gaz à Hassi R'mel, en essayant de trouver les moyens appropriés pour élaborer une étude de danger démontrant le niveau réel de risque et donnant des résultats fiables.

Lors de l'élaboration d'une étude de danger, on s'intéresse aux phénomènes dangereux, pour les évaluer et les modéliser par des différentes méthodes (Equivalent TNT, Multi-Energie, Baker-Sterlow, CAM) et outils (mathématiques et informatiques).

L'élaboration de l'étude de danger (vérifier les exigences de l'état) n'est pas le seul motif pour la modélisation des explosions, l'entreprise va bénéficier en diminuant le nombre des accidents et les frais des assurances et préserver la santé de ses travailleurs et son image de marque.

Donc la méthode utilisée a une influence majeure sur les résultats de l'étude et le statu de l'entreprise.

Le travail présent est une contribution à la modélisation des effets de l'un de ces risques majeurs est l'explosion de gaz, par la comparaison entre les méthodes les plus utilisées pour l'évaluation de la surpression causée par l'explosion d'un gaz, ces méthodes sont : Equivalent TNT, méthode Multi-Energie, méthode de Baker-Strehlow et la méthode CAM.

Pour se faire, nous allons utiliser un logiciel de simulation « PHAST », qui s'est imposé à cause de la complexité de l'étude qui fait appel aux plusieurs disciplines (mathématique, thermodynamique, mécanique des fluides,...).

Chapitre 1 :

Cadrage de l'étude

Introduction

L'utilisation et la manipulation de l'énergie hydrocarbure était toujours une source de danger destructif comme les explosions. L'Algérie n'est à l'abri de ce phénomène, à titre d'exemple l'accident de Skikda en 2004 qui a causé la mort de 27 personnes et l'explosion de restaurant de la cité universitaire « BAKHTI Abd El Madjid » à Tlemcen, qui a causé la mort de personnes.

1. Objectifs

Mon projet de fin d'étude intitulé « comparaison entre les méthodes de modélisation des effets de surpression d'un VCE », a pour but de :

- Déterminer la méthode la plus appropriés selon le cas.
- Définir les zones d'effets pour l'évaluation et la modélisation des phénomènes dangereux.
- Aider à déterminer la méthode la plus adaptée pour les différents scénarios pour élaborer une étude de danger fiable et conforme à la réglementation.
- Mettre une plate-forme pour l'élaboration les plans d'urgences POI, ORSEC et PPRT (plan de prévention des risques technologiques).
- Aider à déterminer les zones agglomérées qui sont susceptibles d'être touchées lors d'une explosion.
- Aider à améliorer les systèmes de détection et les systèmes d'intervention.

2. Les enjeux de l'étude

– Enjeux réglementaires :

La modélisation des effets des explosions est une étape dans l'élaboration de l'étude de dangers[3], cette dernière qui est une exigence réglementaire doit être fiable et donner des résultats réels sur l'état de l'unité et sur les zones qui peuvent être touchées par les dangers issus de cette unité.

– Les enjeux humains:

Un accident technologique majeur sur une unité de traitement de gaz, peut avoir des conséquences graves et des dégâts dramatiques à l'extérieur et à l'intérieur de l'unité (perte de vies humaines, des maladies professionnelles, des handicaps permanents, ...)

– Les enjeux techniques:

La modélisation des phénomènes dangereux a un rôle primordial dans la préservation des installations et des biens de l'entreprise, par l'emplacement des barrières de prévention et de protection nécessaires, pour l'empêchement de l'accident ou pour limiter ses conséquences

– Les enjeux environnementaux:

Les accidents majeurs ont un impact significatif sur l'environnement (la flore et la faune), à cause de ses effets destructifs et parfois par les émissions causées par ses phénomènes.

– Les enjeux économiques :

La modélisation aide à l'évaluation des risques et la prise des mesures préventives et protectrices pour préserver le patrimoine de l'entreprise et diminuer les frais de l'assurance et préserver l'image de marque de cette entreprise

3. Problématique

Notre travail va s'inscrire sur ce contexte par le traitement de cette problématique, par la comparaison entre les méthodes de modélisation des effets de surpression.

Dans le monde, les accidents des explosions ont causé des dégâts graves sur l'homme et sur l'environnement, à cet égard SONATRACH veut éviter les scénarios qui peuvent conduire à ces dégâts.

Cette étude peut servir à:

- Elaborer l'étude de danger.
- Evaluer des risques professionnels et industriels
- Contrôler l'agglomération.
- Définir les plans d'urgences.
- Assurer la maîtrise des accidents technologiques.

Pour cela, la modélisation des phénomènes dangereux doit être faite en premier lieu pour préparer une bonne plate-forme pour permettre aux autres instructions ou méthodes comme l'EvRP, QRA, HAZOP, ... d'utiliser ses résultats et ses recommandations afin d'optimiser le système de management des risques, à l'intérieur et à l'extérieur de l'entreprise.

Les résultats obtenus peuvent dessiner une cartographie de site industriel délimitant les zones à haut risque sur toute la région, et donner des idées sur l'amélioration de l'aménagement de site et de territoire extérieur autour de ce dernier.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité les enjeux entraînés par une étude comparative entre les méthodes de modélisation des effets de surpression, et leur utilité dans le processus de l'évaluation des risques à l'intérieur et l'extérieur de l'entreprise SONATRACH pour son intérêt et l'intérêt de population riveraines.

Chapitre 2 :
Généralité sur la
modélisation des
effets de surpression
d'un VCE

Introduction

L'étude de phénomène de l'explosion nécessite une recherche profonde afin de trouver les définitions des éléments qui facilitent sa compréhension, et les outils utilisés (analytiques, numériques) pour aboutir à une modélisation permettant de simuler le phénomène

1. Définition de l'explosion

« En champ libre, une explosion survient si une quantité suffisamment grande d'énergie est libérée, pendant un temps suffisamment court pour engendrer une onde de souffle qui se propage dans l'environnement à partir de la source d'émission appelée source de l'explosion ».

La norme française NF EN 1127-1 définit l'explosion comme suit : « une explosion est une réaction brusque d'oxydation ou de décomposition entraînant une élévation de la température, de pression ou les deux simultanément ».

2. Les régimes d'explosion

On distingue deux régimes d'explosion :

2.1. Déflagration

On parle de déflagration lorsque le front de flamme se déplace plus lentement que l'onde de choc. La vitesse du front de flamme est subsonique c'est-à-dire inférieur à la vitesse du son, soit 340 m/s.

2.2. Détonation

L'onde de choc et le front de flamme sont confondus ce qui a pour conséquence une augmentation considérable de la pression (suit après d'une dépression), un déplacement de volume d'air très important et un bruit très élevé.

La vitesse de détonation est supersonique donc supérieur à 340 m/s. Mais les vitesses de détonations sont plutôt de l'ordre de plusieurs Km/s.

3. Les types d'explosion

3.1. Explosion de solides condensés

Les solides condensés correspondent principalement aux matières pyrotechniques (les explosifs).

L'explosifs le plus courant est le TNT (trinitrotoluène ou tolite), découvert en 1863, mais de nombreux dérivés ont été élaborés par la suite en fonction des propriétés recherchées (souffle, brisance, etc...) tels la dynamite en 1867, la pentrite ou l'hexogène.

3.2.Explosion de gaz

Une explosion de gaz est une combustion rapide d'un mélange de réactif avec l'oxygène de l'air.

L'intensité des effets de surpressions varie en fonction du régime d'explosion : déflagration ou détonation (rare). Ce dernier est lié à la vitesse de propagation de la flamme à travers le nuage explosible et dépend principalement :

- de la nature et de la quantité de combustible dans les limites d'inflammabilité ;
- des conditions de la réaction (turbulence initiale et pré-mélange) ;
- du confinement apporté par les parois ;
- de l'encombrement généré par les obstacles ;
- de la source d'allumage.

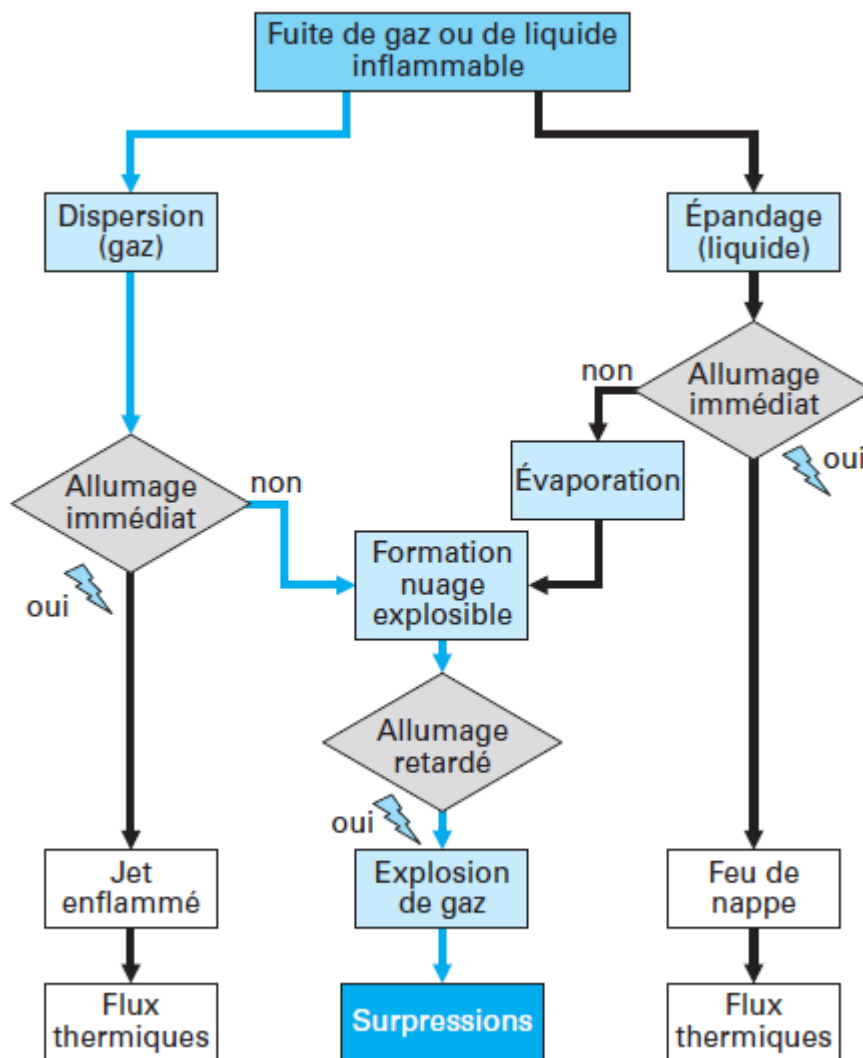


Figure 1: Synoptique de développement d'une explosion[4]

3.3. Explosion de poussières

La manipulation et le stockage de produits pulvérulents entraîne des frottements entre les grains ou avec des surfaces rugueuses, ce qui présente un risque d'inflammation qui, dans certaines conditions, peut conduire à une explosion plus ou moins violente, car elles présentent une surface de combustion très importante bien que fortement divisée. Cette évolution est directement liée au produit, sa granulométrie, sa concentration, ainsi qu'au milieu (confiné ou non).

3.4. BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Un BLEVE correspond à la libération brutale d'une quantité d'un liquide sous pression surchauffée ou d'un gaz liquéfié en état d'ébullition sous pression, suite à l'éclatement ou la perforation d'une enveloppe de stockage.

Dans le cas d'un produit inflammable, la détente conduit à la formation d'une boule de feu, il s'agit d'une explosion dont les effets dominants sont les effets de rayonnement thermique plus que de surpression.

3.5. Explosion de gaz non confiné (Vapour Cloud Explosion VCE)

3.5.1. Définition

Suite à une fuite de gaz combustible dans un environnement non confiné, un nuage formé d'un mélange d'air et de gaz combustible se forme. Lorsque ce mélange atteint les critères d'explosibilité (teneurs en combustible et en oxygène comprises dans le domaine d'inflammabilité) et rencontre une source d'allumage, il explose. Un front de flamme se propage associé à l'expansion des gaz brûlés qui agissent sur les gaz frais environnant à la manière d'un piston pouvant donner lieu à une onde de pression aérienne.

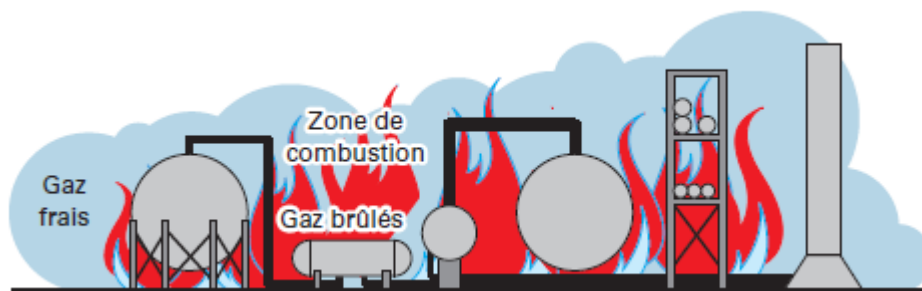


Figure 2: Explosion de gaz non confinée[4]

3.5.2. Description de phénomène

Un VCE comprend généralement les étapes suivantes :

- Rejet dans l'atmosphère d'un liquide inflammable volatil.
- L'évaporation de la phase liquide épandue,
- Mélange avec l'oxygène de l'air pour former un volume inflammable,
- En présence d'une source d'allumage, inflammation de ce nuage,
- Propagation d'un front de flamme à une vitesse suffisamment élevée, une onde de pression se forme et donne naissance à un phénomène de déflagration.
- Inflammation du reste du nuage qui était à l'origine trop riche en combustible pour être inflammable.

3.5.3. La rapidité de phénomène

Le VCE est un phénomène classé **Très Rapide**. La durée de la phase pré-accidentelle se déroulant entre l'événement initiateur et l'événement redouté central est instantanée. De même, la durée de la phase post-accidentelle se produisant entre l'événement central redouté et la fin du phénomène, sera immédiate :

- Le délai d'occurrence (D_1) est instantané.
- Le délai lié à la montée en puissance du phénomène jusqu'à son état stationnaire (D_2) peut être estimé à quelques millisecondes.
- Le temps d'atteinte (D_3) est immédiat étant donné la vitesse de propagation des ondes de surpression.
- Le temps d'exposition (D_4) est également instantané.

Pour les phénomènes très rapides, les possibilités de réduction de la gravité et d'évacuation sont limitées. L'intervention après coup consistera principalement à limiter les dégâts et à protéger les équipements suite aux éventuels feux générés par l'explosion. L'accent doit être mis sur la prévention plutôt que sur la protection dont l'efficacité ne serait que réduite.

3.5.4. Importance de la source

La première notion qui est liée à la source est celle de l'énergie de la source d'inflammation. La vitesse de propagation est d'autant plus grande que l'énergie d'inflammation est importante. À noter que les sources industrielles d'inflammation délivrent une énergie de l'ordre du Joule. L'autre notion est liée à la position de l'allumage du nuage gazeux. Deux cas sont alors possibles : soit l'inflammation se fait par le cœur, soit par la périphérie. Même s'il n'existe pas de règle absolue, les expériences en laboratoires tendent à prouver que l'allumage au centre du nuage donne une vitesse plus importante qu'un allumage à la périphérie.

3.5.5. Conséquences

3.5.5.1. Conséquences sur l'homme

Les principales conséquences d'une explosion de gaz sur l'homme sont dues aux effets de l'onde de surpression aérienne, de la pénétration des fragments, de l'impact des missiles, de la projection des corps et des effets thermiques. Dès lors, il est possible de simplifier l'approche des conséquences d'un VCE en s'intéressant aux deux principaux effets lors d'une explosion c'est à dire la surpression et les effets thermiques. Pour cela, on peut utiliser des valeurs seuils. Par exemple, prenons les valeurs réglementaires pour l'évaluation des effets de surpression sur l'Homme (valeurs extraites du code français de l'environnement article L.515-16) :

- 20 mbar : effets de bris de verre.
- 50 mbar : effets irréversibles délimitant la "zone des dangers significatifs pour la vie humaine".
- 140 mbar : effets létaux délimitant la "zone des dangers graves pour la vie humaine".
- 200 mbar : effets létaux significatifs délimitant la "zone des dangers très graves pour la vie humaine".

Les valeurs données par les exemples nous informent que pour les VCE, la surpression est généralement de quelques dizaines de millibars. Ainsi, seuls les deux premiers seuils sont à prendre en compte dans la plupart des cas. Malheureusement certaines catastrophes affichent des valeurs de surpression beaucoup plus importantes. Même si ce type de catastrophe est très rare, il est important de ne pas négliger ces valeurs.

Concernant les effets thermiques, il est courant de dire que ceux-ci sont négligeables lors d'une VCE. De fait, l'exposition se déroule durant un temps très court. Les effets thermiques sont donc dus au passage du front de flamme ce qui implique que toute personne se trouvant sur le passage de la flamme risque de subir l'effet léthal. Le problème réside dans le fait qu'une VCE peut être le point de départ d'un incendie et peut mettre en marche les effets dominos déjà abordés auparavant.

Cependant, cette approche ne permet pas d'évaluer les effets avec précision, nous allons donc regarder plus attentivement les dégâts possibles sur le corps humain.

3.5.5.2. Conséquences sur les bâtiments

Il est assez difficile d'estimer les possibles effets de destruction engendrés par une explosion. Cependant, il est possible de simplifier le problème en utilisant des valeurs seuils de surpression statique. Par exemple, le TNO nous donne le tableau suivant, ce qui nous permet de trouver un ordre de grandeur concernant les destructions possibles.

Tableau 2: Ordres de grandeurs des zones de dégâts sur les constructions

Zone	Dégâts	Pression (kPa)
A	destruction totale	> 83
B	important	> 35
C	moyen	> 17
D	faible	> 3,5

Le tableau 2 classe les effets possibles en quatre zones allant de A à D en fonction de la gravité des dégâts et en fonction de la pression aérienne incidente. Néanmoins, il est possible d'aller plus loin dans le classement en quittant les résultats du TNO. En effet, on peut alors utiliser les conclusions d'une étude appelée Modélisation et approche opérationnel du BLEVE, du boilover, du flashover et du backdraft, publiée en 1995 par Baily, Legouec, Lefevre et Roure. Cette étude nous donne ainsi le tableau suivant qui est d'une précision redoutable concernant les faits, et qui s'avère de plus, très proche de la réalité.

Le seuil minimal pour qu'il y ait un effet domino est : 160 mbar[5]

Tableau 3: Dégâts matériels en fonction des pressions aériennes

Pression (mbar)	Dégâts matériels
2	Fentes occasionnelles de la vitre de grandes fenêtres
7	Bris des vitres de petites fenêtres
10	Pression "typique" de bris de vitres
20	10% des vitres brisées en éclats, quelques dommages aux plafonds des maisons
27 - 48	Déplacement des tuiles
30	Dégâts mineurs et limités aux structures
35 - 70	Petites et grandes fenêtres brisées en éclats Dégâts occasionnels aux cadres des fenêtres
50	Dégâts mineurs aux structures des maisons
55	Bris des petites fenêtres des maisons
70	90% des vitres brisées Démolition partielle des maisons
70 - 140	Eclatement des panneaux fibrociment Implosion des panneaux en tôles ondulées ou aluminium Déformation des attaches des panneaux en bois en construction traditionnelle

Chapitre 2 : Généralité sur la modélisation des effets de surpression d'un VCE

90 - 100	Torsion légère des encadrements en acier des revêtements des bâtiments
140	Dégâts possibles aux réservoirs d'hydrocarbures de grandes dimensions
140 - 200	Effondrement partiel des murs et des toits de maison
160	Les murs en moellons non renforcés volent en éclats
175	Limite inférieure des dégâts sérieux aux structures
200	50 % de destruction des maçonneries en briques des maisons Déplacement et légers dégâts aux machines dans les bâtiments industriels Démolition des cadres en fer sans encadrement autoportant
200 - 300	Déformation des bâtiments à charpente en acier et sortie de leurs fondations
300	Rupture des réservoirs de pétrole
350	Rupture des revêtements des bâtiments industriels légers Rupture des poteaux en bois des lignes téléphoniques
350 - 500	Endommagement des presses hydrauliques de 20 tonnes dans les bâtiments
500	Destruction complète des maisons
650	Renversement des wagons chargés
700 - 3000	Démolition des containers ferroviaires chargés Destruction totale probable des bâtiments

4. Type de propagation

La géométrie de la masse gazeuse est influencée par le type de confinement. Par conséquent, le mode de propagation de flamme est influencé.

Il existe 3 modes de propagation :

1- Mode axial :

Ce mode caractérise les explosions qui se déroulent dans une enceinte ou un local caractérisé par un rapport entre longueur et diamètre (largeur) important, et cette enceinte est ouverte aux extrémités.

2- Mode radial :

Ce mode caractérise les explosions qui se déroulent entre deux plans parallèles (sol et plafond).

3- Mode sphérique :

Ce mode est observé lorsqu'il n'existe aucune paroi pouvant diriger la propagation de la flamme.

5. Onde de choc

Le terme « onde de choc » est employé pour décrire l'onde qui résulte de l'explosion d'une charge explosive. Ce nom est donné au « vent violent » qui accompagne l'onde et est senti par un observateur stationnaire pendant qu'elle passe. En outre, le terme « onde choc » est généralement employé pour décrire le gradient de pression dans lequel le modèle de l'onde n'est pas caractérisé en détail.

L'onde de choc a deux profils différents selon le régime de l'explosion :

Détonation :

Dans une détonation, une onde de choc accompagnant un front de flamme propage à travers le mélange air-gaz avec des vitesses supersoniques. Par conséquent, pour une quantité donnée d'explosifs, les détonations sont plus destructives que des déflagrations. Le profil de pression au fil du temps d'une onde de choc peut être caractérisé par son temps de montée, surpression maximale, la durée de la phase positive et toute sa durée.

Le profil de l'onde de choc d'une détonation est représenté par la figure 3[6]:

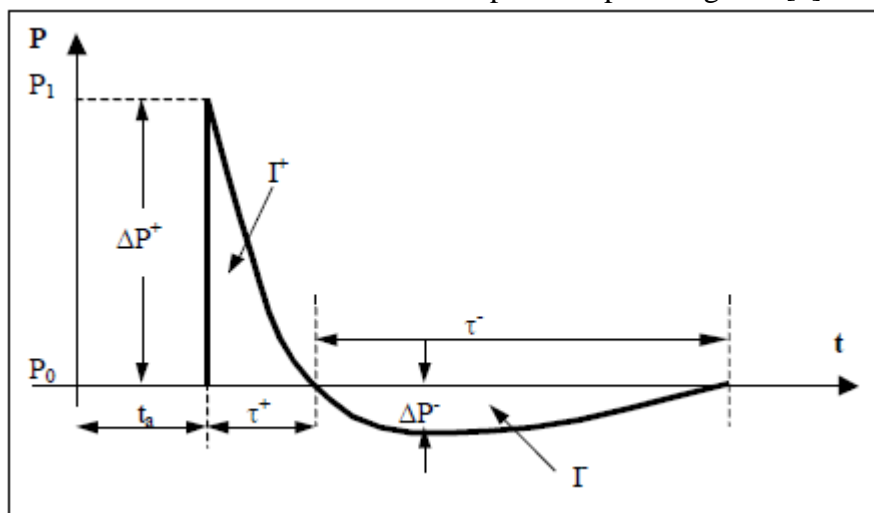


Figure 3: Profil d'onde de choc d'une détonation

Déflagration :

Dans le cas d'une déflagration, le volume de mélange air-gaz est généralement vaste, et le taux de libération de l'énergie est lent, ceci se produit parce que la réaction est plus lente que dans cas d'une détonation. Les souffles sont caractérisés par des ondes de choc plus régulières qui propagent à des vitesses subsoniques. Au début, les effets de pression sont petits. Puis, pendant que la turbulence est produite, la vitesse de combustion augmente, ce qui conduit à une augmentation de pression.

Le profil de l'onde de choc d'une déflagration est représenté par la figure 4

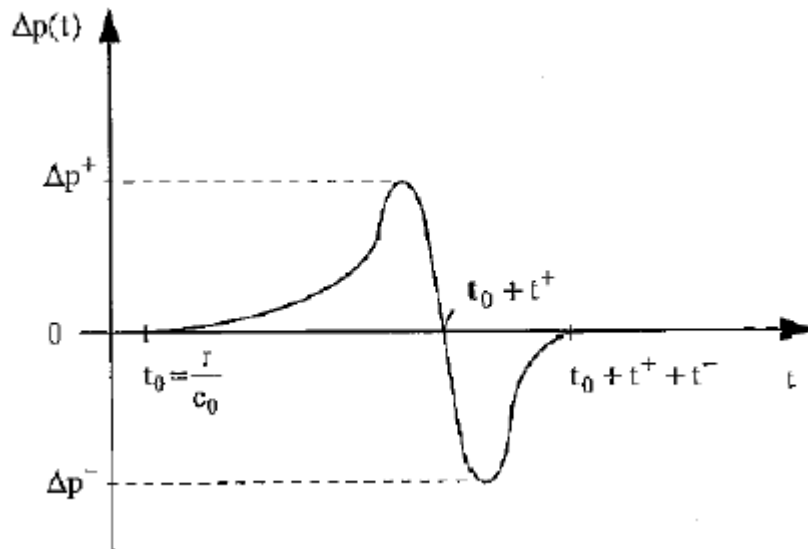


Figure 4: Profil d'une onde de choc d'une déflagration

6. Limites d'explosivité

La limite inférieure d'explosivité (LIE) :

La limite inférieure d'explosivité ou d'inflammabilité d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration minimale en volume dans le mélange au-dessus de laquelle il peut être enflammé.

Limite supérieure d'explosivité (LES):

Limite supérieure d'explosivité ou d'inflammabilité d'un gaz ou d'une vapeur dans l'air est la concentration maximale en volume dans le mélange au-dessous de laquelle il peut être enflammé.

La LIE et la LES peuvent être aussi exprimées en poids de vapeur par litre ou mètre cube de mélange.

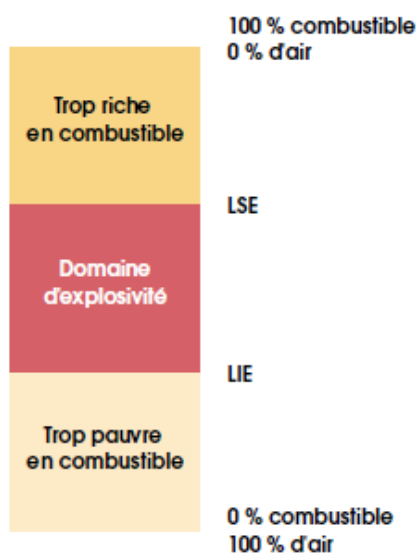


Figure 5: Domaine d'explosivité

Tableau 4: LIE et LSE de quelque gaz[7]

produit	LIE (%)	LES (%)
Acétone	2.6	12.8
Acétylène	2.5	100
Butane	1.8	8.4
Méthane	5	15
Pentane	1.5	7.8
Propane	2.1	9.5

7. La dispersion atmosphérique

Les défaillances d'équipement représentent la cause la plus importante qui entraîne la libération de produits dangereux et explosifs. La défaillance peut être :

- Perçage d'une paroi, défaillance d'un joint, défaillance d'une garniture.
- Eclatement d'un disque de rupture, ouverture d'une soupape.
- Brèche partielle ou totale d'une canalisation courte ou longue.
- Eclatement d'un réservoir.

Pour caractériser la dispersion atmosphérique d'une substance inflammable ou explosive, il est nécessaire de quantifier le rejet, c'est-à-dire de déterminer son volume ou sa masse, sa température, sa pression et son état physique.

Le rejet des gaz peut être classé en deux catégories :

7.1.Rejets continus

Ce terme correspond à une brèche sur la paroi d'un réservoir ou à un petit trou sur une canalisation de grand diamètre qui se comporte alors comme un réservoir.

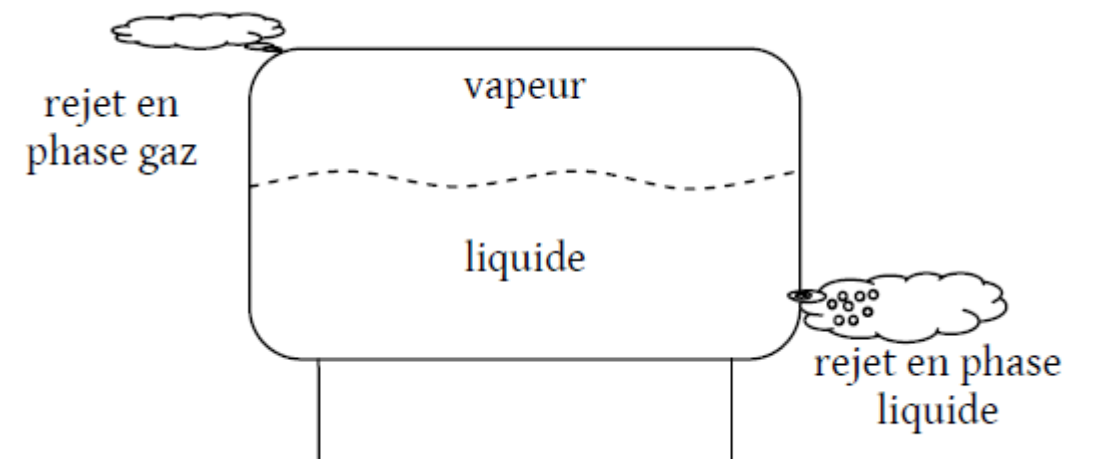


Figure 6: Rejet continu dans un réservoir

7.2.Les rejets instantanés

La ruine, encore appelée rupture catastrophique, consiste en la rupture totale du confinement entraînant un relâchement immédiat et instantané de la totalité du contenu. Les rejets de type instantané sont principalement caractérisés par la quantité émise dans l'atmosphère et la pression de la capacité au moment de la rupture. Cette dernière peut être différente dans certains cas de la pression de stockage.

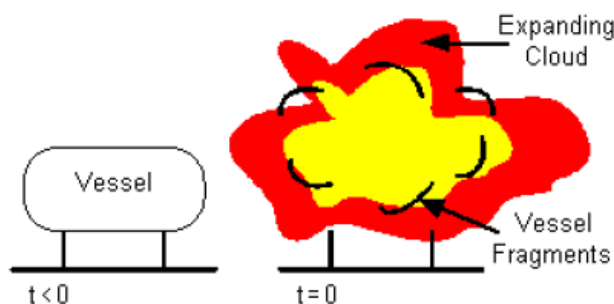


Figure 7: Rejet en continu

La dispersion atmosphérique caractérise la répartition, dans le temps et l'espace, d'un ensemble des particules rejetées dans l'atmosphère. Elle caractérise donc la façon dont le nuage est transporté et dilué.

La dispersion du nuage dépend de :

1. Conditions climatologiques.
2. L'environnement de rejet.

7.3. Les conditions climatologiques

Les conséquences d'un accident dépendent, pour la plupart des phénomènes physiques et notamment dans le cas des dispersions des explosifs, des conditions météorologiques ou turbulence atmosphérique. Ces conditions sont principalement définies en termes de classes de stabilité atmosphérique, de vitesse et direction du vent.

La stabilité atmosphérique est souvent décrite à l'aide des classes de stabilité de Pasquill. On distingue 6 classes allant des atmosphères très instables (A,B), aux atmosphères très stables (E,F), en passant par des atmosphères neutres (C,D).

Les classes de stabilité peuvent être associées à des conditions météorologiques données.

Tableau 5: Les classes de stabilité climatologique

Vitesse du vent à 10 m	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
[m/s]	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 7/8	<3/8
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

7.4. Environnement de rejet

Les obstacles et les accidents topographiques perturbent la trajectoire du vent et modifient les caractéristiques moyennes et turbulentes de l'écoulement de l'air. Ces modifications sont, naturellement, en fonction de la taille et la forme des obstacles topographiques rencontrés par le vent.

8. Modélisation des effets d'explosion

Les effets d'une explosion sont caractérisés principalement par une onde de pression de forte intensité mais de courte durée, qui se propage dans l'environnement et balaye tout sur son passage. L'onde peut avoir des effets directs sur les individus et indirects lors de l'effondrement des structures.

Les effets d'une explosion sont désastreux, en particulier dans le cas d'un équipement dans un site industriel, ce qui conduit à l'amplification des phénomènes initiateurs par effet domino.

Dans le cadre du développement de la sécurité industrielle, il est apparu très tôt la nécessité de caractériser les effets des explosions malgré leur complexité apparente.

La modélisation des effets des surpressions d'une explosion, se fait par plusieurs méthode de calcul telle que :

- La méthode « Equivalent TNT »
- La méthode « Multi-Energie »
- La méthode de « Baker-Strehlow »
- La méthode « CAM » (Congestion Assesment Method).

8.1.Méthode TNT

Cette méthode est la première méthode utilisée dans le monde pour prévoir et estimer les conséquences de tout type d'explosion accidentelle. Elle repose sur l'hypothèse de la possibilité de reproduire le champ de surpression engendré par l'explosion d'un gaz, en faisant exploser du TNT. L'équivalent TNT d'un mélange explosible correspond à la masse de TNT qui peut produire le même champ de surpression engendré par l'explosion d'un kilogramme de mélange explosible.

L'équivalent TNT peut être calculé par la relation :

$$M_{TNT} = a \frac{E_{gaz}}{E_{TNT}}$$

Tel que :

E_{gaz} : L'énergie libérée après la combustion de gaz

E_{TNT} : L'énergie libérée par l'explosion d'un kilogramme de TNT

a : Rendement de l'explosion de gaz.

Le rendement « a » est déterminé à partir de l'analyse statistique des accidents passés. Ces analyses ont été réalisées avec l'objectif de déterminer la valeur de « a » correspondant :

- A une valeur de plus grand vraisemblance statistique.
- A une valeur plus au moins maximale (majorant)

Il est noté que la valeur du rendement « a » varie selon la réactivité de combustible.

Résultats de l'analyse

Si la totalité de combustible susceptible de former le nuage retenue, il est recommandé des rendements de l'ordre de 1 à 15%.

En 1984, Lannoy a analysé 23 accidents pour estimer le rendement, il est ressorti de ses analyses que [7]:

- Le rendement moyen d'une explosion est de 4%, et la probabilité qu'il soit inférieur ou égal 4% est : 0,6.
- Si le rendement est 10%, la probabilité qu'il soit inférieur ou égal à 10 est : 0,97.

Chapitre 2 : Généralité sur la modélisation des effets de surpression d'un VCE

Après ces analyses, Lannoy a proposé de retenir « $a = 10\%$ » pour une étude de sécurité (la probabilité de 0,97 peut représenter aussi un niveau de confiance).

Par ailleurs, le rapport $\frac{E_{gaz}}{E_{TNT}}$ pour un kilogramme de gaz est toujours au voisinage de 0.1, si le gaz considéré est un hydrocarbure.

Après le calcul de la masse, on cherche la valeur de la surpression à partir de l'abaque de TNT :

$$\Delta P(bar) = f(\lambda = R/\sqrt[3]{M})$$

Tel que :

λ : La distance réduite

R : La distance au centre de l'explosion.

M : Masse de combustible

L'abaque de la méthode « Equivalent TNT » (Annexe 1).

8.2. La méthode Multi-Energie

La méthode Multi-énergie a été développée au sein de l'organisme néerlandais TNO Prins Maurits Laboratory en particulier par Van Den Berg en 1984. Elle consiste à évaluer les caractéristiques de l'onde de surpression générée par un VCE. Elle est basée sur des observations des essais qui ont montré que:

- la combustion d'un nuage inflammable dans l'air libre ne génère des effets de pression importants que si l'accélération de la flamme est suffisante
- une déflagration produisait de fortes surpressions dans les parties du nuage de gaz qui contenaient des obstacles et/ou des espaces partiellement encombrés.

Ces deux observations sont en fait liées, car la vitesse de la flamme est d'autant plus grande que les obstacles sont nombreux. Il semble qu'en fonction de l'encombrement les zones couvertes par le nuage de gaz contribueront de manières différentes au phénomène de l'explosion. La méthode est basée ce principe et considère l'explosion comme un ensemble des explosions élémentaires dans différentes zones de nuage explosif.

La méthode multi-énergie s'intéresse seulement par les effets de surpression associés à une explosion et ne traite pas les effets thermiques.

La méthode multi-énergie permet d'évaluer la décroissance de la pression à l'extérieur du nuage inflammable. La démarche de cette méthode s'articule sur quatre étapes :

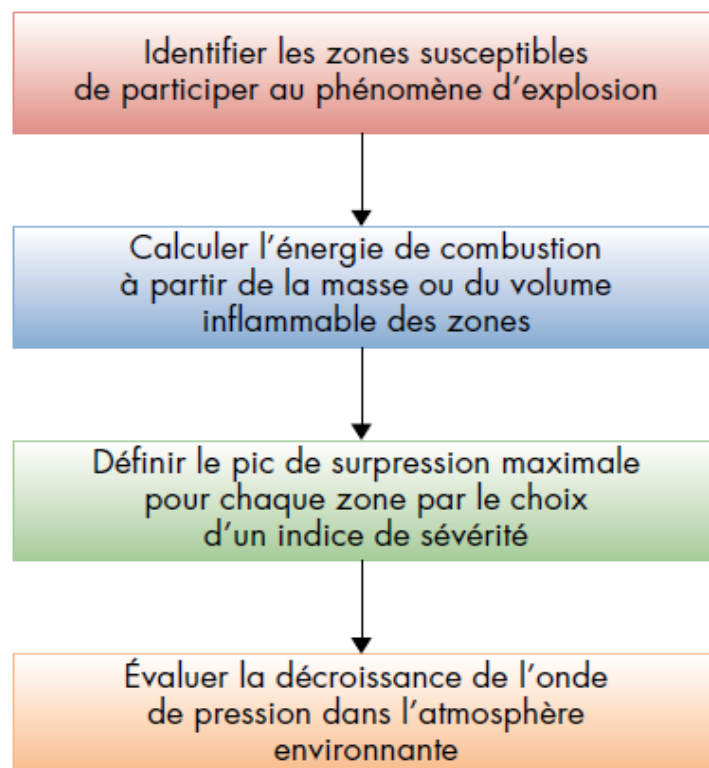


Figure 8: La démarche de la méthode Multi-Energie [8]

La démarche de la méthode nécessite une étude de la dispersion atmosphérique afin de déterminer l'extension du nuage inflammable pour déterminer:

- Les zones atteintes par ce nuage.
- Leur niveau de remplissage (partiel ou total).

Indice de sévérité :

L'utilisation de la méthode revient à choisir un indice de sévérité compris entre 1 et 10. Chaque indice à un niveau de surpression maximale. Le tableau suivant présente les indices et les niveaux correspondants :

Tableau 6: Correspondance entre indices de sévérité et surpressions maximales

Indice de la méthode (-)	Surpression maximale correspondante	
	(kPa)	(mbar)
1	1	10
2	2	20
3	5	50
4	10	100
5	20	200
6	50	500
7	100	1000
8	200	2000
9	500	5000
10	2000	20000

Au cours du temps, différentes recommandations ont été proposées pour les choix d'indice mais les recommandations les plus largement employées sont probablement celles proposées :

- Par l'auteur de la méthode (V.D. Berg, 1984),
- Par Kinsella (Kinsella, 1993),
- Par TNO, 1997
- Par projet GAME

8.2.1. Choix de l'indice selon (V.D. Berg, 1984)

En 1984, V. d. Berg a proposé de choisir l'indice de sévérité d'après l'arbre de décision présenté dans la figure suivante :

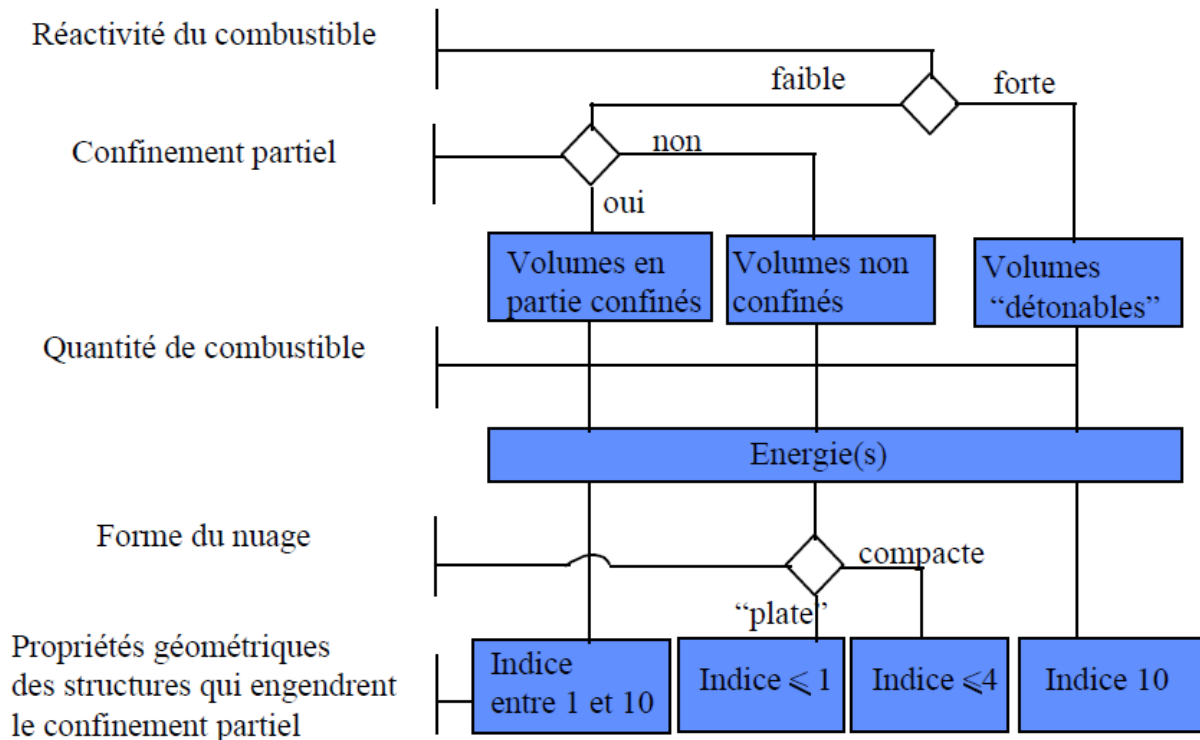


Figure 9: Arbre de décision pour le choix d'un indice Multi-Energie

Le confinement est considéré partiel, si la géométrie est axiale ou radiale. Les installations de l'industrie chimique et pétrolière sont considérées comme des installations à confinement partiel.

V.D. Berg considère deux types de dispersion de nuage :

1. Nuage plat :

Si le rapport entre la largeur et la hauteur de nuage est très supérieur à 1.

2. Nuage compacte :

Ils sont les nuages d'aspect sphérique ou hémisphérique qui permettent une longueur de parcours de flamme identique, dans toutes les directions à partir d'un point d'inflammation central.

8.2.2. Selon (Kinsella, 1993)

Kinsella a basé sur l'analyse des accidents majeurs passés, et il a proposé de déterminer l'indice de sévérité d'une explosion en fonction de :

- L'énergie d'inflammation,
- Le degré d'encombrement dû aux obstacles solides,
- Le degré de confinement.

Le tableau 7 établi par Kinsella, représente un guide pour le choix de l'indice de sévérité :

Tableau 7: Choix de l'indice de violence d'explosion selon (Kinsella, 1993)

Energie d'inflammation		Le degré d'encombrement			Le degré de confinement		Indice
faible	forte	fort	faible	inexistant	existant	inexistant	
	×	×			×		7 - 10
	×	×				×	7 - 10
×		×			×		5 - 7
	×		×		×		5 - 7
	×		×			×	4 - 6
	×			×	×		4 - 6
×		×				×	4 - 5
	×			×		×	4 - 5
×			×		×		3 - 5
×			×			×	2 - 3
×				×	×		1 - 2
×				×		×	1

Dans le tableau précédent :

- a. L'énergie de l'inflammation est :
 - Forte : lorsque la source d'inflammation est une explosion confinée.
 - Faible : lorsque la source d'inflammation se limite aux sources courantes (étincelles, surfaces chaudes, ...).
- b. Degré d'encombrement :
 - Fort : lorsque le volume des obstacles représente au moins 30 % de volume total de nuage et l'espace entre les obstacles est inférieur à 3 m.
 - Faible : les obstacles existent mais les conditions précédentes ne sont pas simultanément satisfaites.
 - Inexistant : lorsqu'il n'y a aucun obstacle dans le nuage.
- c. Degré de confinement :
 - Existe : si le nuage est confiné par de surfaces solides 2 à 3 faces.
 - Inexistant : si la seule surface à considérer est le sol.

Le tableau précédent ne prend pas en considération la réactivité de combustible, ce qui conduit à des sous-estimations très importantes de niveau de surpression.

8.2.3. Selon TNO (1997)

Le TNO propose de choisir les indices de méthodes Multi-Energie selon les recommandations suivantes[9] :

- L'indice 10 est associé à tous les volumes correspondant à des zones encombrées d'obstacles.
- L'indice 1 est associé aux zones non encombrées, et le nuage est en état de repos sur le plan dynamique (évaporation).
- L'indice 3 est associé aux zones non encombrées mais le nuage est caractérisé par une turbulence importante.

Quelques données ont été obtenues par des expériences d'explosion est l'analyse des accidents passés. La méthode utilise les relations suivantes[10] :

La surpression réduite :

$$P' = \frac{P_s}{P_0}$$

La distance réduite :

$$R' = \frac{Z}{\left(E_{exp}/P_0\right)^{1/3}}$$

Tel que :

Z : Distance du centre de l'explosion.

E_{exp} : L'énergie totale de l'explosion.

P_0 : Pression atmosphérique.

8.2.4. Projet GAME 1998

Le projet GAME (Guidance for the Application of the *Multi Energy* method, Eggen, 1998) a tiré des corrélations concernant la surpression d'une explosion de le VCE pour deux modes de propagation.

Pour le mode sphérique[11] :

$$P_{\max} = 0.84 \left(\frac{VBR \cdot L_P}{D} \right)^{2.75} S_L^{2.7} D^{0.7}$$

Pour le mode radial :

$$P_{\max} = 3.38 \left(\frac{VBR \cdot L_P}{D} \right)^{2.25} S_L^{2.7} D^{0.7}$$

Telle que :

VBR : blocage ratio des zones encombrées dans le nuage

D : diamètre représentative ou caractéristique des zones encombrées

L_P : longueur de la trajectoire de la flamme.

S_L : vitesse de combustion laminaire du nuage.

P_{max} : la surpression maximale à la source de l'explosion, elle est utilisée pour déterminer la courbe d'estimation des effets de surpression.

L'abaque de la méthode Multi-Energie (annexe 2)

8.3. Baker-Sterhlow

La méthode « Baker-Sterhlow » et la méthode Multi-Energie ont plusieurs points communs. Les conséquences d'une explosion dépendent de l'énergie potentielle de nuage inflammable et la présence des obstacles dans le champ de propagation de flamme.

Tout d'abord, il faut qualifier la violence de l'explosion en estimant l'ordre de grandeur de la vitesse de propagation de flamme.

Les courbes de décroissances des surpressions ont été établies à partir des résultats obtenus par Sterhlow (1979), à l'aide d'un code numérique de simulation de la propagation des ondes de pression (Sterhlow (1979) et (Baker (1983))).

Les simulations ont été réalisées, en supposant :

- Un nuage sphérique disposé dans un espace infini.
- La source de l'inflammation se situe au centre de nuage.
- Une vitesse constante de propagation de flamme comprise entre 10 et 1800 m/s selon les simulations.

D'après les résultats de simulations numériques, Sterhlow a conclu que les surpressions engendrées par une explosion sphérique à vitesse variable, sont inférieures ou égales à celles engendrées par une explosion sphériques à vitesse constante.

Estimation de la vitesse et la surpression maximale :

L'estimation de la vitesse de propagation peut être obtenue en considérant (selon Baker) :

- La réactivité de combustible.
- Densité des obstacles.
- Mode de propagation.

Baker a classé les combustibles en 3 classes :

1. Combustibles à forte réactivité :

Il existe 4 combustibles : hydrogène, acétylène, oxyde d'éthylène et propylène.

2. Combustibles à faible réactivité :

Ils sont le méthane et monoxyde de carbone.

3. Combustibles à moyenne réactivité :

Tous les autres gaz inflammable sont considérés comme des combustibles à moyenne réactivité.

En cas de mélange des combustibles, la classe retenue est celle de combustible le plus réactif dès que ce dernier représente au moins 2 % de mélange.

La densité des obstacles est définie à partir de nombre de rangés et la valeur de « *BR (Blockage Ratio)* », qui représente le rapport entre l'aire occupée par les obstacles et l'aire totale occupée par le nuage gazeux.

- Si $BR < 10\%$ et le nombre des rangés est inférieur ou égal à 2, la densité des obstacles est **faible**.
- Si $BR > 40\%$ et le nombre des rangés est supérieur ou égal à 3, la densité des obstacles est **forte**.
- La densité moyenne est retenue dans tous les autres cas.

Degré de confinement :

Lorsque la classe de réactivité, densité des obstacles et degré de confinement, la vitesse de propagation de flamme et la surpression maximale sont obtenues à partir de tableau 8 :

Tableau 8: Détermination de la surpression maximale pour la méthode Baker-Sterhlow

Degrés de confinement 1D, soit un mode de propagation axial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach ²⁹)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	5,2	>1000	5,2	>1000	5,2	>1000
	moyenne	2,265	800	1,765	400	1,029	200
	faible	2,265	800	1,029	200	0,294	40
Degrés de confinement 2D, soit un mode de propagation radial des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	1,765	400	1,029	200	0,588	100
	moyenne	1,235	300	0,662	120	0,118	7
	faible	0,662	120	0,471	70	0,079	4
Degrés de confinement 3D, soit un mode de propagation sphérique des flammes							
		Densité d'obstacles					
		forte		moyenne		faible	
		(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)	(Mach)	(kPa)
réactivité	forte	0,588	100	0,153	15	0,071	4
	moyenne	0,206	20	0,1	7	0,037	1
	faible	0,147	15	0,1	7	0,037	1

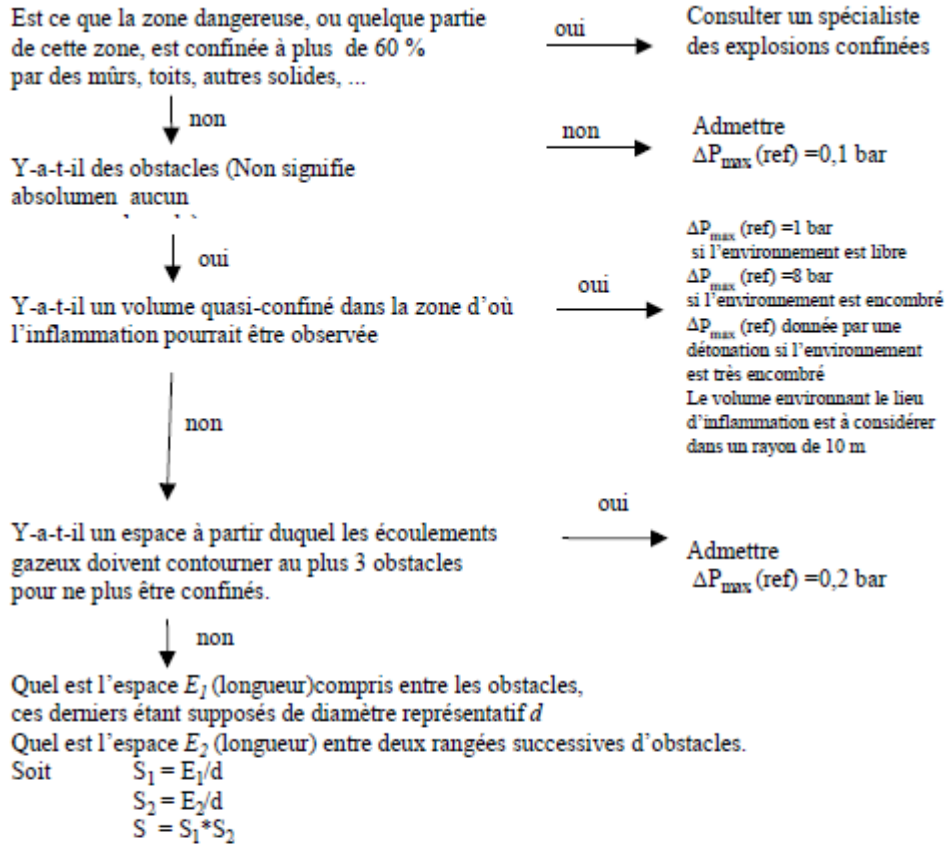
8.4.Méthode de CAM (Congestion Assessment Method)

Cette méthode a été proposée par SHELL, elle est similaire à la méthode Multi-Energie dans certains principes de base.

La méthode est basée sur trois étapes :

1. Elaboration d'un **arbre de décision** pour déterminer le niveau maximum de surpression.

L'arbre de décision ne conduit pas toujours à des évaluations quantitatives de la surpression maximale, mais dans certains cas, il recommande le conseil d'un spécialiste des explosions. Si une estimation quantitative est tirée de l'arbre, elle correspond à la surpression prévue dans le cas d'un combustible avec d'une réactivité similaire à celle de propane.



$\Delta P_{max}(ref)$ peut être estimée tel qu'indiqué ci-après :

S > 30	Nombre de rangées d'obstacles	4 - 5	6 - 7	8	> 8
	$\Delta P_{max}(ref)$	0,3	0,7	1	♣
7 < S < 30	Nombre de rangées d'obstacles	4 - 5	6	> 6	
	$\Delta P_{max}(ref)$	0,7	1	♣	
S < 7				♣	

♣ : Consulter un spécialiste des explosions de gaz

2. Correction le niveau de surpression maximale :

L'arbre de décision est suivi par une deuxième étape pour corriger les valeurs de surpression, en tenant en compte d'un facteur correctif qui dépend de la nature de de combustible, selon l'équation :

$$\Delta P_{max} = F \times \Delta P_{max}(ref)$$

Le tableau suivant représente le facteur de correction pour quelques combustibles courants :

Tableau 9: Facteur de correction pour quelques combustibles

Combustible gazeux (-)	Facteur de correction F (-)
méthane	0,6
toluène	0,7
pentane	1
cyclohexane	1
butane	1
propane	1
méthanol	1
acétone	1
benzène	1
éthanol	1,5
propylène	1,5
butadiène	2
éthylène	3

3. Calcul de décroissance des ondes :

Le calcul de décroissance des ondes de pression s'effectue en se référant à des abaques de décroissance (annexe 4).

Calcul analytique de la pression en un point [12]:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3V}{2\pi}}$$

$$r = R_0 + r'$$

$$\log_{10} P_1 = 0.08l^4 - 0.592l^3 + 1.63l^2 - 3.28l + 1.39$$

$$l = \log_{10} \frac{r}{R_0} + 0.02 \times P_0$$

Chapitre 2 : Généralité sur la modélisation des effets de surpression d'un VCE

Tel que :

R_0 : le rayon de nuage

r' : la distance entre le front de nuage et le point considéré

P_0 : la pression dans la source (pression maximale).

La pression au point récepteur est :

$$P = \min\left(\frac{R_0}{r} P_0, P_1\right)$$

9. Tableau comparatif

Tableau 10: Comparaison entre les méthodes d'évaluation des effets de surpression

Méthode	Avantages	Inconvénients
Equivalent TNT	La méthode peut traiter les types des explosions comme le BLEVE	Une très grande surestimation (détonation) de surpression au champ proche de centre de l'explosion, elle ne s'applique qu'après 5 fois de rayon de nuage La notion d'encombrement de site n'est prise en compte.
Multi-Energie (V.D.Berg, 1984)	Détermination de l'indice de sévérité issu d'une analyse de la situation (arbre de décision). L'ordre de grandeur des surpressions maximales calculées sont très crédibles au champ proche. Elle prend en considération la notion d'encombrement ou confinement et le mode de propagation de flamme.	L'estimation de degré de confinement n'est pas précise (soit fort soit faible)
Multi-Energie (Kinsella, 1993)	La détermination de l'indice de sévérité est plus précise que celle de V.D.Berg est de manière quantitative (elle a plus de détails (degré d'encombrement en plus)) Elle fait la différence selon l'énergie d'inflammation.	L'énergie de combustion de gaz ou sa réactivité ne sont prises en considération
Multi-Energie (TNO ; 1997)	Elle détermine un indice donnant une estimation très proche de celle de réalité aux champs proche ou loin. Elle prend en compte l'état dynamique de nuage (la turbulence) pour la détermination de l'indice de sévérité.	Sous-estimation des surpressions maximales dans le cas d'un combustible très fort comme l'hydrogène.

	La détermination des zones de l'encombrement est très détaillée (chaque zone a son propre degré d'encombrement).	
Baker-Sterhlow	La méthode prend en considération la réactivité du combustible. Elle donne une règle pour évaluer la réactivité d'un mélange des gaz. La densité des obstacles est calculée avec précision (BR). La prise en compte de mode de propagation.	D'après les simulations et la comparaison des résultats, il en déduit que la méthode donne des surpressions maximale avec sous-estimations
CAM	Détermination de l'indice de sévérité issu d'une analyse de la situation (arbre de décision). La réactivité de combustible est définie par un facteur caractérisant, elle n'est mentionnée d'une manière qualitative.	Le cas de l'hydrogène n'est pas traité à l'heure actuelle. La méthode demande en plusieurs cas l'opinion d'un expert des explosions.

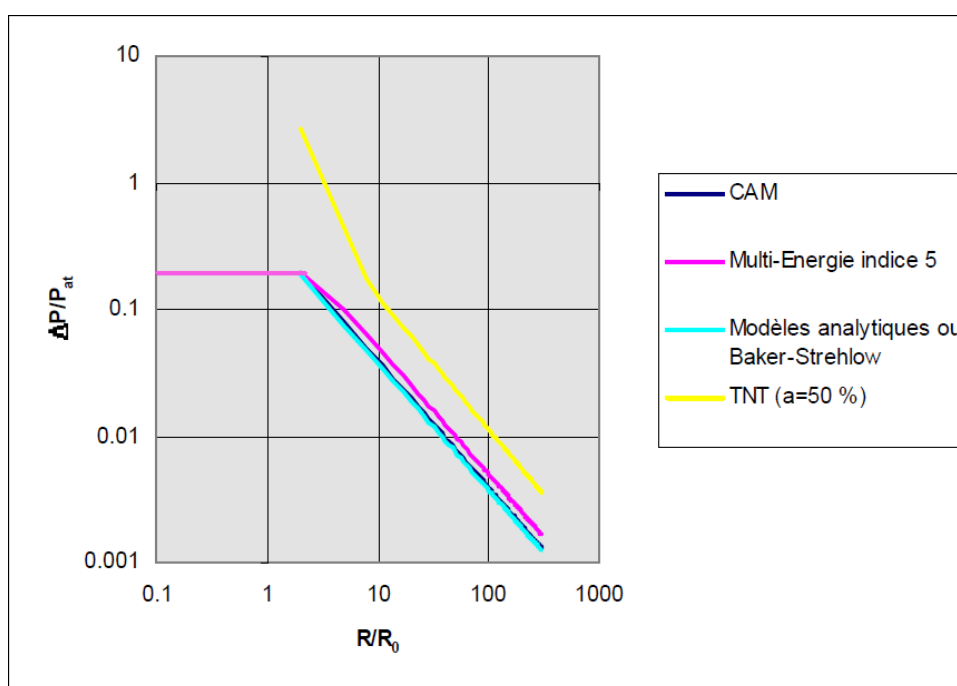


Figure 10 : Graphe comparative entre les quatre méthodes [7]

Conclusion

La comparaison théorique entre les méthodes de modélisation des effets de surpression, indique que les méthodes : Multi-Energie, Baker-Sterhlow et CAM ont plusieurs points communs, et ils sont plus fiables que la méthode « Equivalent TNT ».

Chapitre 3 : Modélisation des effets de suppression par logiciel PHAST, cas de Hassi R'mel

1. Présentation du champ de Hassi R'mel

1.1. Situation géographique

Hassi R'mel porte de désert, se trouve à 550 km au sud d'Alger, cette région est relativement plate du Sahara septentrional, l'altitude moyenne est d'environ 750 m. le climat est caractérisé par une faible pluviométrie (140 mm/an) et une humidité moyenne de 19 % en été et de 34 % en hiver. Les amplitudes thermiques sont importantes et les températures varient entre -5 °C en hiver, et +45 °C en été.

Les vents dominants sont de direction Nord avec une vitesse moyenne de 6 m/s[13].

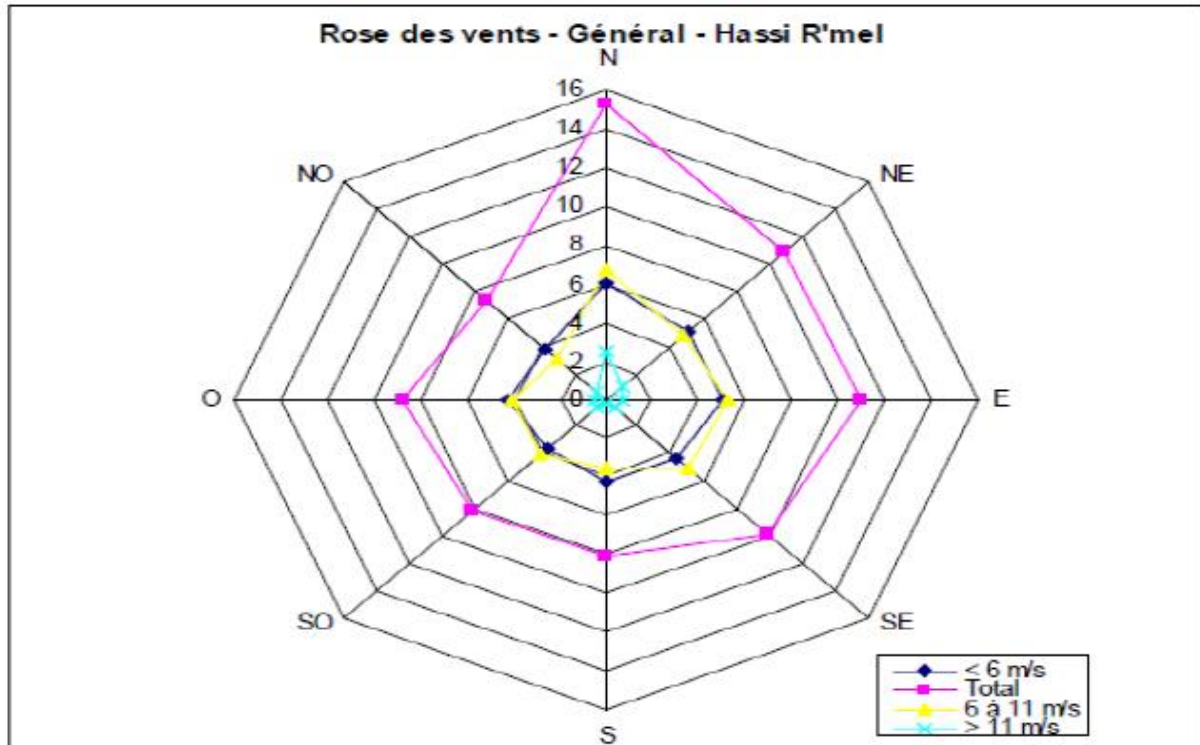


Figure 11: Rose de vent de Hassi R'mel

1.2. Organisation du champ

Il comporte trois zones d'exploitation (nord, centre, sud) entre lesquelles ont été intercalées deux zones de réinjection.

- **Zone nord** est constituée du Module 3 (MPP 3) et station de compression nord.
- **Zone centrale** est constituée des Module 0 (MPP0), 1 (MPP1) et 4 (MPP4), le Centre de Stockage et de Transfert des Fluides (CSTF), Station de Récupération des Gaz Associés (SRGA) et Centre Nationale de Distribution de Gaz (CNDG).
- **Zone sud** est constituée du Module 2 (MPP2), station de compression sud et module HRSUD.

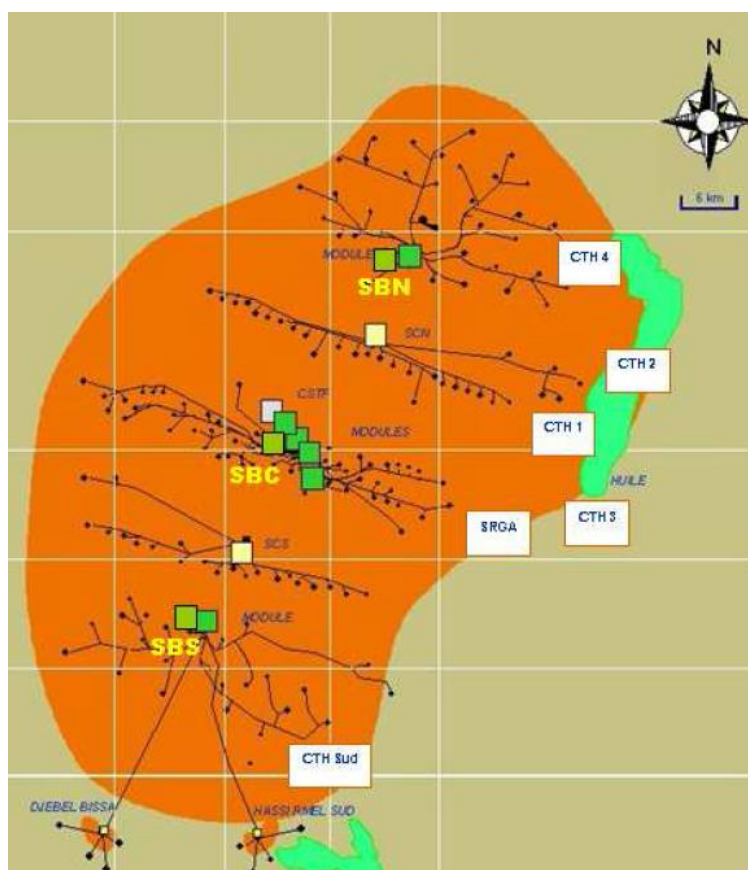


Figure 12: La carte de champ de Hassi R'mel

1.3. Module MPP4

L'usine MPP4 (Module Processing Plant 4) est un ensemble d'installations qui permettent de récupérer les hydrocarbures lourds (condensat et GPL) à partir du gaz brut, et de produire des gaz traités (gaz de vente ou de réinjection).

Au niveau de MPP4, on utilise le procédé HUDSON, le gaz brut en provenance des puits passe dans cinq collecteurs est réparti sur trois lignes (trains), chacune d'elle comporte les mêmes appareillages de processus avec même capacité de production.

La production est de :

- 60 millions m³/jour de gaz
- 2700 tonnes/jour de GPL
- 11800 tonnes/jour de condensat

1.4. Description du process

➤ Le gaz brut venant des puits à 107 et 60°C arrive du manifold des collecteurs est réparti en trois lignes de même capacité 20.10⁶ m³/J de gaz traité au niveau du diffuseur **D001** (chaque ligne se dirige vers un train).

➤ Le gaz brut de chaque train est refroidit dans l'aéro-réfrigérant **E101** à 40°C puis se dirige vers le séparateur d'admission **D101** où l'eau et les hydrocarbures liquides sont séparés du gaz par gravité, l'eau séparé se dirige vers le séparateur d'huile (SPI). L'eau vers le bassin d'évaporation et le condensât vers bournier

➤ D'autre part les hydrocarbures liquides (condensât) du **D101** se dirigent vers le séparateur riche au condensât **D105**.

➤ Le gaz du **D101** passe à travers les échangeurs (gaz / gaz) **E 102 / E 103** où il est refroidit jusqu'à - 70°C, ce gaz passe a travers une vanne de "JOULE THOMSON" **PRCV 108** ou il est détendu jusqu'à 100 bars pour arriver au niveau du séparateur final à haute pression **D 102** à -17 C⁰ (détente isentropique).

Remarque :

Pour éviter la formation d'hydrate dans les échangeurs (gaz / gaz) **E 102 / E 103** on injecte une solution de glycol dans les échangeurs de chaleur cote tube.

➤ Ayant absorbé de l'eau contenue dans le gaz brut, la solution de glycol se sépare du gaz dans le **D102**, le glycol hydraté est sortir et envoyer vers l'unité de régénération.

➤ Le gaz de **D102** subit une détente isentropique dans le turbo-expander **K101** jusqu'à 64bars à -37°C vers le séparateur a moyenne pression **D103**, le gaz froid de **D103** va refroidir le gaz brut entrant au niveau des échangeurs **E 102**.

➤ Il est comprimé par le compresseur entraîné par l'expander **K101** à 72 bars pour être envoyé dans le pipeline de gaz de vente.

➤ Les hydrocarbures liquides (condensats) de **D101** ou s'évaporent les constituants légers, ces hydrocarbures chauds alimentent la partie inférieur du dé-ethaniseur **C101** au niveau du 21^{ème} plateau.

➤ Les hydrocarbures liquides de **D102** et **D103** brut réunis et passent dans le séparateur **D104** (séparateur à basse pression), ou est récupéré le glycol non séparé dans le **D102** et **D103**.

➤ La charge froide de **D104** va alimenter la partie supérieure de dé-ethaniseur **C101**. Ces gaz s'écoulent vers la section de recomposition avec le gaz provenant du séparateur riche en condensateur **D105** (au niveau de la recomposition à **K01** à 72 bars et rejoignent la ligne du gaz de vente).

➤ La charge froide de **D104** alimente la partie supérieur du **C101** en 5^{ème} plateau passent à travers l'échangeur de reflux **E106** afin de condenser les gaz de tête **C101** partiellement.

➤ Les liquides de **D105** sont préchauffés dans l'échangeur d'alimentation **E104** par le condensât son tiré de fond du débutaniseur.

➤ Une solution de glycol est injecté à l'entrée du **E106** et est récupéré dans l'appendice de **D107**: on injecte aussi une solution de glycol dans la canalisation de reflux du **C101**, sa récupération s'effectue au niveau du **D106** (séparateur hydrocarbures / glycol), le chauffage des liquides de fond **C101** s'effectue à l'aide du rebouilleur **H101**.

➤ Le condensât non stabilisé se dirige ensuite vers le débutaniseur **C102** au niveau du 21^{ème} plateau, ou il y à séparation de GPL. Ce dernier est stabilisé dans le ballon **D108**, une

partie de GPL est utilisé pour assurer le reflux froid de débutaniseur, l'autre partie est envoyée vers la section d'expédition.

Le schéma de procédé de MPP4 est simplifié l'annexe n° 5

1.5.Présentation de CSTF

Le CSTF (Centre de Stockage et de Transfert des Fluides) a pour but de stocker le GPL et le condensat en provenance des modules de traitement de gaz MPP 0, 1, 2, 3, 4 et le centre de traitement de gaz Djebel Bissa, et de transférer ces deux produits vers le terminal d'ARZEW.

Le CSTF a une capacité totale de stockage de 78000 m³ de GPL et de 285000 m³ de Condensât.

Le Centre de Stockage et de Transfert Facilité CSTF dispose 12 Sphères (7170 m³ pour chaque sphère) de stockage de GPL et 07 Bacs de stockage du Condensât (3 bacs avec capacité de 35000 m³ et 4 bacs avec capacité de 45000 m³).

1.6.Sphère de GPL

Les caractéristiques des sphères sont reprises dans le tableau 11[14] :

Tableau 11: Caractéristiques de sphère de stockage de GPL

Caractéristiques	Valeurs
Type d'installation	Sphère de stockage
Substance	GPL
T service (°C)	20
T calcul (°C)	De -17 à 93.3
P service (bar)	5.34
P épreuve (bar)	9.6
Volume (m ³)	7170
Densité (kg/m ³)	536
Diamètre de la plus grande connexion (pouces)	14
Volume de la cuvette de rétention individuelle (m ³)	2958
Surface de la cuvette de rétention (m ²)	4225

Les sphères de stockage sont alimentées par une ligne de remplissage de 14'' et vidées par une ligne de vidange de 12'' calorifugées.

1.7. Ballon D108

Les caractéristiques du ballon sont reprises au tableau 12[14] :

Tableau 12: Caractéristiques de ballon de reflux de GPL (D108)

Caractéristiques	Valeurs
Type d'installation	Ballon de reflux (D108)
Substance	GPL
T service (°C)	35
T calcul (°C)	-28/93.3
P service (bar)	14.5
P calcul (bar)	16.5
P épreuve (bar)	28.8
Volume total (m ³)	50

La fonction du ballon de reflux D108 est de stabiliser le GPL en état saturé, pour diriger une grande partie de GPL vers l'expédition, la deuxième fonction est d'alimenter la tête du débutaniseur pour maintenir et contrôler la température.

2. Description de logiciel PHAST

PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un outil permettant de modéliser les conséquences et analyser les risques.

PHAST est une collection des applications :

- PHAST.
- PHAST Financial.
- PHAST Risk.
- PHAST Risk Financial.

PHAST est un logiciel utilisé pour évaluer les situations présentant des risques potentiels pour le personnel, les installations et l'environnement, et pour mesurer la gravité de ses situations. PHAST appartient à une gamme de produits développés par DNV Software, reconnu comme le leader mondial dans le domaine de l'évaluation de risques et des accidents industriels majeurs. Tout naturellement, il a été adopté par de nombreuses entreprises internationales de premier plan et par des gouvernements comme un précieux outil d'aide à la décision en matière de risque industriel et de sécurité publique.

PHAST examine le progression d'un incident potentiel de la fuite initiale à la dispersion en champ lointain, incluant la modélisation de l'épandage et de l'évaporation des flaques, ainsi que les effets de l'inflammabilité, l'explosion et la toxicité.

Pour le thème de notre étude, PHAST emploie trois méthodes pour l'évaluation des effets de surpression lors d'une explosion VCE :

- Méthode Equivalent TNT.
- Méthode Multi-Energie.
- Méthode de Baker-Strehlow.

Avantages : PHAST peut :

- Faciliter l'élaboration des études de danger.
- Faciliter les études pour la réduction des coûts en termes de pertes et d'assurances.
- Permettre l'optimisation de la conception du site et des procédés.
- Aider l'industrie à se conformer à la législation.

Pour la modélisation des conséquences:

- Il améliore la compréhension des dangers potentiels par les utilisateurs.
- Les mises à jour régulières du logiciel incorporent les expériences et les expertises les plus récentes dans l'industrie.

3. Résultats de la modélisation par logiciel PHAST

La modélisation de phénomène de VCE est faite pour deux scénarios :

- Une rupture catastrophique de l'équipement.
- Une fuite de de l'équipement (la brèche de la fuite est de 350 mm, cette valeur est retenue dans l'étude de danger de Hassi R'mel)

La modélisation nécessite les paramètres suivants :

- Le volume ou la masse de GPL contenu dans l'équipement.
- La pression de rupture de l'équipement.
- Direction et vitesse de vent (on utilisera la direction et la vitesse du vent dominant à Hassi R'mel).
- Pour la méthode Multi-Energie, nous allons introduire le nombre des zones encombrées dans le nuage gazeux et leurs degrés d'encombrement).
- Pour la méthode de Baker-Strehlow, nous allons introduire le mode de propagation (nombre des plans), degré d'encombrement et la réactivité de gaz.

Le rendement retenu dans la méthode « Equivalent TNT » et 10%.

Pour la méthode Multi-Energie, nous avons retenu trois zones d'encombrement, ce sont les trois trains de production de gaz, telle que l'indice de sévérité retenu pour les trois zones est « 7 », et pour les zones non encombrées, nous avons retenu l'indice « 2 ».

Pour la méthode de Baker-Sterhlow, nous avons considéré un mode sphérique (1 plan), pour la propagation de flamme, avec un encombrement moyen et réactivité de gaz moyenne.

3.1. Ballon de reflux de GPL (D108)

Les caractéristiques de ballon D108 sont mentionnées dans le tableau 12.

Pour la modélisation des effets de surpression, il faut d'abord simuler la dispersion de nuage gazeux.

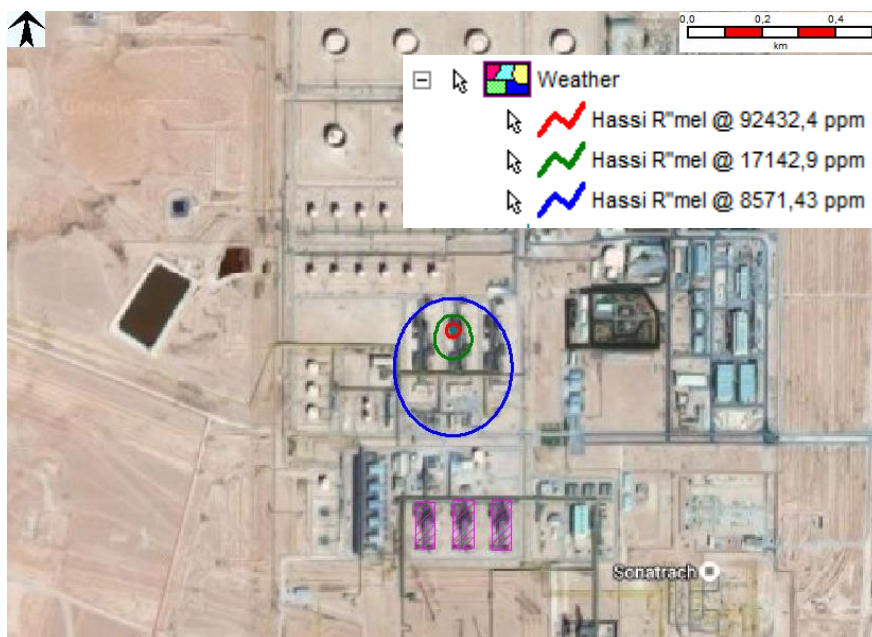


Figure 13: Dispersion de GPL lors de rupture catastrophique

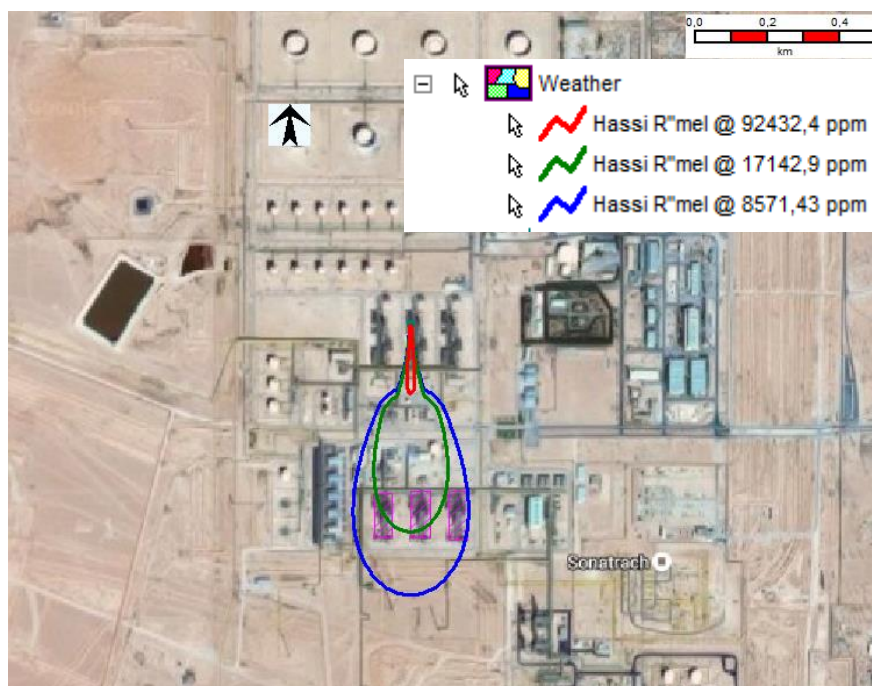


Figure 14: Dispersion de GPL lors d'une brèche

D'après les figures précédentes, on remarque que le nuage est plus épandu dans le cas d'une brèche, à cause temps nécessaire pour le vidange de l'équipement.

3.1.1. Modélisation par méthode Equivalent TNT

3.1.1.1. Modélisation de la rupture catastrophique

La courbe suivante représente la surpression lors d'une rupture catastrophique du ballon D108 :

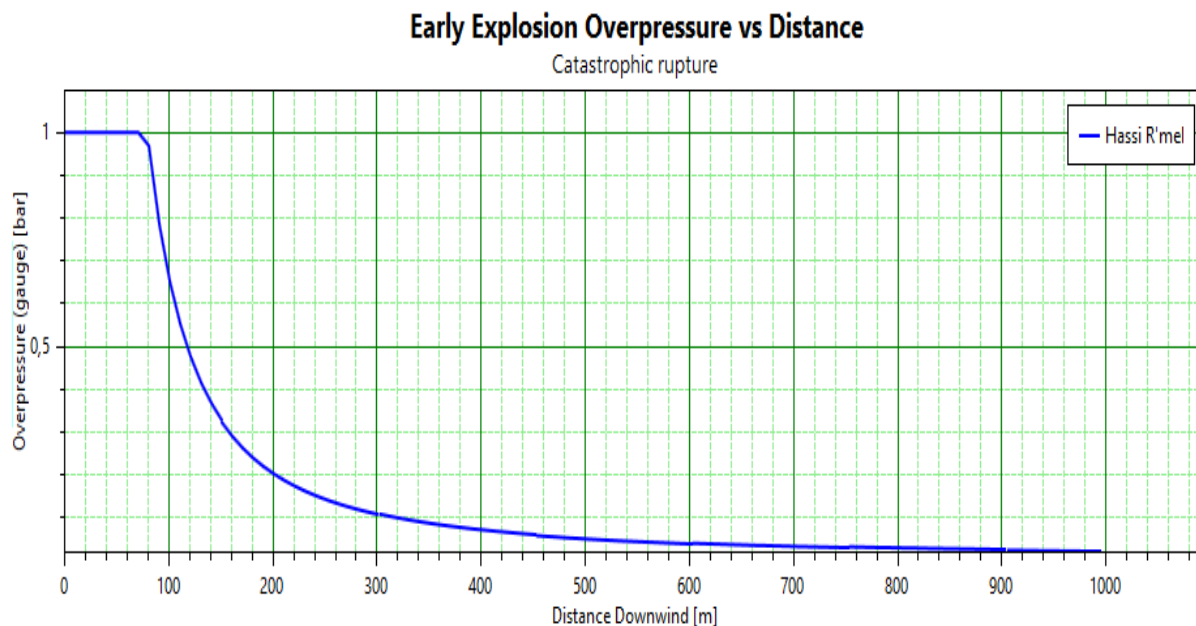


Figure 15: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique du ballon D108(TNT))

Pour la méthode Equivalent TNT, PHAST limite la surpression à 1 bar.

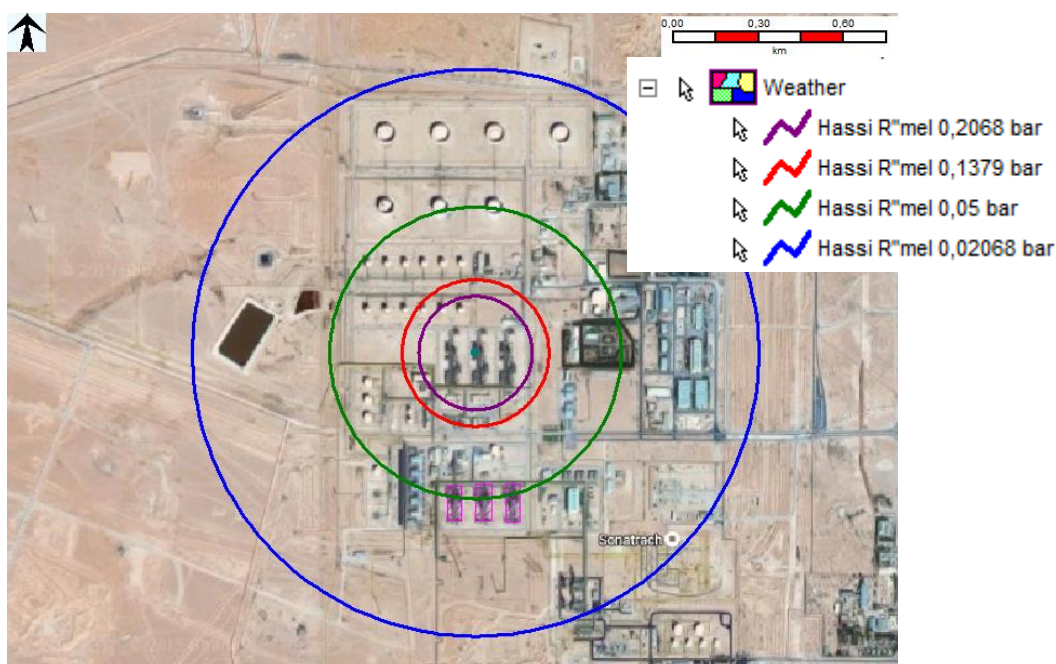


Figure 16: Illustration de surpression (rupture catastrophique du ballon D108 (TNT))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique de ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 13: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (TNT))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	205
137	257
50	528
20	1067

Dans le cas d'une rupture catastrophique, le logiciel PHAST considère que le centre de l'explosion est la position de l'équipement.

Interprétation :

La surpression est limitée à 1 bar par le logiciel, elle reste supérieure à 1 bar jusqu'à la distance de 70 m, elle commence à diminuer

3.1.1.2. Modélisation de la brèche

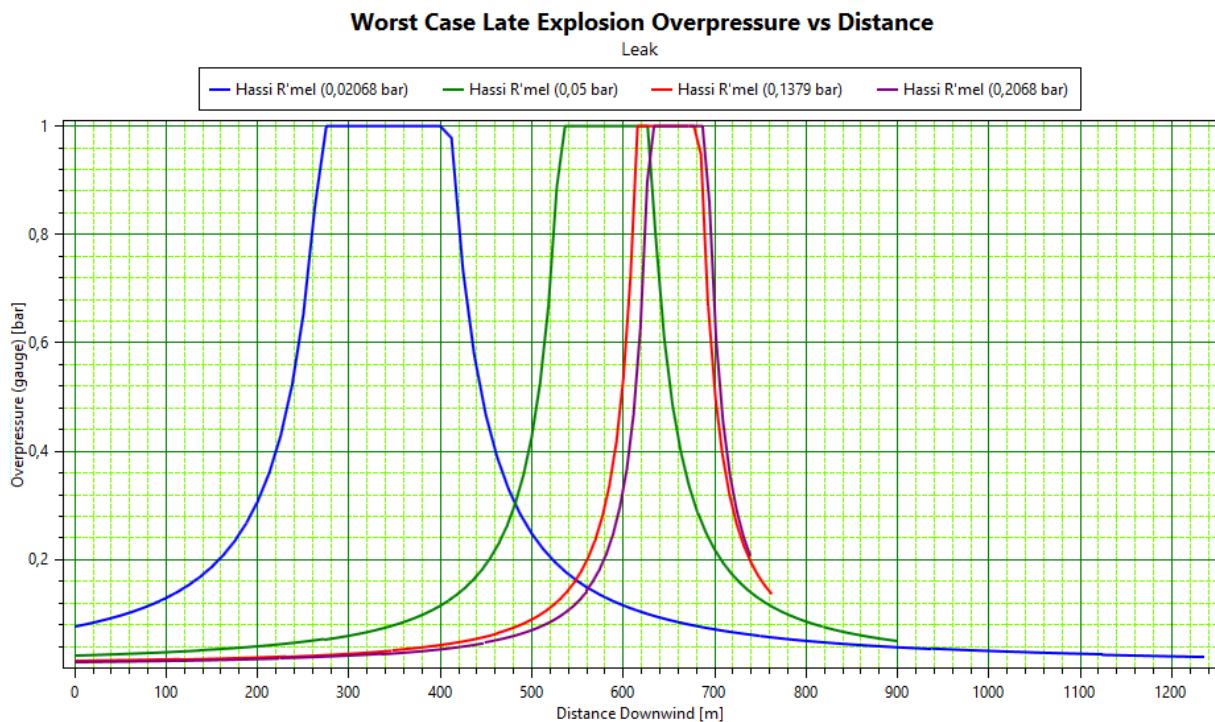


Figure 17 : La surpression en fonction de la distance (brèche sur le ballon D108 (TNT))

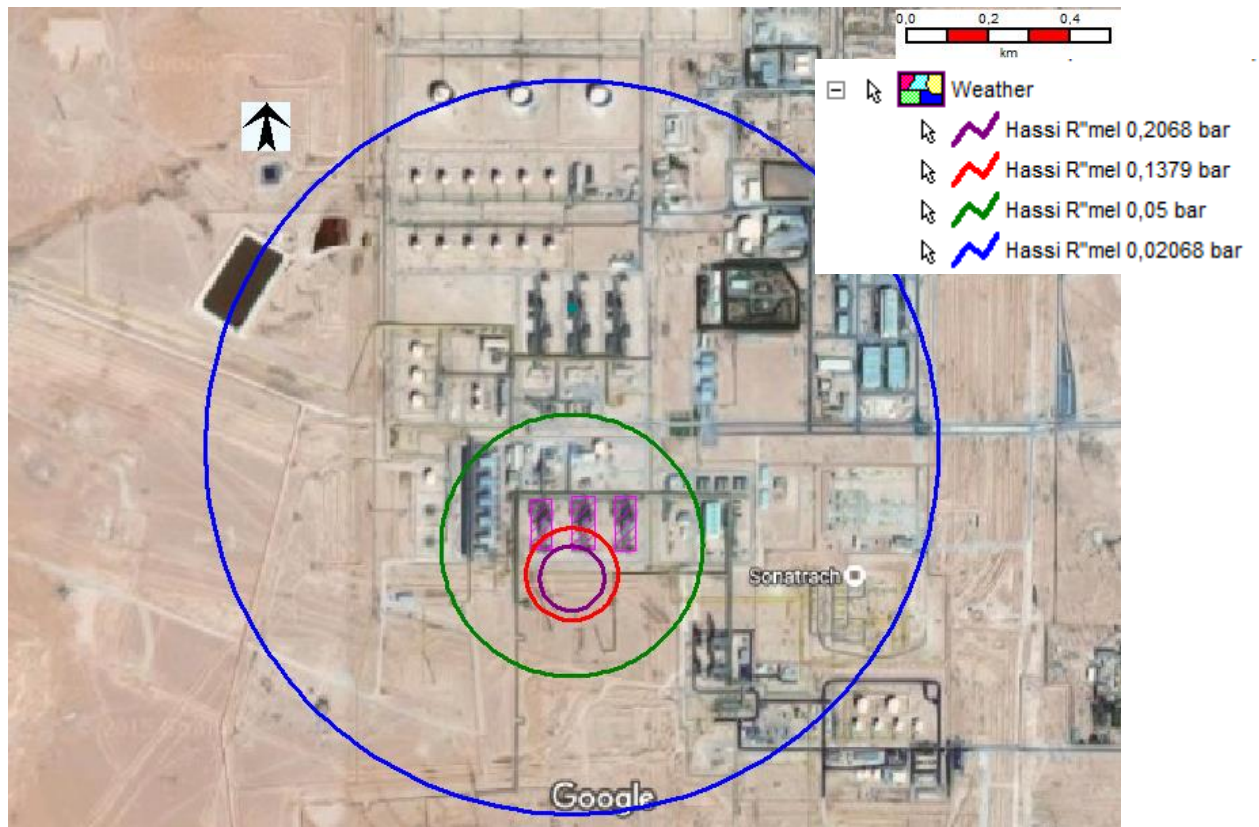


Figure 18: Illustration de surpression (brèche du ballon D108 (TNT))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur le ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 14: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (TNT))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	162
137	236
50	310
20	850

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle TNT se situe entre 400 et 420 m vers le sud de ballon D108.

D'après le graphe, la dispersion de nuage n'est pas régulière c-à-d le gradient de changement de la concentration autour de centre de l'explosion n'est pas constant en fonction de la distance

3.1.2. Modélisation par méthode Multi-Energie

3.1.2.1. Modélisation de la rupture catastrophique

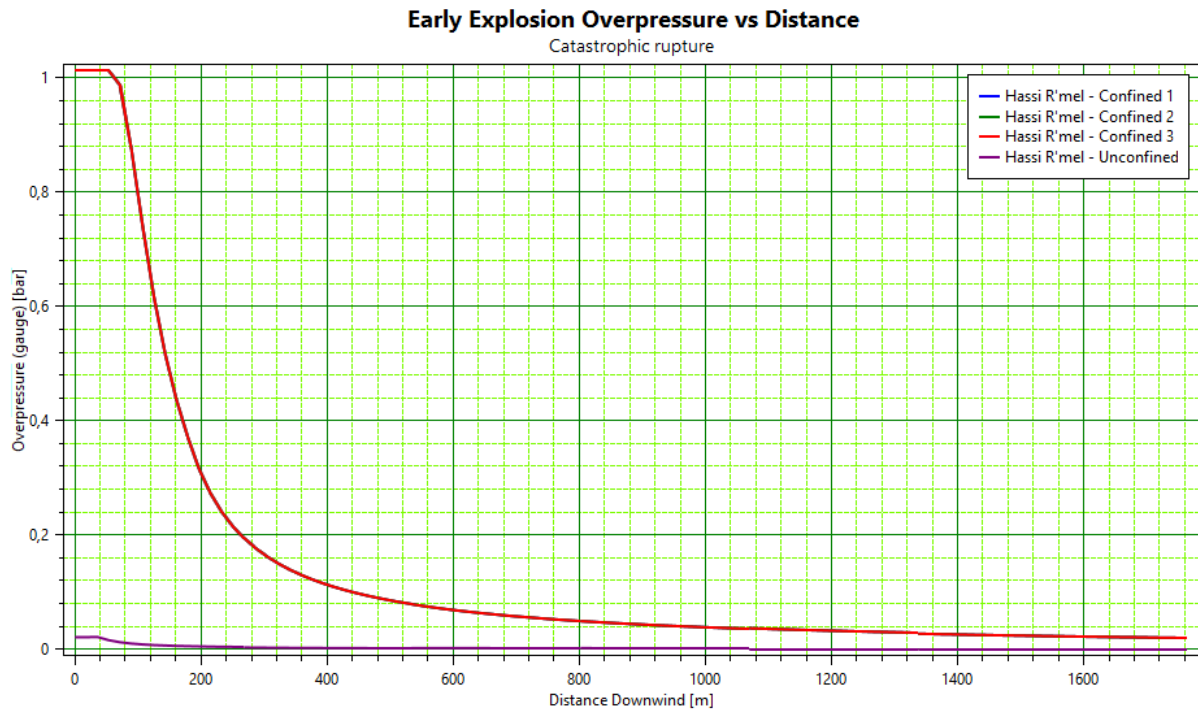


Figure 19: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))

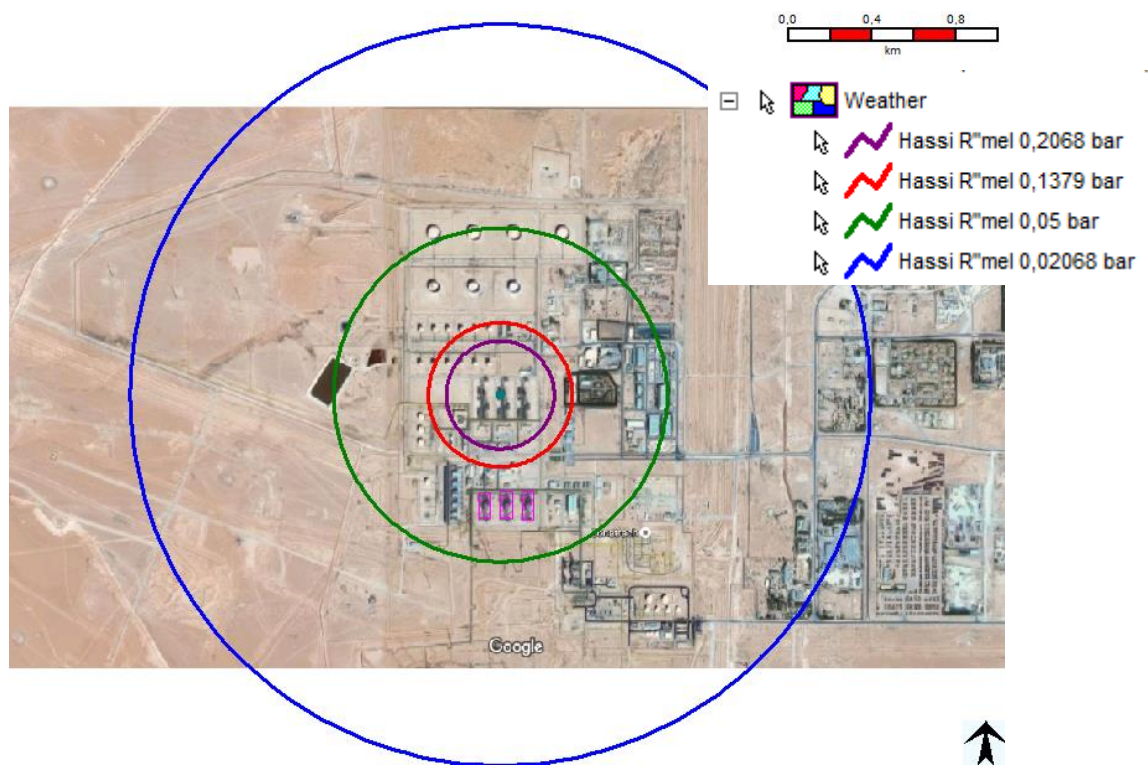


Figure 20: Illustration de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique de ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 15: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (ME))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	145
137	237
50	800
20	1670

3.1.2.2. Modélisation de la brèche

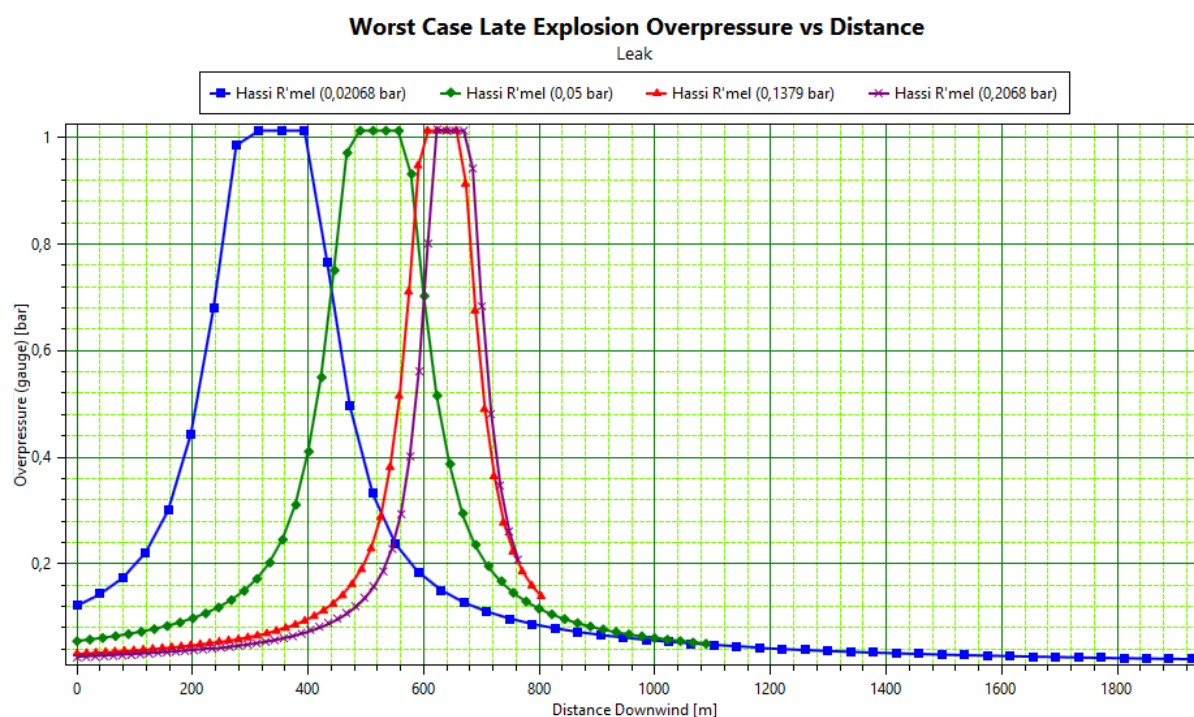


Figure 21: La surpression en fonction de la distance (brèche sur D108 (ME))

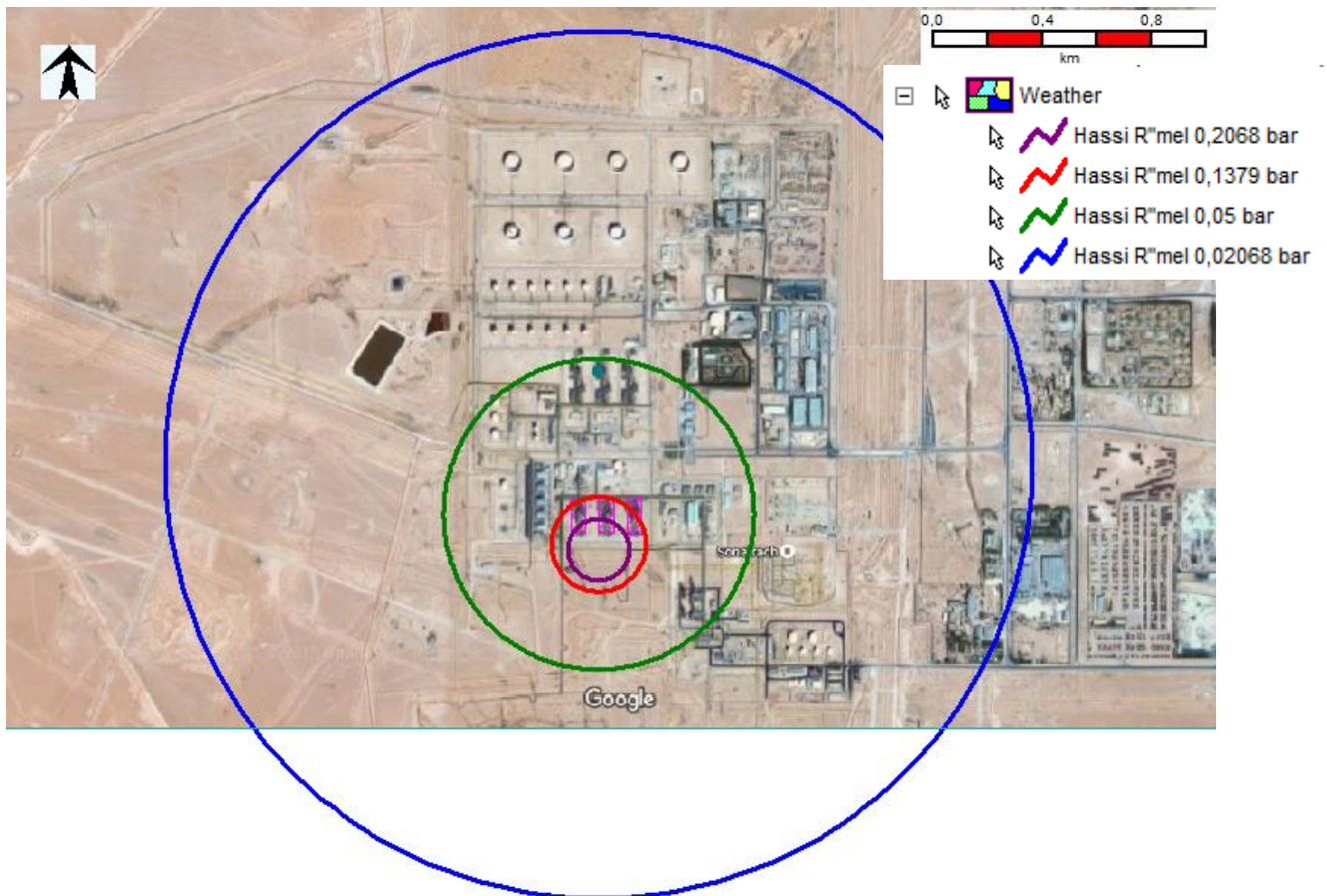


Figure 22: Illustration de surpression (brèche sur ballon (ME))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur le ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 16: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (ME))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	117
137	168
50	286
20	1450

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle Multi-Energie se situe entre 320 et 340 m vers le sud de ballon D108.

3.1.3. Modélisation par la méthode Baker-Sterhlow

3.1.3.1. Modélisation de la rupture catastrophique

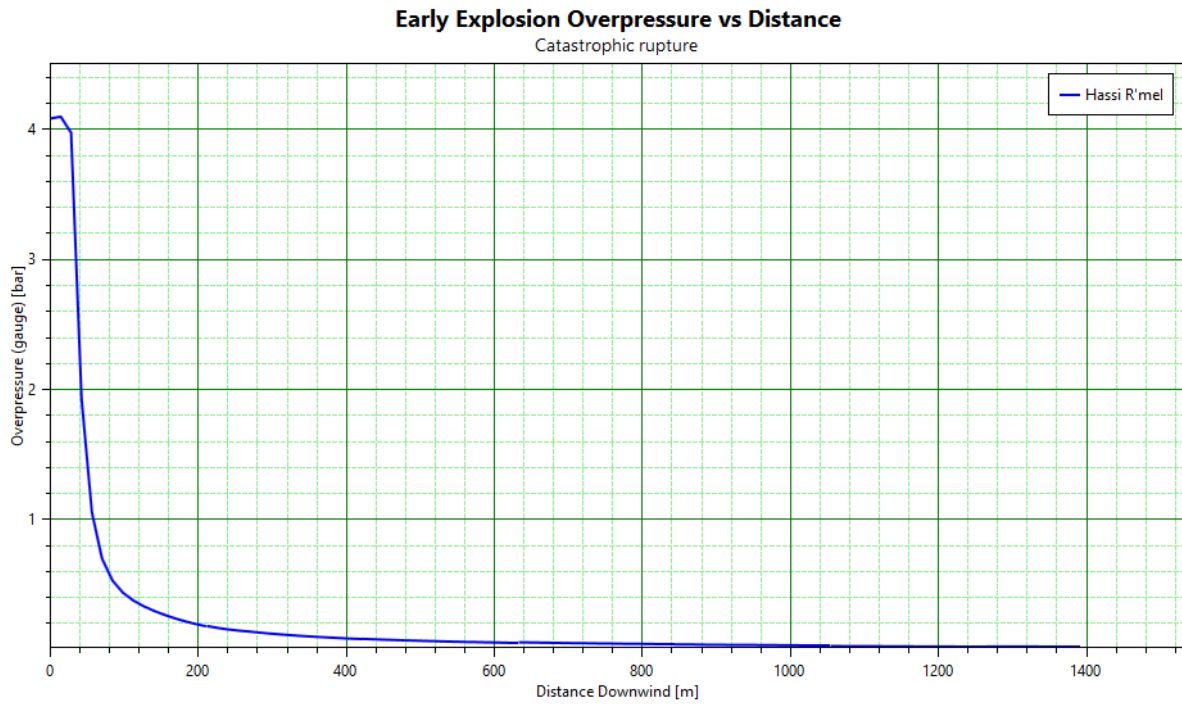


Figure 23: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de ballon (BS))

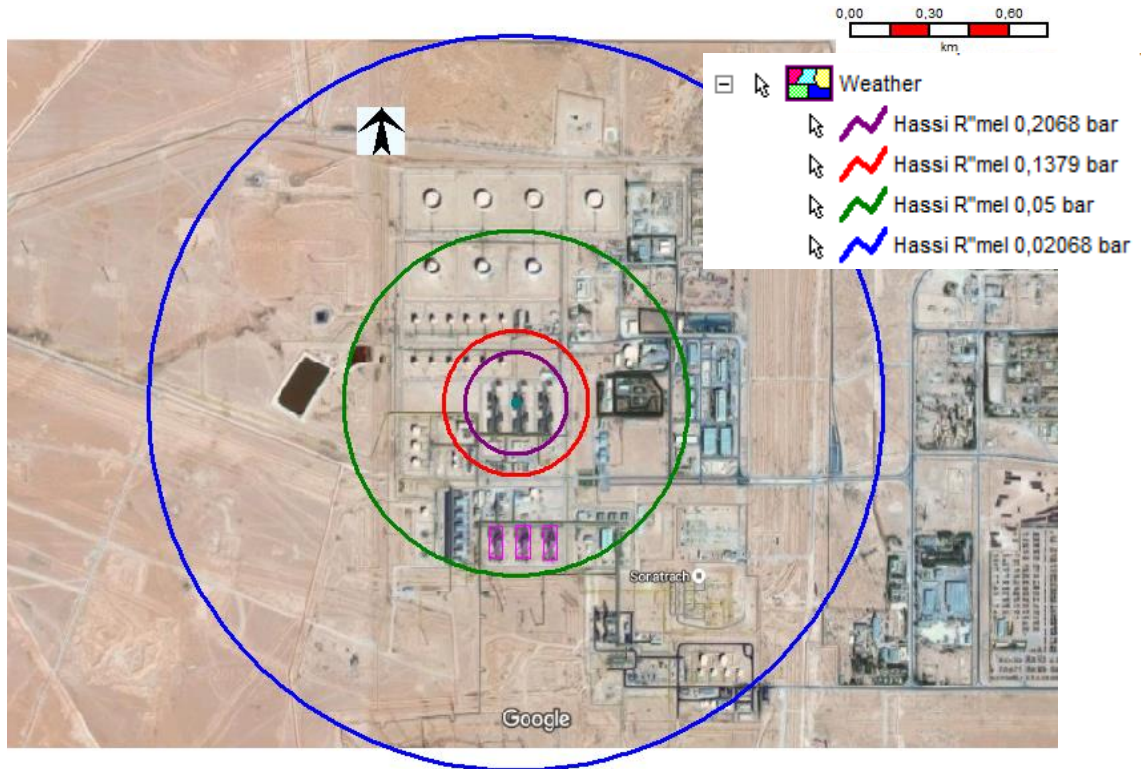


Figure 24: Illustration de surpression (rupture catastrophique de ballon (BS))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique de ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 17: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de ballon D108 (BS))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	186
137	265
50	650
20	1400

3.1.3.2. Modélisation de la brèche

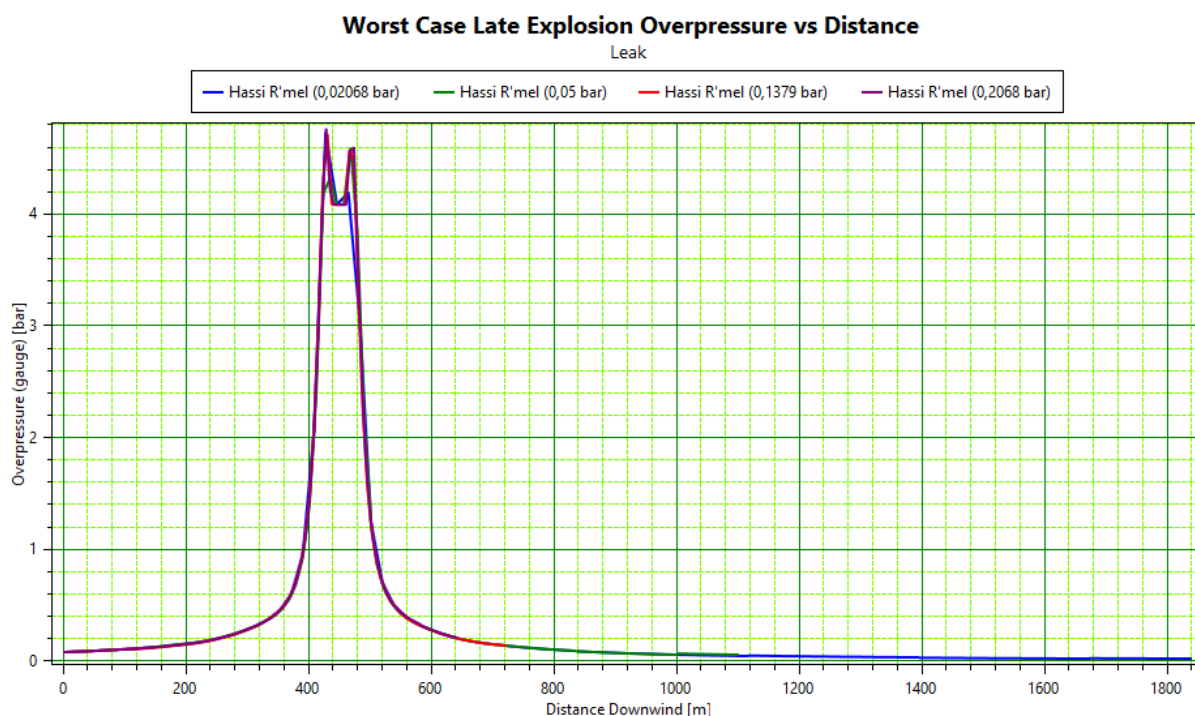


Figure 25: La surpression en fonction de la distance (brèche sur le ballon (BS))

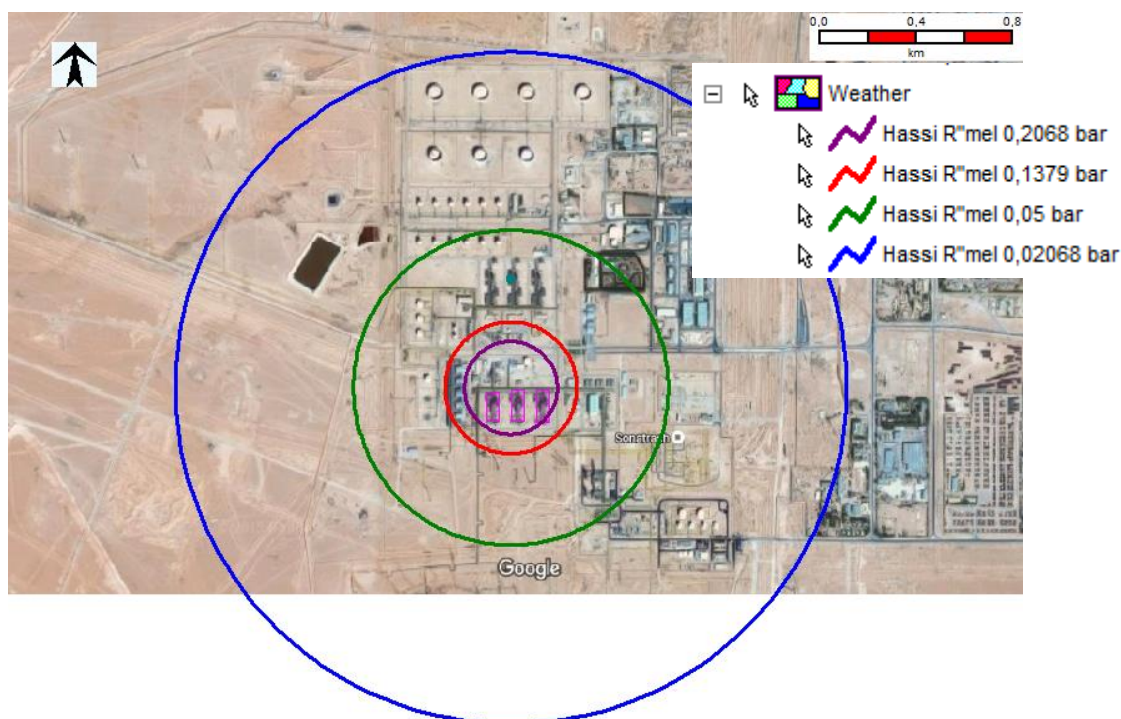


Figure 26: Illustration de surpression (brèche sur le ballon (BS))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur le ballon de reflux de GPL (D108).

Tableau 18: Distances d'effets de surpression (brèche de D108 (BS))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	137
137	209
50	650
20	1270

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle Baker-Sterhlow se situe entre 440 et 450 m vers le sud de ballon D108.

3.2.Sphère de stockage de GPL (CSTF)

Le choix de la sphère est référé à la source d'inflammation, donc on a choisi la sphère la plus proche des torches.

Dispersion de nuage gazeux :

Dispersion de cas de rupture catastrophique :

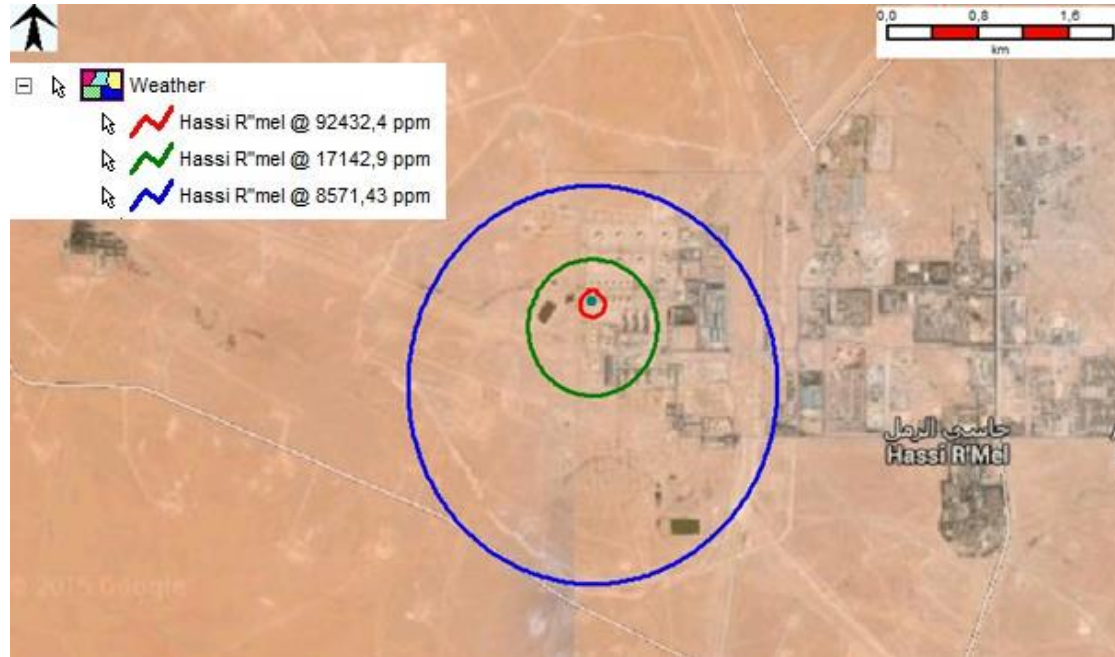


Figure 27 : Dispersion de rupture catastrophique de sphère

Dispersion de cas de brèche :



Figure 28: Dispersion de brèche sur la sphère

Pour la dispersion, pour le cas de la brèche, le nuage est très épandu, ce qui conduit à un mélange avec des proportions hors de l'intervalle de l'explosivité.

3.2.1. Modélisation par méthode Equivalent TNT

3.2.1.1. Modélisation de la rupture catastrophique

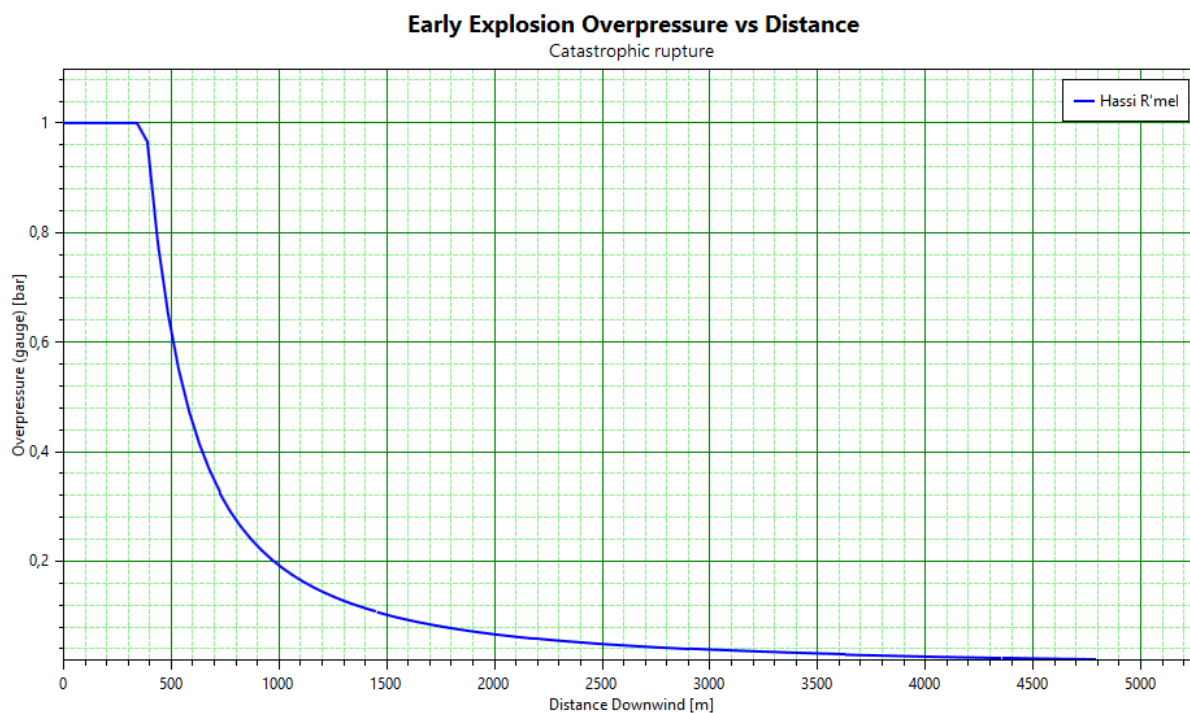


Figure 29: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (TNT))

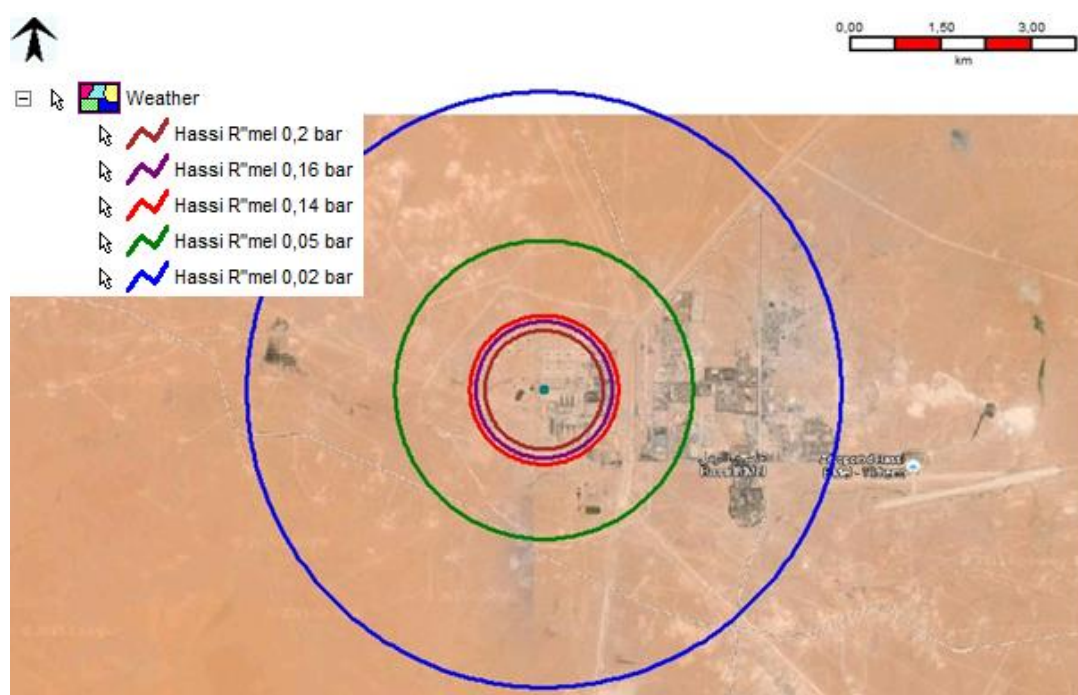


Figure 30: Illustration de surpression (rupture de sphère (TNT))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique dans la sphère de stockage de GPL.

Tableau 19: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (TNT))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	860
160	1070
140	1250
50	2420
20	4800

3.2.1.2. Modélisation de la brèche

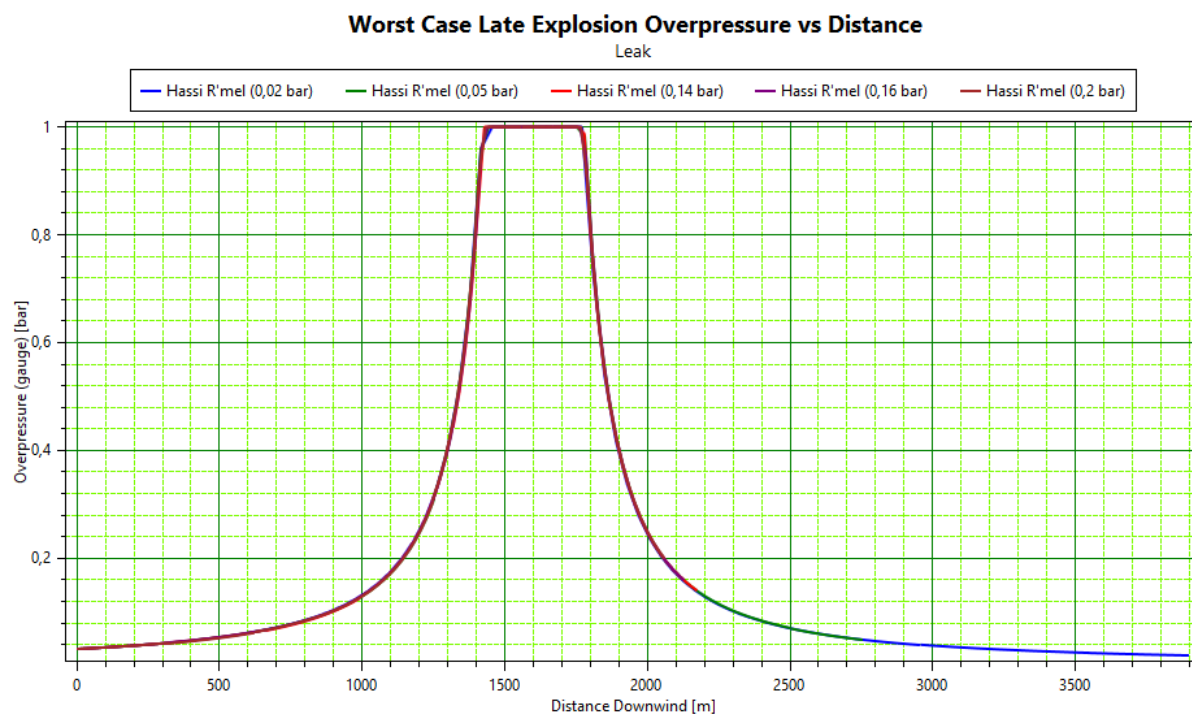


Figure 31: La surpression en fonction de la distance (brèche de sphère (TNT))

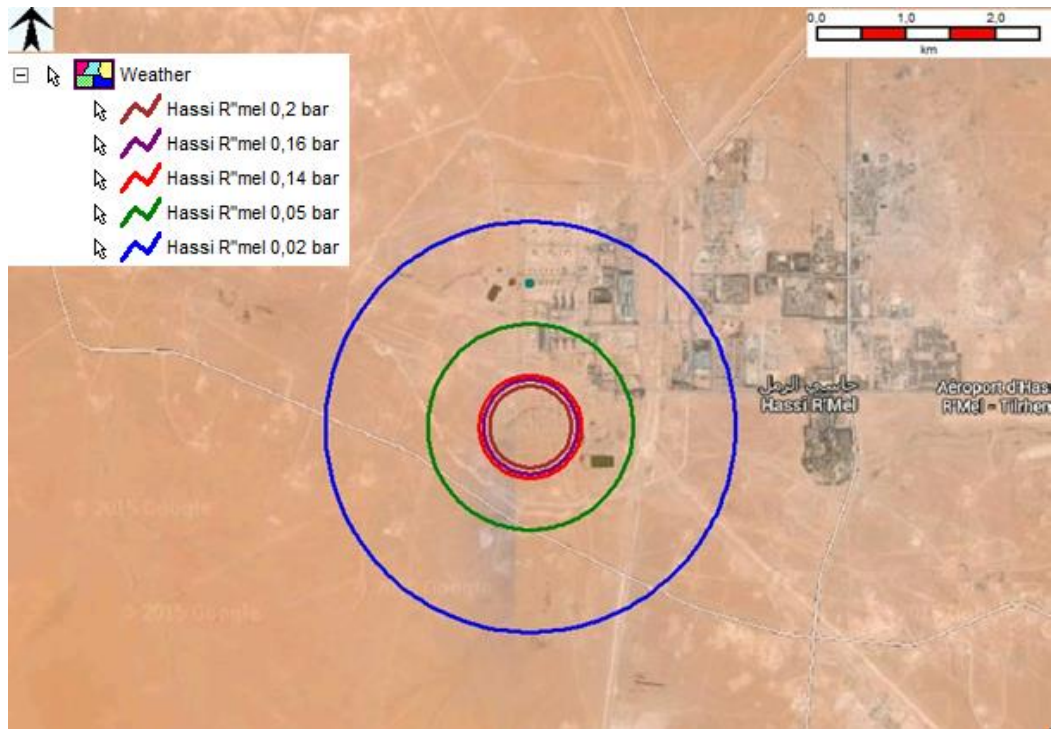


Figure 32: Illustration de surpression (brèche de sphère (TNT))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur la sphère de stockage de GPL.

Tableau 20: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (TNT))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	426
160	
140	578
50	1140
20	2150

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle TNT se situe entre 1400 et 1450 m vers le sud de la sphère.

3.2.2. Modélisation par méthode Multi-Energie

3.2.2.1. Modélisation de la rupture catastrophique

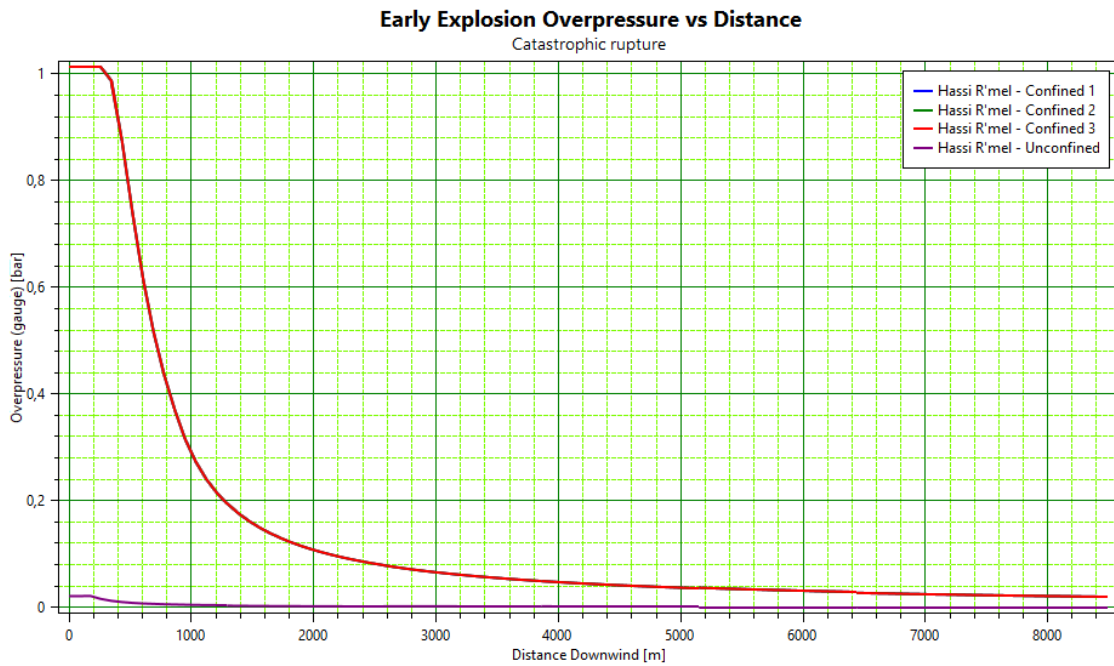


Figure 33: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (ME))

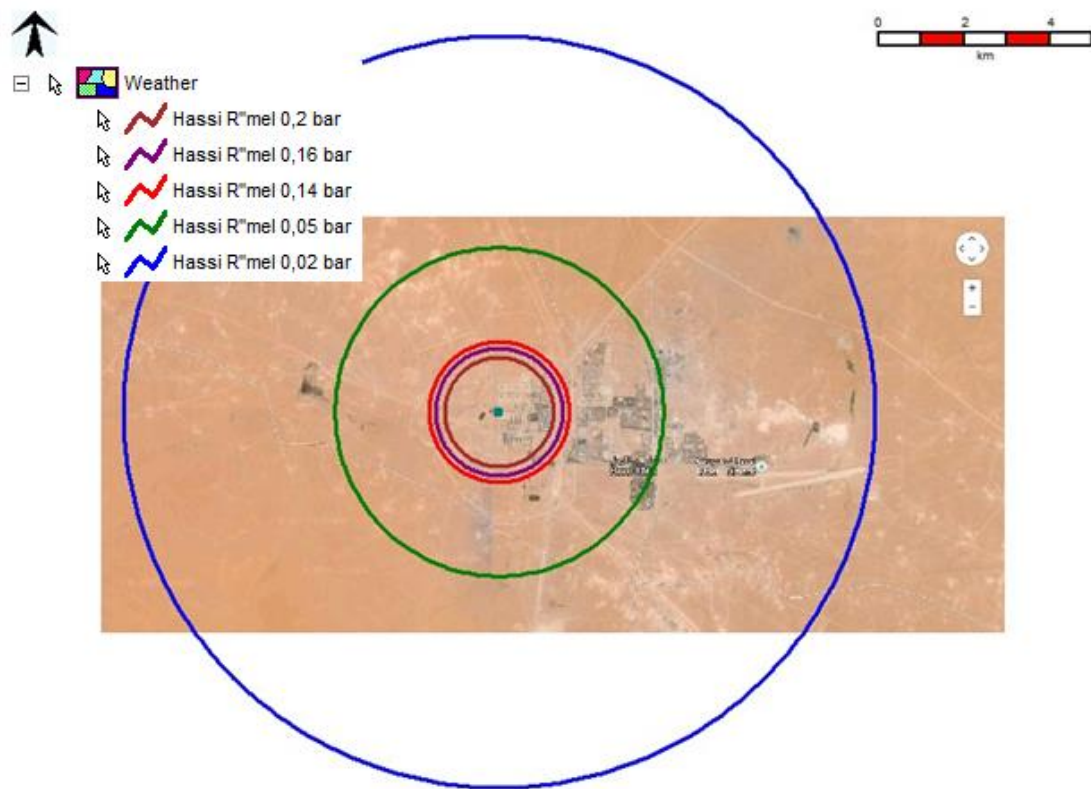


Figure 34: Illustration de surpression (rupture catastrophique de sphère (ME))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique dans la sphère de stockage de GPL.

Tableau 21: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (TNT))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	1250
137	1600
50	3700
20	8500

3.2.2.2. Modélisation de la brèche

Worst Case Late Explosion Overpressure vs Distance

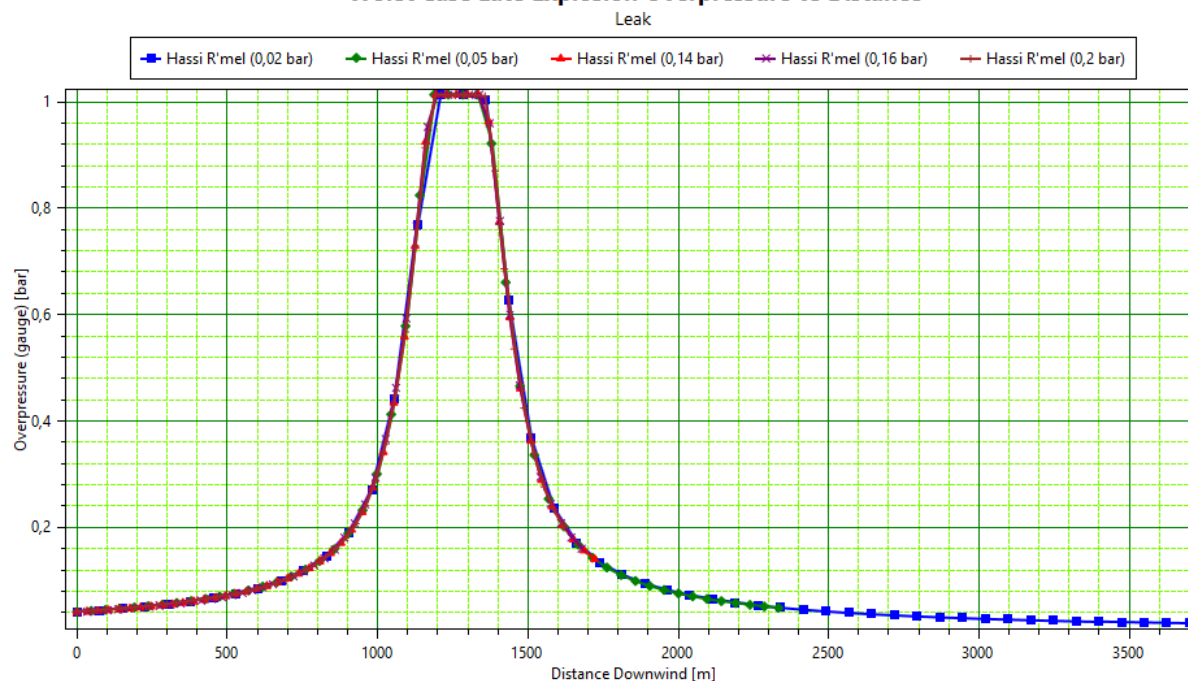


Figure 35: La surpression en fonction de la distance (brèche de sphère (ME))

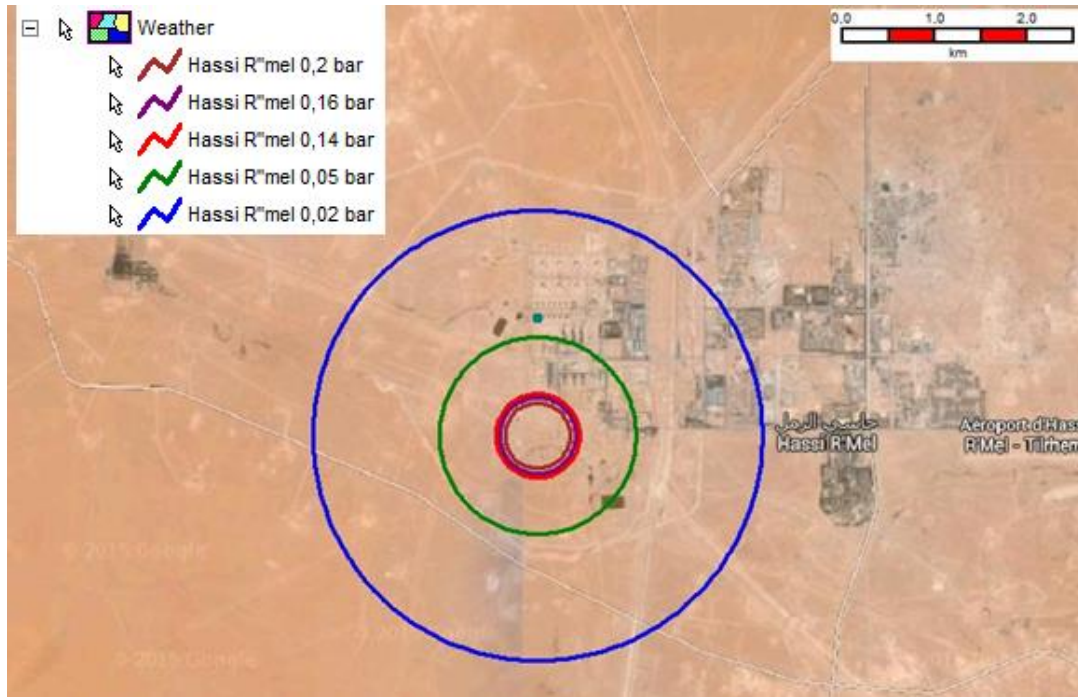


Figure 36: Illustration de surpression (brèche de sphère (ME))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur la sphère de stockage de GPL.

Tableau 22: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (ME))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	625
137	790
50	1350
20	2500

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle Multi-Energie se situe entre 1250 et 1300 m vers le sud de la sphère.

3.2.3. Modélisation par la méthode Baker –Sterhlow

3.2.3.1. Modélisation de la rupture catastrophique

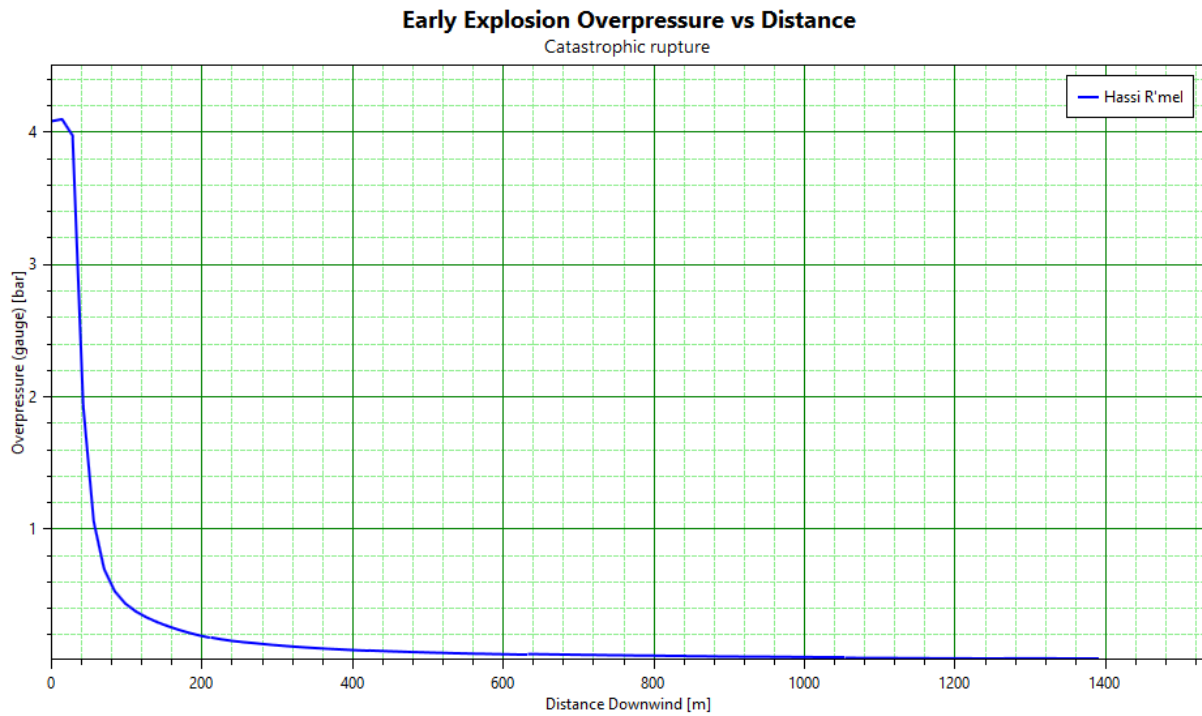


Figure 37: La surpression en fonction de la distance (rupture catastrophique de sphère (BS))

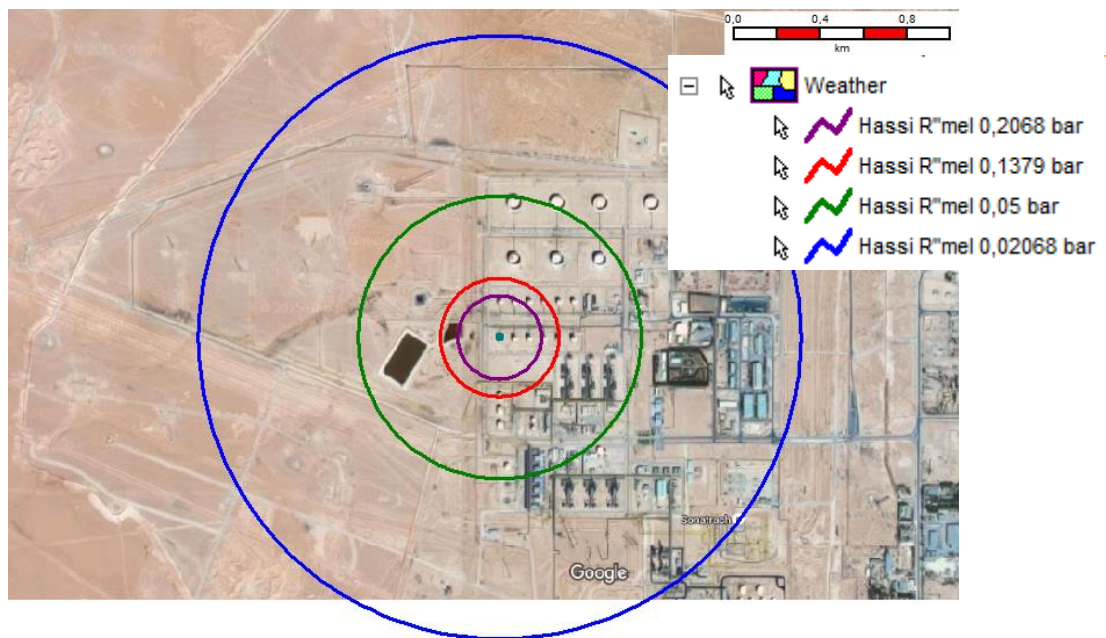


Figure 38: Illustration de surpression (rupture catastrophique de sphère (BS))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une rupture catastrophique dans la sphère de stockage de GPL.

Tableau 23: Distances d'effets de surpression (rupture catastrophique de sphère (BS))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	200
137	270
50	650
20	1400

3.2.3.2. Modélisation de la brèche

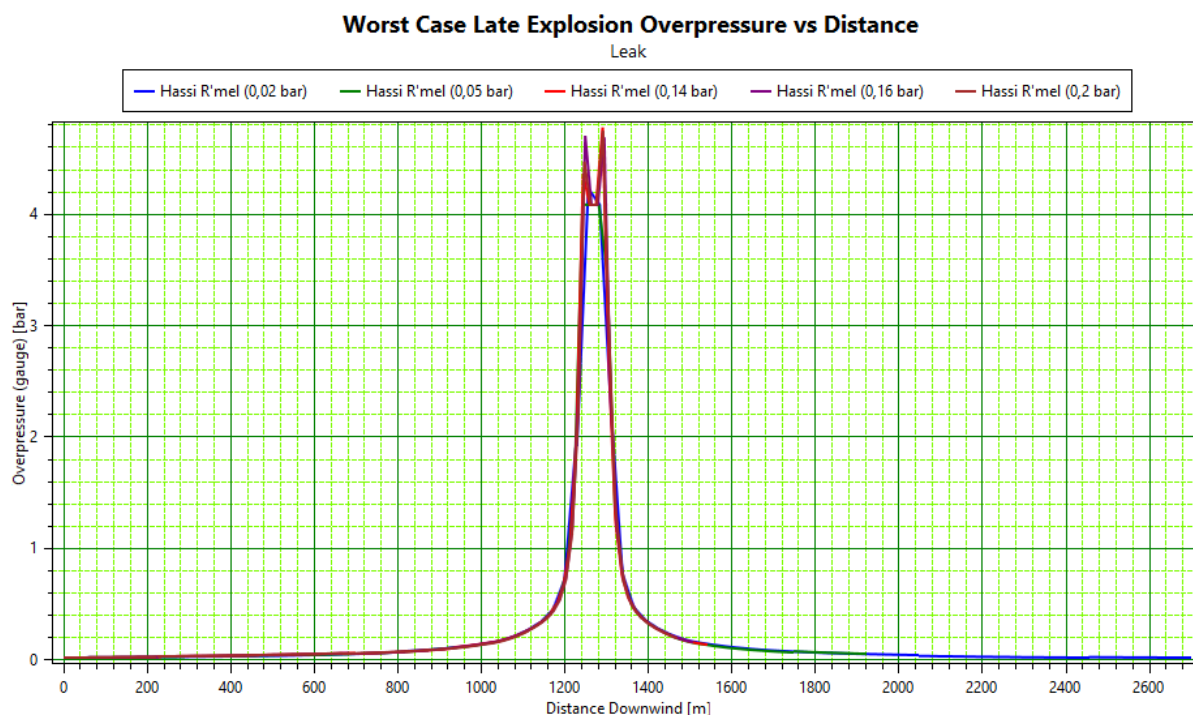


Figure 39: La surpression en fonction de la distance (brèche sphère (BS))

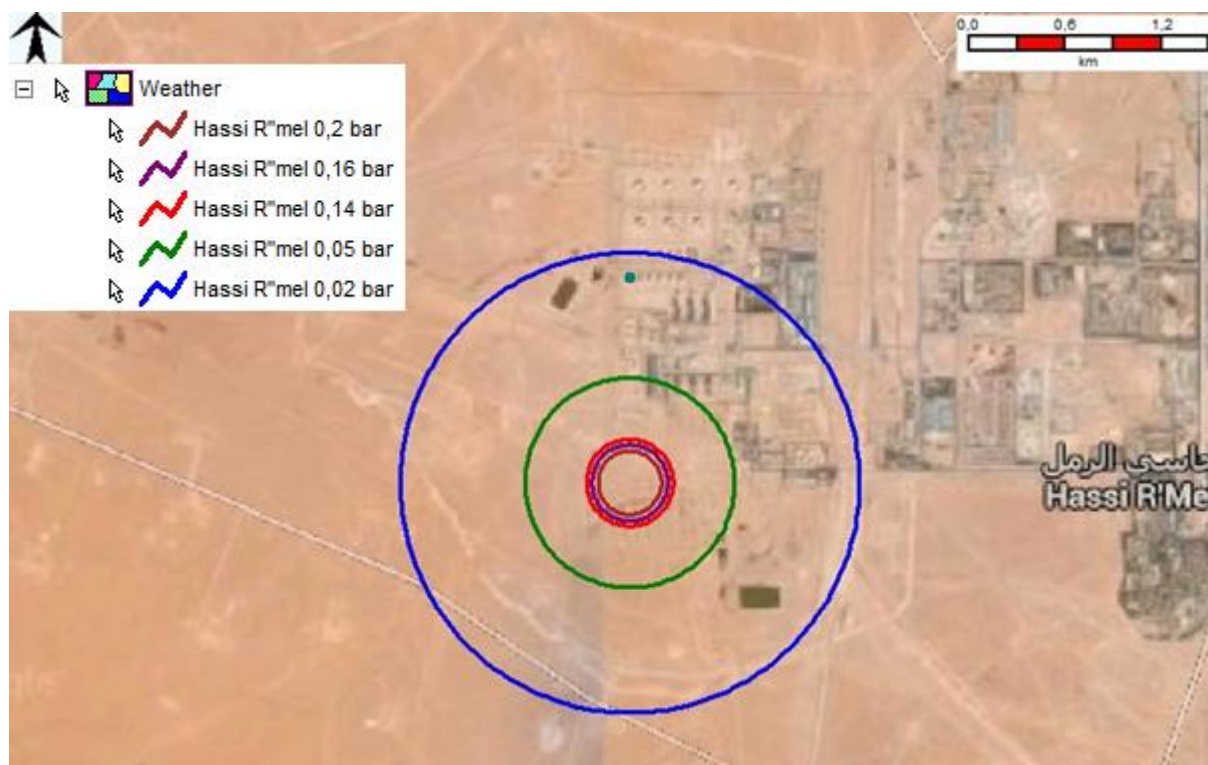


Figure 40: Illustration de surpression (brèche sphère (BS))

Le tableau suivant reprend les distances d'effets de surpression associées au phénomène de VCE suite à une brèche sur la sphère de stockage de GPL.

Tableau 24: Distances d'effets de surpression (brèche de sphère (BS))

Niveau de surpression (mbar)	Distance d'effet (m)
200	190
137	225
50	650
20	1220

Dans le cas d'une brèche les valeurs de la surpression diminuent à cause de déplacement de nuage (le nuage a le temps pour qu'il s'épande suivant les conditions climatologiques).

Le centre de l'explosion n'est plus la position de l'équipement, car le nuage s'épand vers le sud.

Le centre de l'explosion selon le modèle Baker-Sterhlow se situe entre 1250 et 1300 m vers le sud de la sphère.

3.3. Modélisation par la méthode CAM

La méthode CAM a son propre logiciel de simulation (logiciel « FRED »), développé par SHELL. La disponibilité de ce logiciel est très restreinte, donc on a proposé un programme MatLab utilisant le modèle cité dans le chapitre 2, pour calculer la surpression en un point donné.

```

syms t1 t2 pe pf v0 r1 p0
disp('le volume de l''équipement :')
v0=input('v0=')
disp('la température initiale :')
t1=input('t1=')
disp('la température de l''atmosphère :')
t2=input('t2=')
disp('la pression dans l''équipement :')
pe=input('pe=')
disp('la pression de l''atmosphère ;')
pf=input('pf=')
disp('la distance hors de rayon :')
r1=input('r1=')
disp('la surpression maximale :')
p0=input('p0=')
disp('le volume de nuage :')
v1=(pe*v0*t2)/(pf*t1)
disp('le rayon de nuage :')
r0=(3*v1/(2*3.14))^(1/3)
disp('la distance du centre de nuage :')
r=r1+r0
l=log10(r/r0)+0.02*p0 ;
m=0.08*1^4-0.592*1^3+1.63*1^2-3.28*1+1.39 ;
p1=10^m ;
p2=r0*p0/r ;
if(p1>p2)
    disp('la surpression au receptrer :')
    p1=p1
else
    disp('la surpression au receptrer :')
    p2=p2
end
    
```

Après l'exécution de programme on a trouvé les résultats suivants :

Tableau 25: Distances d'effets de surpression (CAM)

Position au centre de nuage (m)	Surpression (ballon) (bar)	Surpression (sphère) (bar)
100	163	374
200	127	183
300	86	118
400	34	83
500	17	36

Conclusion

D'après les résultats précédents, on conclut que :

- La dispersion lors d'une brèche s'épand plus loin que celle d'une rupture catastrophique de l'équipement (en considérant le temps nécessaire pour le vidange total de l'équipement).
- Les effets de surpression d'une rupture catastrophique sont toujours plus significatif les effets de surpression lors d'une brèche.
- la méthode TNT surestime la surpression au champ proche de centre de l'explosion, lors des petites quantités de gaz, après la surpression diminue avec une vitesse plus que les autres méthodes.
- La méthode Multi-Energie et la méthode Baker-Sterhlow donnent des résultats très proches.
- Les résultats de la méthode TNT lors des grandes quantités de combustible ne sont pas surestimés.
- Les résultats de la méthode Baker-Sterhlow ne sont pas logiques lors de l'explosion d'une grande quantité de gaz.
- Le modèle simplifié de la méthode de CAM sous-estime les effets de la surpression par rapport aux autres méthodes.

Conclusion générale

L'étude comparative qu'on réalise dans ce mémoire représente une base ou une plateforme pour d'autres objectifs et exigences comme l'étude de danger et l'implantation des plans d'urgences.

Après avoir fini cette étude, nous avons tirés des résultats et des recommandations sur la modélisation des explosions :

- Les méthodes : Multi-Energie, Baker-Sterhlow et CAM ne sont utilisées que pour modéliser les effets de surpression d'un VCE.
- La méthode « Equivalent TNT » est déconseillée pour modéliser le champ proche d'une explosion VCE.
- La méthode Baker-Sterhlow n'est pas valable pour les explosions qui entraînent des grandes quantités de combustibles, elle conduit à des sous-estimations de surpression très large.
- La méthode de Baker-Sterhlow n'implique pas les détails de l'encombrement, il est caractérisé d'une façon générale (le nombre de zones encombrées ou leur degré d'encombrement n'est pas mentionné par la méthode).
- A cause de la documentation restreinte sur la méthode CAM, et l'absence d'une simulation réelle (par un logiciel), ses caractéristiques restent toujours ambiguës.
- Un point négatif caractérise la méthode CAM, est la demande de l'opinion d'un expert des explosions, parfois la méthode ne peut être appliquée qu'avec l'aide d'un expert.
- Pour des explosions avec grande quantité de combustible, les méthodes Equivalent TNT et la méthode Multi-Energie sont conseillées.

D'après les résultats obtenus par PHAST, la distance qui doit séparer entre le centre de stockage et la zone urbaine, est de 8 km au minimum. Dans le cas de Hassi R'mel, toute la zone (bases de vie ou les habitants de Hassi R'mel) est susceptible d'être touchée par les effets de surpression d'un VCE de sphère de stockage.

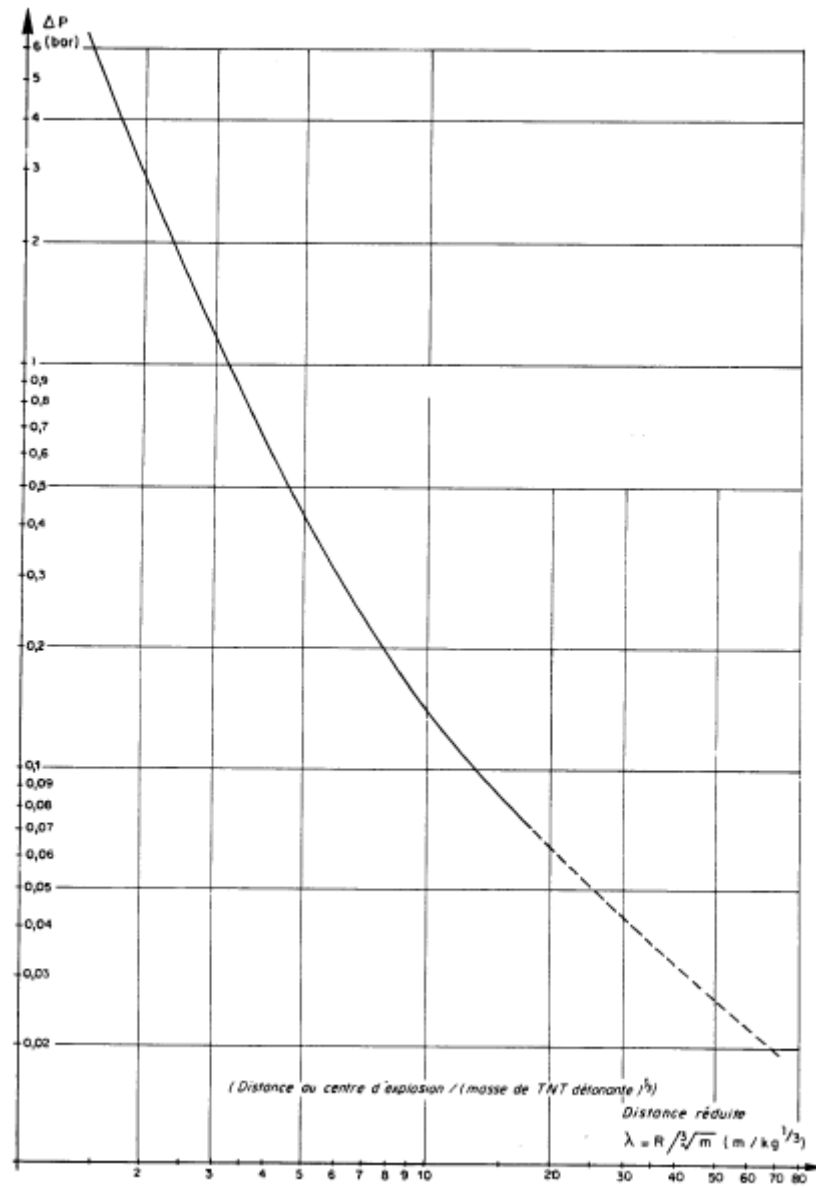
La modélisation des phénomènes dangereux donne une très détaillée sur le danger potentiel existant dans une installation industrielle. L'utilisation de logiciel PHAST facilite la modélisation et donne des résultats réels et fiables sur les risques présentés par l'installation.

Bibliographie

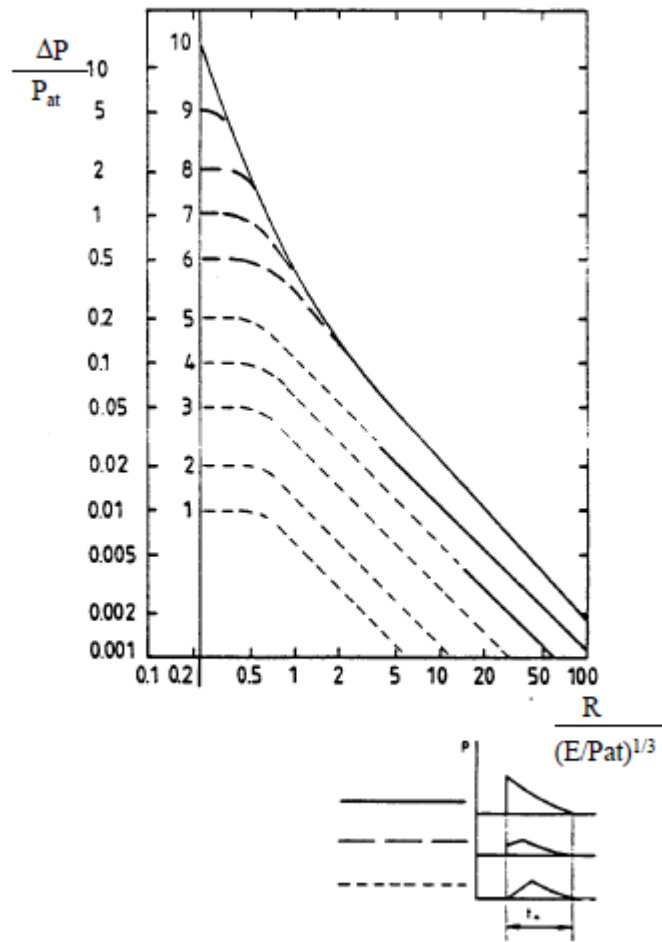
1. PACA, A.d.F.N.E., *Enquête publique ERIDAN, Avis du réseau France Nature Environnement PACA*. 2013: p. 3.
2. Thibaud AUPOIX, F.B., Charles MOUSSA, *Explosion en champ libre de type UVCE*. 2013, INSA Rouen.
3. Journal Officiel, Algérie. *Décret exécutif n° 06-198 du 4 Jomada El Oula 1427 correspondant au 31 mai 2006 définissant la réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement*. 2006.
4. PARIS, L. *Évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre*. Techniques de l'ingénieur 2009.
5. DNV, *Etude de Dangers Module 4*. 2010.
6. Sochet, I., *Blast effects of external explosions*. 2011, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges.
7. J.F.LECHAUDEL, Y.M.e., *Guide des méthodes d'évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre*. 1999, INERIS.
8. IDDIR, O. *La méthode Multi-Énergie*. 2015.
9. Dimitri PELLETIER, F.S., *mise en oeuvre de la méthode Multi-Energie dans le cadre opérationnel*. 2011, Ecole nationale supérieurs des officiers et des sapeur-pompier.
10. al., F.D.A.e. *Characteristic overpressure–impulse–distance curves for vapour cloud explosions using the TNO Multi-Energy model*. 2006.
11. Yongfu Xu David Worthington, A.O., *CORRECTING THE PREDICTIONS BY BAKER-STREHLOW-TANG (BST) MODEL FOR THE GROUND EFFECT*. 2009, DNV.
12. Puttock, J.S., *Fuel Gas Explosion Guidelines - the Congestion Assessment Method*. 1995, Thornton Research.Centre, SHELL.
13. Farouk, C. *Carte de gisement éolien*. 2011; Available from: <https://www.cder.dz/spip.php?article1934>.
14. DNV, *EDD (Annexe 6): Caractéristiques des équipements*.

Annexes

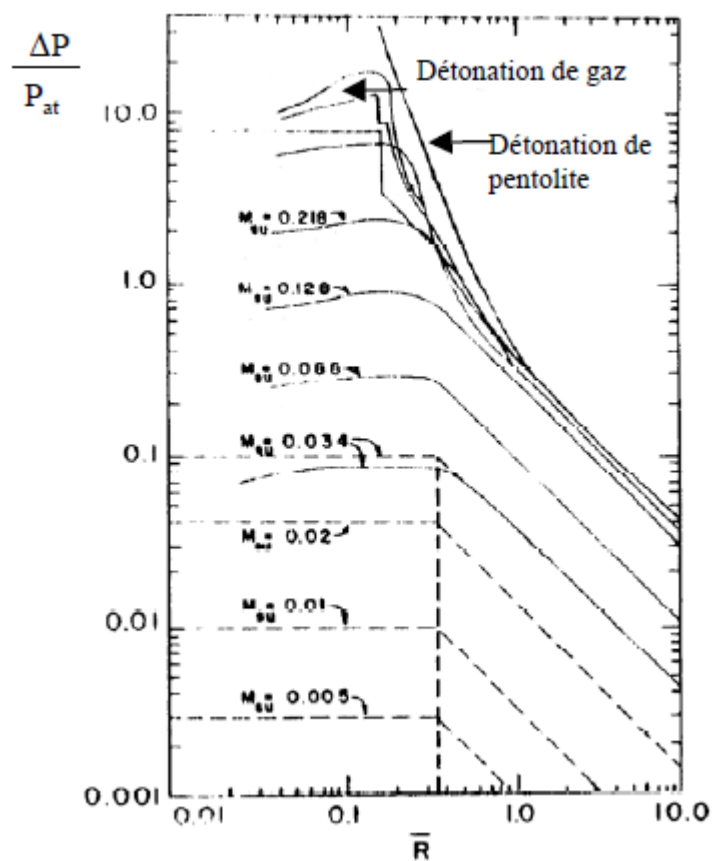
Annexe 1 : abaque de la méthode « Equivalent TNT »



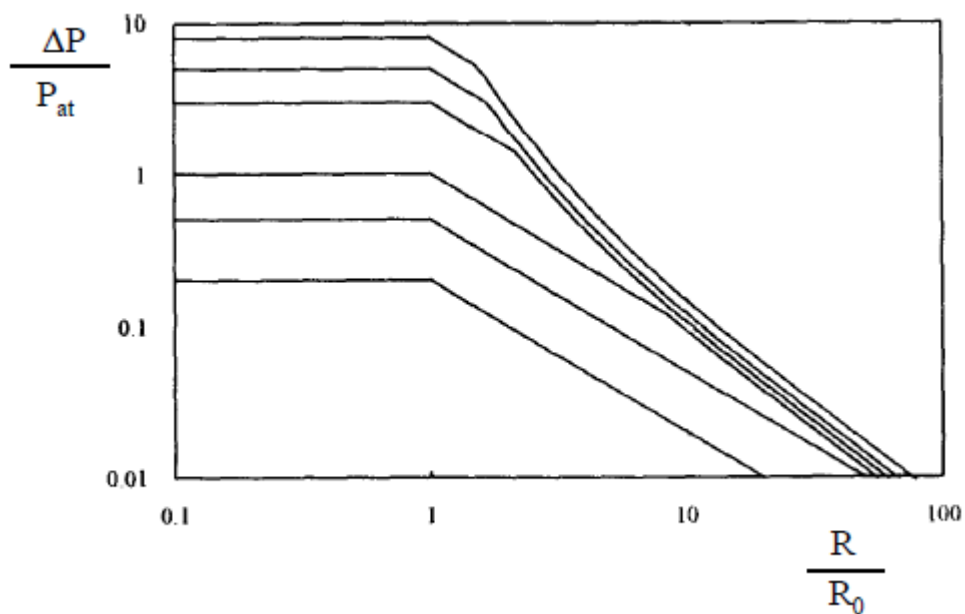
Annexe 2 : abaque de la méthode Multi-Energie



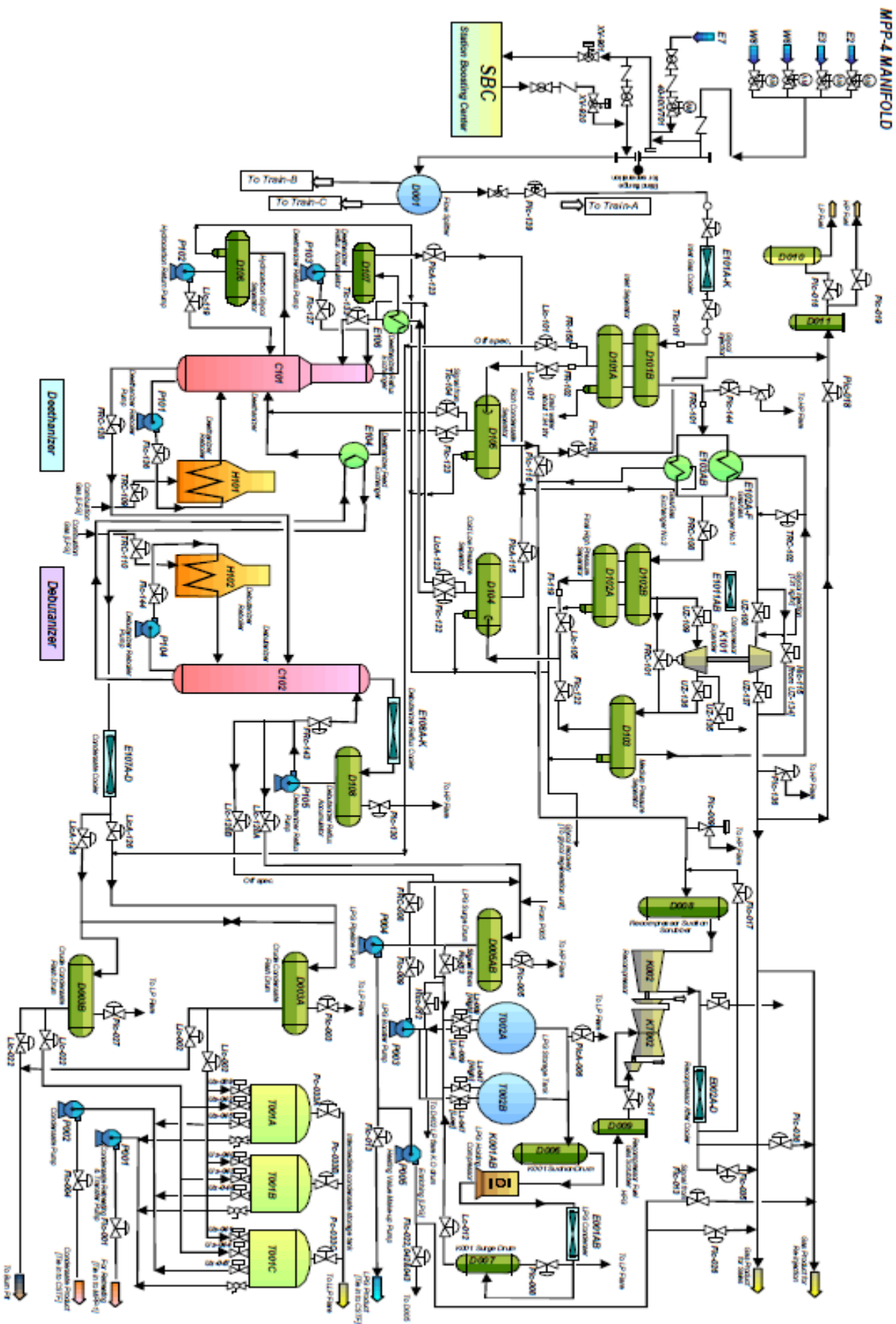
Annexe 3 : abaque de la méthode Baker-Sterhlow



Annexe 4 : abaque de la méthode CAM



Annexe 5 : schéma simplifié de procédé de MPP4



Simplified Process Flow Diagram for MPP- 4