

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Filière **Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement**  
**Gestion des Risques Industriels**

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI

**Atténuation de l'effet de surpression (explosion) par la mise  
en place d'un Blast Proof**

Cas de : **Module 1, SONATRACH-DP Hassi R'mel.**

**Abdelhak OUTMOUNE**

Sous la direction de : **M. Amine BENMOKHTAR** Maitre-Assistant ENP  
**Me. Chahrazed BOUTEKEDJIRET** Professeur ENP

Présenté et soutenu publiquement le (22/06/2016)

**Composition du Jury :**

Président :	<b>Me. Ouzna HAOUCHINE</b>	<b>Maitre de Conférences ENP</b>
Promoteurs :	<b>Mr. Amine BENMOKHTAR</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>
	<b>Me. Chahrazed BOUTEKEDJIRET</b>	<b>Professeur ENP</b>
	<b>Mr. Med El-Abbes BOUDA</b>	<b>Ingénieur Sécurité</b>
Examineurs :	<b>M. Bachir TOUAHER</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>
	<b>Mr. Athmane DJILI</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Filière **Qualité, Hygiène, Sécurité et Environnement**  
**Gestion des Risques Industriels**

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en QHSE-GRI

**Atténuation de l'effet de surpression (explosion) par la mise  
en place d'un Blast Proof**

Cas de : **Module 1, SONATRACH-DP Hassi R'mel.**

**Abdelhak OUTMOUNE**

Sous la direction de : **M. Amine BENMOKHTAR** Maitre-Assistant ENP  
**Me. Chahrazed BOUTEKEDJIRET** Professeur ENP

Présenté et soutenu publiquement le (22/06/2016)

**Composition du Jury :**

Président :	<b>Me. Ouzna HAOUCHINE</b>	<b>Maitre de Conférences ENP</b>
Promoteurs :	<b>Mr. Amine BENMOKHTAR</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>
	<b>Me. Chahrazed BOUTEKEDJIRET</b>	<b>Professeur ENP</b>
	<b>Mr. Med El-Abbes BOUDA</b>	<b>Ingénieur Sécurité</b>
Examineurs :	<b>M. Bachir TOUAHER</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>
	<b>Mr. Athmane DJILI</b>	<b>Maitre-Assistant ENP</b>

## **DEDICACES**

Je dédie ce modeste Travail à :

A mes Parents ;

A mes Frères « Sami, Djamaa et Anis » et ma Sœur Samiha ;

A mon Oncle « Dada Mourad », sa femme « Tata Samia » et leurs enfants « Manel, Maissa et Ayoub » ;

A mon Oncle « Khali Boubker » ;

A tous mes Cousins et Cousines, principalement « Fahima »

A ma Tante Nana ;

A toutes mes Tantes Maternelles ;

A tous mes Amis, principalement, Adel, Lyes, Kader et Idir ;

A tous Ceux et Celles qui me sont Chers.

Abdelhak

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie avant tout Dieu le tout puissant de m'avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce Mémoire de Fin d'Etudes.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes encadreurs académiques de l'Ecole National Polytechnique (ENP), M A. BENMOKHTAR et Mme C. BOUTEKEDJIRET pour leurs soutiens académiques et moral, le rôle crucial qu'ils ont joué en supervisant ce projet, principalement pour le savoir qu'ils m'ont transmis et pour le temps qu'ils m'ont consacré, je les remercie également pour les conseils et le soutien dans les phase difficiles de mon projet de fin d'étude.

Mes sincères remerciements à Mme O. HAOUCHINE Maitre de Conférences à l'Ecole National Polytechnique pour l'honneur qu'elle nous fait de présider le jury, ainsi que M B. TOUAHER et M. A. DJILI de nous avoir fait l'honneur de faire partie de notre jury.

J'aimerais remercier également toute l'équipe de Sonatrach à Hassi R'mel pour leurs accueil dans l'entreprise et pour m'avoir proposé ce thème.

Je tiens aussi à adresser mes vifs remerciements à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation, principalement Mme S. ZEBODJ Responsable de la filière et à tous mes collègues de l'école.

Sans oublié M. Bilel Benbelil, je le remercie énormément de m'avoir aidé dans la partie génie civil.

Un merci particulier à toute ma famille pour leur soutien moral et financier.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

## ملخص :

يهدف هذا العمل إلى اقتراح حماية ضد آثار ضغط سيناريوهات الانفجار لوحدة معالجة الغاز الطبيعي لحاسي رمل، سوناطراك. بعد ذلك، تم حساب ضغط موجة الانفجار على جدار برج المراقبة باستخدام طريقة ما يعادل مادة تي ان تي (TNT). أوضحت النتائج أن أعلى قيمة للضغط المحصل عليها موجهة على الجدران المقابل للانفجار و قيمتها 1,857 bar، و تم تثبيت هذا الحساب باستعمال برنامج فاست (PHAST)(2,09 bar). أخيرا و على أساس قيمة الضغط المحصل عليها، تم إيجاد أبعاد جدار التحكم (Blast Proof) ضد الانفجار. و قد عاد اختيار هذا الأسلوب من الحماية من بين العديد من الطرق المقترحة لفعاليتها وتكاليفها المباشرة وغير المباشرة للتنفيذ.

**الكلمات الدالة :** الانفجار، الضغط، برج المراقبة، النمذجة، جدار التحكم (Blast Proof)، التحجيم

## Abstract:

The present work aims to propose a solution to protect against the overpressure effects of the explosions scenarios the control tower of the module 1(MPP1), of Hassi R' mel, Sonatrach gas field. The calculation of the shock wave overpressure on the walls of the control tower by using the equivalent TNT method. The maximum overpressure calculated is that acting on the front face of the control tower, and it is 1,857 bar. This calculation was confirmed using PHAST software (2,09 bar). On the basis of the determined maximum overpressure value, we proposed the construction of a Blast Proof for the protection of the tower control. This protection was selected for its effectiveness and its direct and indirect cost of implementation.

**Key Words:** Explosion, Overpressure, Control tower, Modeling, Blast Proof, Sizing.

## Résumé :

Notre travail consiste à proposer une solution pour protéger la tour de contrôle du module 1(MPP1), du champ gazier de Hassi R'mel, Sonatrach, contre les effets de surpression suite à une explosion. Le calcul de la surpression de l'onde de choc sur les parois de la salle de contrôle en utilisant la méthode équivalent TNT. La surpression maximale calculée est celle agissant sur la face avant de la tour de contrôle et elle est de 1,857 bar et ce calcul a été confirmé par le logiciel PHAST (2,09 bar).

Sur la base de la valeur maximale de surpression déterminée, nous avons proposé comme modèle de protection de la salle de contrôle la construction d'un mur en béton armé coulé sur place (Blast Proof) vue son efficacité et son cout direct et indirect de réalisation.

**Mots clés :** Explosion, Surpression, Tour de contrôle, Modélisation, Blast Proof, Dimensionnement.

# Table des matières

LISTE DES TABLEAUX.....	9
LISTE DES FIGURES.....	10
LISTE DES ABREVIATIONS.....	12
INTRODUCTION.....	13
Chapitre I MISE EN CONTEXTE, PROBLEMATIQUE, METHODOLOGIE, PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET PROCESS.....	16
1. MISE EN CONTEXTE.....	16
2. PROBLEMATIQUE.....	16
3. OBJECTIFS.....	17
4. METHODOLOGIE.....	18
5. Présentation de l'entreprise et le champ de Hassi R'mel.....	18
5.1. Historique.....	19
5.2. Développement.....	20
5.3. Description des unités.....	20
6. PROCESS ET INSTALLATIONS.....	22
6.1. Présentation du module 1.....	22
6.2. Capacité de production.....	22
6.3. Procédé Prichard.....	23
6.4. Description du procédé de traitement du gaz naturel.....	23
CHAPITRE II CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET ETUDE LOPA.....	28
1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE.....	28
2. ETUDE LOPA (LAYER OF PROTECTION ANALYSIS).....	29
2.1. Définitions.....	29
2.2. Méthodologie d'analyse des couches de protection (LOPA).....	30
2.3. Application de la méthode LOPA au module MPP1 du site Hassi-R'Mel.....	35
2.4. Résultats de l'étude.....	35
Chapitre III LES EXPLOSIONS ET LES TYPES DE PROTECTION.....	38
3. ASPECT THEORIQUE SUR LES EXPLOSIONS.....	38
3.1. Types d'explosion.....	38
3.2. Explosions et ondes de choc.....	42
3.3. Calcul des charges de souffle structurelles.....	51
3.4. Résumé du calcul des charges de souffle.....	64
4. TYPES DE CONSTRUCTION.....	67
4.1. Considérations générales.....	67

4.2. Systèmes communs pour bâtiments pétrochimiques .....	68
CHAPITRE IV CALCUL DE LA SURPRESSION DE L'ONDE D'EXPLOSION ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE PROTECTION.....	74
5. CALCULS DES PARAMETRES DE SURPRESSION.....	76
5.1. Pression sur la paroi avant .....	76
5.2. Pression sur le toit.....	80
5.3. Pression sur la paroi latérale .....	83
5.4. La pression sur la paroi arrière.....	84
6. MODELISATION DES PARAMETRES DE SURPRESSION PAR LE LOGICIEL PHAST.....	87
6.1. Description du logiciel PHAST .....	87
6.2. MODELISATION PAR LE LOGICIEL PHAST.....	88
6.3. Résultats de la modélisation par logiciel PHAST .....	89
7. DIMENSIONNEMENT DU MUR DE PROTECTION (BLAST PROOF) .....	91
7.1. METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE DES STRUCTURES AUX EXPLOSIONS .....	92
CONCLUSION GENERALE .....	99
BIBLIOGRAPHIE .....	101
ANNEXES .....	102

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Développement du champ de Hassi R'mel.....	20
Tableau 2 : Capacité de production des différents modules (SONATRACH) .....	22
Tableau 3 : Niveau de gravité et TMEL des conséquences de sécurité .....	30
Tableau 4 : Causes initiées et probabilités de défaillance .....	31
Tableau 5 : Probabilité de défaillance à la demande (PFD) des Couche de protection indépendante (IPL) (JGC Corporation, 2007).....	33
Tableau 6 Valeurs du coefficients de traînée $C_D$ pour le toit et le mur latéral .....	59
Tableau 7 Caractéristiques du ballon de GPL du MPP1 (DET NORSE VERITAS (DNV), 2010).....	74
Tableau 8 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour la face avant.....	77
Tableau 9 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour la face avant.....	78
Tableau 10 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour le toit.....	81
Tableau 11 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour le toit.....	82
Tableau 12 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour la face arrière.....	85
Tableau 13 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour la face arrière .....	85
Tableau 14 Valeurs des paramètres de surpression calculées pour toute la structure .....	87

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Répartition des réserves gazières en Algérie (SONATRACH)</i> .....	18
Figure 2 : Situation géographique de Hassi R'mel.....	19
Figure 3 : Les différentes unités du champ gazier de Hassi R'mel.....	21
Figure 4 Schéma global du process de traitement du gaz naturel (SONATRACH).....	24
Figure 5 Développement d'une explosion d'un nuage de gaz VCE (Techniques de l'ingénieur, 2009).....	39
Figure 6 La pression d'une onde de choc idéale en fonction du temps (SOLOMOS, 2011) .	43
Figure 7 Influence de la distance sur la pression de l'onde de choc de la phase positive (SOLOMOS, 2011).....	45
Figure 8 Types d'explosions externes (SOLOMOS, 2011).....	47
Figure 9 Pressions incidente, réfléchiée et dynamique en fonction du temps (SOLOMOS, 2011).....	48
Figure 10 Pression réfléchiée pour les structures.....	48
Figure 11 Pressions dues à une explosion agissant sur un bâtiment.....	49
Figure 12 Influence des dimensions d'une surface finie sur la pression réfléchiée en fonction du temps (SOLOMOS, 2011).....	50
Figure 13 : Variation de la pression dynamique de pointe en fonction de la pression incidente de pointe.....	51
<i>Figure 14 : Paramètres de la phase positive de l'onde sphérique de l'explosion du TNT à l'air libre</i> .....	52
Figure 15 : Paramètres de la phase positive de l'onde hémisphérique de l'explosion.....	53
Figure 16 : Paramètres de la phase négative de l'explosion du TNT :.....	54
Figure 17 : Vitesse du son dans la région de la surpression réfléchiée.....	56
Figure 18 Substitution de la courbe réelle de pression incidente par l'impulsion triangulaire et définition des temps fictifs pertinents.....	57
Figure 19 Courbe triangulaire de pression sur la face avant de la structure.....	58
Figure 20 Variation de la pression idéalisée sur le toit et le mur latéral en fonction du temps $PR = P_{Roof}$ (SOLOMOS, 2011).....	60
Figure 21 : Facteurs de charge des phases positive et négative de la charge de l'explosion sur le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011).....	61
Figure 22 : Temps de montée $tD$ mis à l'échelle, de la charge de la pression des phases positive et négative pour le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011).....	62
Figure 23 : Durées mise à l'échelle des phases positive et négative de la charge de la pression sur le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011).....	63
Figure 24 : Diagramme de calcul de la variation de pression pour la face avant.....	66
Figure 25: Construction métallique renforcée préfabriquée.....	69
Figure 26 : Mur préfabriqué en béton armé.....	70
Figure 27 Structure en arc.....	71
Figure 28 Structure à terre endigué.....	71
Figure 29 Mur Blast Proof et direction de l'onde de choc (SONATRACH Activité aval, 2001).....	72
Figure 30 : Géométrie du site de l'explosion et dimensions de la salle de contrôle.....	75
Figure 31 Profil de la pression de l'onde de choc en fonction du temps pour la face avant..	79
Figure 32 Diagrammes triangulaires des phases positive et négative de la variation de pression en fonction du temps.....	83
Figure 33 Pression au niveau de la paroi arrière en fonction du temps.....	86

Figure 34 Niveaux de surpressions associés au phénomène du VCE suite à une rupture catastrophique du ballon de GPL V209 .....	89
Figure 35 Surpression lors d'une rupture catastrophique du ballon V209 en fonction de la distance : (a) Echelle linéaire, (b) Echelle logarithmique .....	90
Figure 36 Niveau de surpression due à une rupture catastrophique de ballon de GPL V209 (en vert P=2,09 et en bleu P=1,857).....	91
Figure 37 Facteur d'amplification dynamique .....	93
Figure 38 Structure du mur Blast proof avec poteaux et poutres.....	96
Figure 39 Positionnement du mur .....	98

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

ATEX Atmosphère Explosive

BLEVE Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

BPCS Basic Process Control System

CSTF Centre de Stockage et Transfert des fluides

CTG Centre de Traitement de Gaz

CTH Centre de traitement d'huile

DEG Di-éthylène Glycol

DNV Det Norske Veritas.

EDD Etude De Danger

ESD Emergency Shutdown

GPL Gaz de Pétrole Liquéfié.

HAZID HAZard IDentification

HAZOP HAZard and Operability study (Analyse de risque et d'exploitation).

HRM Hassi R'Mel.

IC Installations Classée

IC Installation Classée

ICL Probabilité de défaillance de cause initiée

INERIS Institut National de l'Environnement Industrielles, et des RISques.

IPL Independent Protection Layer

LOPA Layer Of Protection Analysis (Analyse des barrières (couches) de protection).

MPP Module Processing Plant (Module de traitement et de production).

PFD Probability of Failure on Demand (probabilité de défaillance à la demande.

PHAST Process Hazard Analysis Software Tool

QRA Quantitative Risk Assesement

SIS Safety Instrumented System (Système Instrumenté de Sécurité).

TMEL Target Mitigated Event Likelihood

TNT Trinitrotoluène ou Tolute

VCE Vapeur Cloud Explosion

VFig Facteur de vulnérabilité pour la probabilité d'inflammation

VFP Facteur de vulnérabilité pour la probabilité des personnes présentes

## INTRODUCTION

L'industrie pétrochimique occupe une place de premier rang dans l'économie nationale. Cette industrie lourde nécessite des installations complexes pour assurer sa mission. Ces installations sont composées entre autres d'équipements et de réservoirs sous pression. Pour des raisons diverses (suppression, impact mécanique, surchauffe ou autre), ces équipements peuvent être endommagés et/ou éclater donnant lieu à des explosions avec de nombreux projectiles. Ces derniers peuvent impacter d'autres équipements, tels que des réservoirs sous pression ou d'autres installations sensibles comme les tours de contrôle. Le caractère incertain de ces explosions et leur potentiel violent nécessite de prendre des dispositions spécifiques pour l'analyse des structures exposées à ce phénomène.

La conception de structures résistantes aux explosions, ou le renforcement structurel des bâtiments existants, est l'une des mesures qui peut être utilisée pour protéger les personnes et les installations contre les risques d'effondrement des structures dus aux explosions accidentelles dans une usine, et réduire au minimum les dégâts.

Notre projet de fin d'étude consiste à proposer une solution pour protéger la tour de contrôle du module 1(MPP1), du champ gazier de Hassi R'mel, Sonatrach, contre les effets de surpression des scénarios d'explosions ; afin de préserver la sécurité des personnes et des biens et réduire les conséquences financières des effets d'explosions.

Ce rapport est structuré en six chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous allons d'abord définir la problématique, le contexte de notre étude et la méthodologie à suivre ; avant de donner un aperçu général sur le site de Hassi R'mel, le module 1, les différentes installations et process utilisés.
- Le Chapitre II portera sur le contexte réglementaire relatif aux phénomènes d'explosion et à l'étude LOPA du module 1 du champ gazier de Hassi R'mel.
- Le troisième chapitre sera consacré à un aperçu théorique sur les explosions, les méthodes de calculs des paramètres de surpression dans les installations pétrochimiques, et les types de protection contre les explosions.
- Le dernier chapitre est divisé en deux parties, la première sera consacré à la détermination des paramètres de surpression sur la tour de contrôle (parois avant, arrière, latérales et toit). Deux méthodes seront utilisées : une méthode analytique utilisant des

## INTRODUCTION GENERALE

---

équations et des graphes. Ces calculs seront confirmés en utilisant le logiciel PHAST. La deuxième partie sera consacré au dimensionnement de l'ouvrage proposé pour protéger la tour de contrôle, confirmer sa stabilité par le logiciel ROBOTBAT et donner une estimation financière de marchandises de réalisation de cet ouvrage.

Nous terminerons par une conclusion et des perspectives.

# Chapitre I

## **Chapitre I MISE EN CONTEXTE, PROBLEMATIQUE, METHODOLOGIE, PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET PROCESS**

Ce chapitre présente une mise en contexte du projet, effectué au niveau de SONATRACH Hassi R'mel et dont. Dans un premier temps, nous présentons la problématique du projet. Puis, nous définirons les objectifs visés. Enfin nous donnerons une description des étapes et de la méthodologie suivies pour répondre à la problématique posée et atteindre les objectifs visés.

### **1. MISE EN CONTEXTE**

Notre travail a été réalisé en deux étapes. La première étape, en décembre 2015, où nous avons vu le système de fonctionnement de SONATRACH, Hassi R'mel, les différents process et installations du site et nous avons défini la problématique à étudier. Après une recherche bibliographique sur la thématique choisie, nous avons entamé la seconde étape de notre travail en avril 2016. Cette étape a porté sur l'étude de la problématique choisie en nous basant sur des concepts théoriques pour la proposition de solutions.

### **2. PROBLEMATIQUE**

L'industrie pétrochimique occupe une place de premier rang dans l'économie nationale. Cette industrie lourde nécessite des installations complexes pour assurer sa mission.

Les usines pétrochimiques traitent des hydrocarbures et d'autres combustibles qui peuvent produire des explosions accidentelles. Bien que de tels incidents puissent être relativement rares, mais quand ils se produisent, les conséquences peuvent être extrêmement graves impliquant des dommages sur le personnel, des pertes financières et potentiellement un impact sur la sécurité publique.

Dans certains cas, les conséquences ont affecté des tours de contrôle d'usine. Par exemple :

- Explosion catastrophique d'un nuage de cyclohexane, le 1er juin 1974 à **Flixborough Royaume-Uni**, où parmi les 72 personnes présentes dans l'usine lors de l'explosion, 28 sont tuées, dont 19 se trouvant dans la salle de contrôle (Lagadec, 2008) ;
- Explosion de l'unité de liquéfaction aval GL1K- SH, Skikda, Algérie, en Janvier 2004 : 27 morts et 74 blessés (SKIKDA, 2004);
- BLEVE de sphère de GPL dans une raffinerie au Japon, le 11 Mars 2011 (ARIA, 2016).

La concentration des décès dans les tours de contrôle, ainsi que l'examen de l'étude de danger du site de Hassi R'mel, et des résultats de l'analyse des risques par la méthode *HAZard and OPerability* (HAZOP) et l'étude *Layer Of Protection Analysis* (LOPA), nous ont permis de constater que les tours de contrôle sont les plus vulnérables aux explosions.

Pour ces raisons, la nécessité de concevoir des tours de contrôle résistantes aux effets d'explosion est primordiale ; afin d'empêcher la propagation des explosions accidentelles, de protéger les personnes à l'intérieur et réduire au minimum l'impact sur le fonctionnement de l'usine.

### 3. OBJECTIFS

L'analyse d'un ouvrage exposé à une explosion peut être complexe et coûteuse à effectuer. En effet, il convient de définir explicitement les objectifs de sécurité. Ils sont essentiellement rappelés ci-dessous par ordre de priorité décroissante quelle que soit la construction considérée :

- Sécurité des personnes à l'intérieur de la tour de contrôle ;
- Protection de l'environnement ;
- Sécurité des biens ;
- Réduction des conséquences financières des explosions.

De manière générale, il convient de souligner que la mesure de maîtrise ne doit pas contribuer à accroître le risque initial en raison de sa **vulnérabilité**, ou d'amplifier le phénomène initiateur par un effet domino. La sécurité des personnes comprend aussi bien la protection des personnes pendant le sinistre que la protection post-accidentelle, notamment lors de l'évacuation et de l'intervention des secours.

La protection des biens peut être recherchée en plus de la protection des personnes et peut nécessiter des exigences de résistance particulière notamment certains équipements industriels dont le remplacement est très coûteux ou nécessite des délais d'approvisionnement très longs.

La réduction des conséquences financières des explosions concerne principalement l'impact économique et médiatique d'une catastrophe.

## 4. METHODOLOGIE

Pour atteindre les objectifs prédéfinis ci-dessus, qui sont la protection des tours de contrôles contre les explosions dans les installations pétrochimiques de SONATRACH, Hassi R'mel et pour apporter une réponse à notre problématique, nous allons suivre les étapes suivantes :

- Prendre connaissance du fonctionnement des installations du champ gazier SONATRACH Hassi R'mel, de la vulnérabilité des tours de contrôle aux explosions, et des besoins de protection.
- Analyser les risques d'explosion en identifiant les scénarios d'explosion qui peuvent se produire pour quantifier les effets de surpressions sur la structure concernée.
- Déterminer les charges d'explosions en calculant les charges de souffle pour les différentes faces de la tour de contrôle.
- Sélectionner le système structurel (mode de protection), compatible avec les exigences de performance pour la tour de contrôle, les objectifs prédéfinis et résistant à la charge calculée.
- Dimensionner la structure de protection prédéfinie en utilisant les données du site et les résultats des calculs de charge de l'explosion.

## 5. Présentation de l'entreprise et le champ de Hassi R'mel

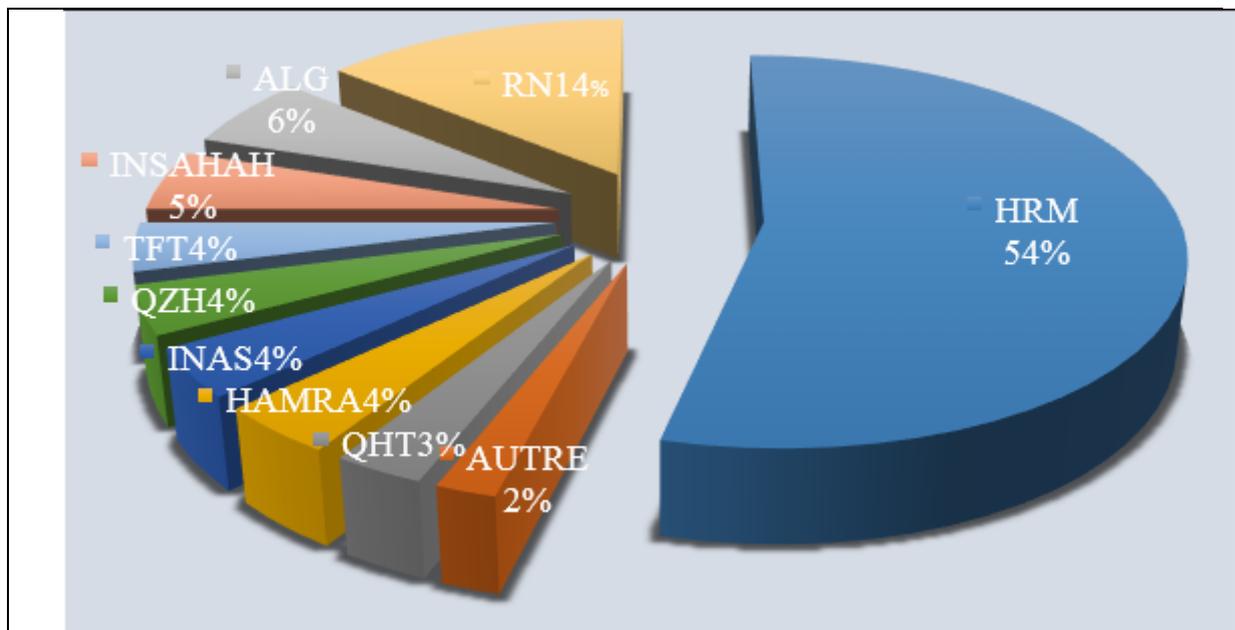


Figure 1 : Répartition des réserves gazières en Algérie (SONATRACH)

L'Algérie possède d'importantes réserves en gaz naturel. Elle est classée au quatrième rang, avec environ 10% des réserves mondiales, et sa production atteindra 151 milliards de m<sup>3</sup> en 2019 (Izouaouen, 2015).

Le champ gazier de HASSI-R'MEL, est le plus grand à l'échelle mondiale. Hassi R'mel, porte du désert, Daïra de la Wilaya de Laghouat, est située à 120 Km de cette dernière et 550 km au Sud d'Alger ; à une altitude de 760 m. Elle s'étend sur 70 km du Nord au Sud et de 50 km d'Est en Ouest sur une surface de 3500 km<sup>2</sup>.

Le paysage est constitué d'un vaste plateau rocailleux. Le climat est caractérisé par une humidité moyenne de 19 % en été, et 34 % en hiver. Les variations de températures sont importantes variant de « - 5°C » en hiver à « 45 °C » en été.

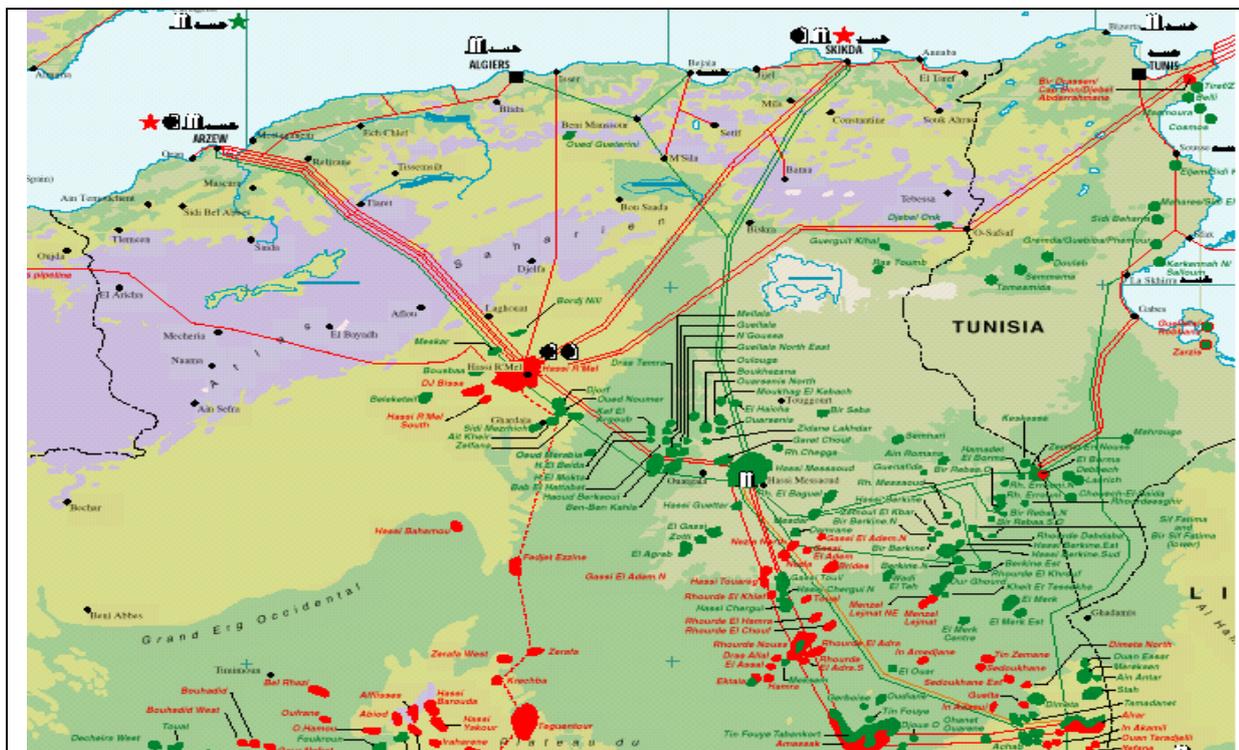


Figure 2 : Situation géographique de Hassi R'mel

### 5.1. Historique

On s'est intéressé à la région depuis 1951 ; le forage du premier puits d'exploitation a eu lieu en 1952 à quelques kilomètres de Berriane. Dans le champ de Hassi R'mel, le premier puits HR1 a été foré en 1956. Ce puits a mis en évidence la présence de gaz riche en condensât, à une

pression de 310 atmosphères et 90 °C. La profondeur atteinte était de 2332 m, révélant la présence d'un réservoir de gaz humide. De 1957 à 1960, huit puits furent forés (HR2, HR3, HR4, HR5, HR6, HR7, HR8 et HR9), mettant à jour l'existence de trois réservoirs.

## 5.2. Développement

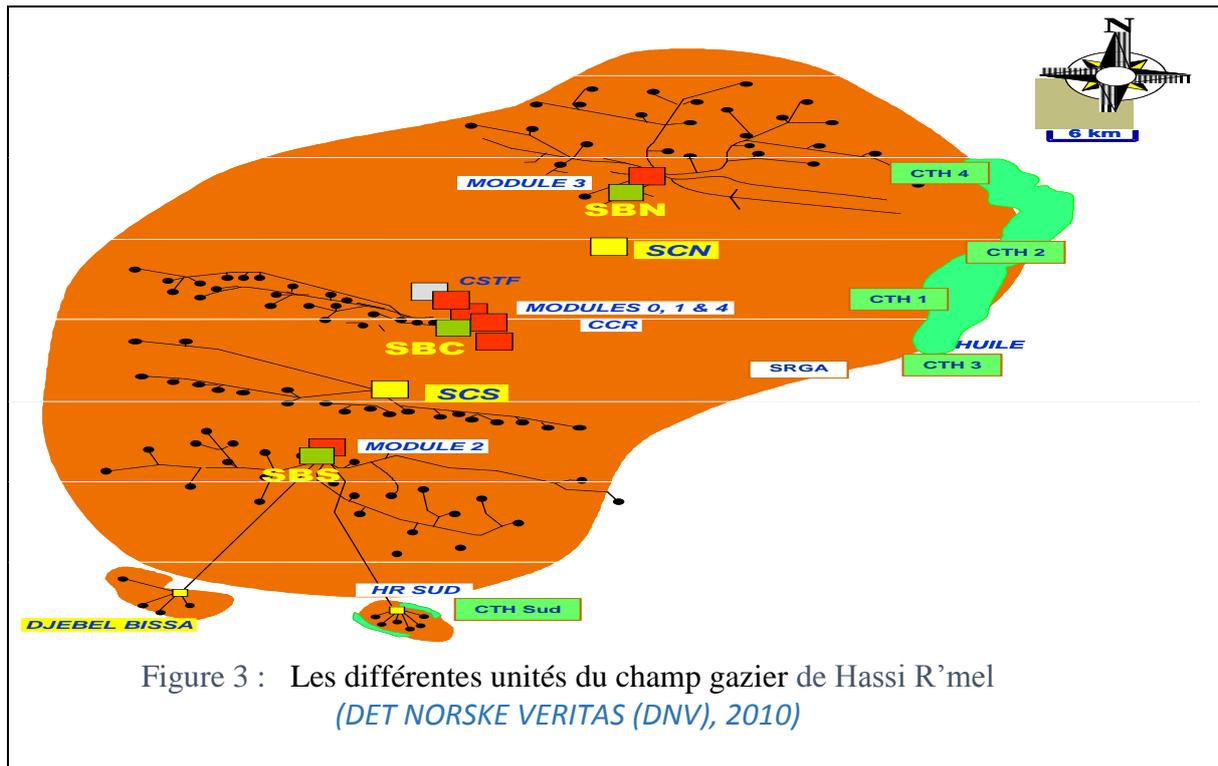
Le développement du champ de Hassi R'mel a été accompli en plusieurs phases (Tableau 1), qui répondent au développement technologique du marché du gaz naturel.

Tableau 1 : Développement du champ de Hassi R'mel

Année	Réalisation
1961	Réalisation de 2 unités de traitement du gaz avec une capacité de 1,3 milliards m <sup>3</sup> / an.
1969	Réalisation de 4 unités supplémentaires pour augmenter la capacité à 4 milliards m <sup>3</sup> / an.
1972- 1974	Réalisation de 6 unités supplémentaires pour arriver à une capacité de 14 milliards m <sup>3</sup> / an.
1975- 1980	Réussir et rendre effectif le plan de développement qui a visé les objectifs suivants : <ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la capacité de traitement du gaz de 14 à 94 milliards m<sup>3</sup>/an.</li> <li>- Maximiser la production du GPL et la récupération du condensât par recyclage partiel du gaz sec.</li> </ul>
1985	Réalisation de l'unité de récupération de gaz d'évasement et production du GPL des modules 0 et 1.
1981- 1993	Réalisation du centre de traitement d'huile.
2000	Démarrage du projet Boosting.
2005	Mise en service du Boosting.
2007	Démarrage de la phase 2 du Boosting.

## 5.3. Description des unités

Le champ de Hassi R'mel, comprend différentes unités représentées sur la Figure 3 :



- Centre de traitement d'huile (CTH)

C'est une unité constituée d'un ensemble d'équipements permettant de séparer tous les constituants indésirables du pétrole brut avant son expédition vers le réseau de transport (dispatching).

- Centre de Stockage et Transfert des fluides (CSTF)

C'est un centre de stockage et de transfert des hydrocarbures liquides. Il est constitué de bacs (réservoirs cylindriques) pour le stockage du condensât, de réservoirs sphériques pour le stockage de GPL, d'un système de jaugeage des bacs, d'un système de comptage des quantités de condensât et de GPL expédiés pour la commercialisation, et d'un ensemble de pompes pour expédier les produits.

- Le Module

C'est le diminutif de «Module Processing Plant » (MPP), qui désigne une unité de traitement constituée d'un ensemble d'équipements conçus et réalisés pour permettre un traitement spécifique du gaz brut. Le but étant de produire du gaz naturel, du condensât et du GPL, conformément à un procédé approprié et répondant aux spécifications commerciales. Les capacités de production des différents modules sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Capacité de production des différents modules (*SONATRACH*)

Produits	Modules I, II, III, IV	Module 0	Djebel Bissa
Gaz sec (Million m <sup>3</sup> /jour)	60	30	6
Condensât (tonnes/ jour)	4800	2500	360
GPL (tonnes/jour)	1800	900	-

- Le Boosting

La pression d'entrée du gaz brut aux modules décroît avec le temps, ce qui influe sur la quantité et la qualité des produits de chaque catégorie, et sur les unités de traitement de gaz car ils sont conçus pour fonctionner à une pression minimale de 100 Bars à l'entrée.

Le rôle des stations de Boosting est la compression de ces gaz bruts issus des puits afin d'avoir une détente importante, donc une meilleure séparation.

## 6. PROCESS ET INSTALLATIONS

Le traitement du gaz naturel se fait dans des installations spécifiques selon des process bien définis. Un aperçu sur les installations et le process utilisés au niveau du champ de Hassi R'mel est donné dans ce qui suit.

### 6.1. Présentation du module 1

Le module 1 a été conçu et mis en service en 1978. Sa tâche principale est le traitement du gaz brut et la récupération du maximum de condensât.

Le module 1 est divisé en trois trains où l'on traite le gaz brut. Etant donné que les trois trains sont identiques, dans ce qui suit nous allons nous intéresser uniquement au train 2, car il peut être le siège du scénario d'explosion le plus important en raison des ondes d'explosions perpendiculaires qu'il génère et dont la cible directe est la tour de contrôle.

Comme pour tous les modules, il y a une salle de contrôle dotée d'un système DCS (Distribution Contrôle Système). Elle assure le contrôle des trois trains ainsi que la section des utilités.

En plus des trois trains, il y a une unité de préparation et régénération de glycol, une unité des utilités (air instrument et air service, eau anti-incendie, eau de refroidissement), et enfin une unité de stockage.

### 6.2. Capacité de production

Le module 1 (MPP1) possède une grande capacité de production répartie comme suit :

- 60 millions de m<sup>3</sup> / jour de gaz sec.
- 10 000 tonnes /jour condensât.
- 2000 tonnes/ jour de GPL.

### **6.3. Procédé Prichard**

Le traitement du gaz naturel se fait par le procédé de PRICHARD qui utilise une série d'échangeurs gaz/gaz, et des Chiller pour refroidir le gaz avant d'être détendu adiabatiquement au niveau de la vanne Joule Thomson. Les liquides récupérés sont débarrassés des légers au niveau d'un dé-éthaniseur puis fractionnés en GPL et condensât dans un dé-butaniseur.

### **6.4. Description du procédé de traitement du gaz naturel**

Les installations du Module Processing Plant 1 (MPP1), sont composées de deux sections (SONATRACH)

- Section de séparation (Haute pression).
- Section de stabilisation (Basse pression).

Le schéma descriptif de ces installations est donné dans la figure 4 et le process de traitement du gaz naturel est détaillé dans les paragraphes suivants.



par le diffuseur d'arrivée V-201 aux trois trains parallèles. Le gaz pénètre dans le séparateur d'admission V-202 sous le contrôle de la vanne de pression PV-7 à une pression de 102 bars et une température d'entrée de 63 °C pour séparer le liquide du mélange d'alimentation et extraire l'eau libre qui est évacuée vers le puisard S-210 sous le contrôle de la vanne LV-1.

Les hydrocarbures liquides en petite quantité provenant du séparateur d'admission V-202 ainsi que les liquides envoyés de la station Boosting à travers la FIC-931 et qui constituent la plus grande quantité, sont détendus isothermiquement à 27 bars dans le séparateur de condensât V-203. Les vapeurs issues de ce dernier sont envoyées vers la colonne T-201 sous le contrôle de la vanne de pression PV-9. Le liquide provenant du séparateur de condensât V-203 contrôlé par la vanne de débit FV-12, est envoyé au 18<sup>ème</sup> plateau du dé-éthaniseur T-201, après avoir été chauffé dans l'échangeur E-216 côté calandre. Le gaz brut provenant du séparateur V-202 est déshydraté et refroidi simultanément dans l'échangeur de chaleur constitué de deux batteries d'échangeurs (gaz/gaz) E-201, E-202 (A/B/C/D) et (gaz/liquide) E-203(A/B) à une température de 0°C à -2 °C. Le gaz sortant des échangeurs passe dans deux Chiller (E-204 et E-205) utilisant du propane comme fluide frigorigène.

La déshydratation du gaz d'alimentation est effectuée par l'injection directe, d'une solution de di-éthylène glycol (DEG) à 78% dans la plaque tubulaire de chaque échangeur et d'une manière uniforme afin d'éviter la formation des hydrates. A la sortie des Chiller, les gaz sont détendus isenthalpiquement à une pression de 78 bars et une température de -18 °C entraînant une séparation gaz/ liquide. La température finale du séparateur froid V-204 est suffisamment basse afin que la teneur en eau du gaz de vente soit inférieure à 50 ppm. Le gaz récupéré du séparateur froid V-204 refroidit à contre-courant le gaz brut dans l'échangeur E-201 et E-202 pour récupérer les frigories qu'il contient. Une fois réchauffé, il pénètre dans le pipeline de gaz de vente à une pression de 72 bars et une température de 60°C.

Le liquide (mélange de condensât et de glycol) issu du séparateur froid V-204 est préchauffé dans l'échangeur gaz/liquide (E-203) côté calandre à une température de 30 °C et une pression de 26 bars. Le liquide est ensuite admis dans le séparateur V-205, où se produit une séparation triphasique (gaz- condensât- glycol hydraté). Le condensât et le gaz sont envoyés au 18<sup>ème</sup> plateau du dé-éthaniseur T-201 sous le contrôle de la vanne de débit FV-32 et la vanne de pression PV-13B respectivement, alors que le glycol hydraté est envoyé vers l'unité de régénération du glycol à travers la vanne de niveau LV-8.

#### **6.4.2. Zone de récupération du GPL et de stabilisation du condensât (Basse pression)**

Cette zone a pour but de stabiliser le condensât et de produire du GPL à partir du liquide récupéré du gaz brut dans la zone de séparation du condensât, suivant les spécifications et les normes établies pour chaque produit. Le condensât stabilisé provenant du dé-butaniseur est refroidi dans les Chiller E-208 et E-209 par du propane. Il est ensuite admis au sommet du dé-éthaniseur T-201 pour une meilleure récupération des C<sup>3+</sup> entraînés par les vapeurs. Ces vapeurs de tête du dé-éthaniseur (gaz M.P) sont envoyées vers la PHASE B pour être re-comprimées et réinjectées dans le gaz de vente.

Le reflux latéral du dé-éthaniseur est assuré par la pompe P-202 A/B, et son refroidissement est obtenu dans le Chiller E-207. Le réfrigérant nécessaire aux Chiller est fourni par un système de réfrigération au propane.

Le rebouillage latéral du T-201 est assuré par le E-206 à contre-courant côté calandre avec les produits de fond du dé-butaniseur T-202. Le rebouillage principal est fourni par le rebouilleur du dé-éthaniseur H-201 à l'aide des pompes P-201 A/B/C.

Les produits de fond du dé-éthaniseur T-201 sont préchauffés dans l'échangeur de préchauffe de charge E-217 côté calandre puis envoyés vers le dé-butaniseur T-202.

Les produits de tête provenant du T-202 sont condensés dans l'aérocondenseur E-211 à une température de 54°C. Le GPL liquide est ensuite collecté dans un ballon de reflux du dé-butaniseur V-209, puis pompé par la pompe de reflux P-205 A/B/C. Une grande partie de ce liquide est utilisée comme reflux pour le dé-butaniseur et le reste comme production vers le stockage du (CSTF), ou vers le stockage du module IV. Le rebouillage du fond de la même colonne est fourni par le rebouilleur du dé-butaniseur H-202 par la pompe P-204 A/B.

Les produits du fond « condensât stabilisé » du dé-butaniseur T-202 sont refroidis partiellement dans le E-217 pour préchauffer la charge du dé-butaniseur (côté calandre), puis dans le E-206 pour le rebouillage latéral du dé-éthaniseur, mais aussi dans l'échangeur E-216 pour préchauffer la charge de la même colonne (côté calandre), et enfin dans l'aéroréfrigérant E-210 ou ils sont refroidis à environ 45°C. Le condensât stabilisé transite par le V-208 d'où une partie est pompée par les pompes P-203 A/B et envoyé dans la tête du dé-éthaniseur comme huile d'absorption. Le reste est envoyé au stockage intermédiaire de condensât du module (S-204A/B/C.), ou directement vers CSTF.

# **Chapitre II**

## **CHAPITRE II                    CONTEXTE REGLEMENTAIRE ET ETUDE LOPA**

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu sur la réglementation relative à la protection des tours de contrôle contre les explosions, ainsi que l'étude LOPA appliquée au module MPP1 du site gazier de Hassi R'mel, où nous nous sommes intéressés uniquement aux scénarios qui touchent la salle de contrôle.

### **1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE**

Les besoins en matière de résistance des structures aux explosions sont le plus souvent issus d'exigences réglementaires. Cette réglementation est variée et concerne plusieurs domaines : (INERIS, 2007)

- **Règlementation du travail :**

Les directives ATEX [1999/92/CE], [94/9/CE], transposées en droit français comportent 6 exigences : évaluation des risques d'explosion, prévention des explosions et protection contre leurs effets, classement en zones, document relatif à la protection contre les explosions, mesures techniques et organisationnelles, disposition particulières pour les équipements. Deux de ces exigences, évaluation et protection, nécessitent fréquemment une étude en résistance des structures aux explosions.

- **Règlementation environnementale :**

• **Etude de dangers :** La réglementation relative aux installations classées (IC) (livre V titre I du code de l'environnement et décret 77-1133 du 21 septembre 77) impose de réaliser une étude de danger (EDD) qui est articulée autour d'une analyse de risques. En complément de celle-ci, plusieurs points, fréquemment retrouvés dans l'étude de danger, peuvent nécessiter des compétences en résistance des structures :

- ✓ Identification des enjeux : il peut être utile de connaître la vulnérabilité des bâtiments et des structures afin de les retenir comme enjeux (cibles) potentielles ;
- ✓ Identification des potentiels de dangers : pour certains phénomènes dangereux (éclatement...) l'intensité des effets est directement proportionnelle aux caractéristiques mécaniques de la structure à l'origine du phénomène ;

• **Plan de prévention des risques technologiques :** La loi « risques » du 30 juillet 2003, relative à la prévention des risques technologiques et naturels et la réparation des dommages, a

étendu le champ d'application des outils existants, et créé une nouvelle approche de la maîtrise de l'urbanisation autour des installations à risques soumises à autorisation avec servitudes, équivalentes aux installations dites « SEVESO seuil haut », et relevant de l'article L515.8 du code de l'environnement. Le plan de prévention des risques délimite, autour des installations classées concernées, des zones à l'intérieur desquelles des prescriptions peuvent être imposées aux constructions existantes ou futures, dans le but de protéger les personnes. La connaissance de la résistance des structures aux actions accidentelles permet alors de définir des principes de protection des populations qui peuvent être mis en œuvre à travers une adaptation du bâti.

## **2. ETUDE LOPA (LAYER OF PROTECTION ANALYSIS)**

L'objectif de cette étude est de fournir la méthodologie de l'analyse des couches de protection (LOPA) du module MPP-1 du champ gazier de Hassi-R'Mel, SONATRACH, Algérie.

### **2.1. Définitions**

- **Système Instrumenté de sécurité (SIS) :** C'est une couche de protection instrumentée composée de capteurs, solveurs logiques, et d'éléments de contrôle final dans le but de faire avancer le processus à un état de sécurité lorsque les conditions prédéterminées sont violés. D'autres termes sont couramment utilisés tels que système d'arrêt d'urgence (ESD) et système de verrouillage de sécurité (JGC Corporation, 2007).
  
- **Layer Of Protection Analysis (LOPA) :** C'est une méthode semi-quantitative pour évaluer l'adéquation des couches de protection et déterminer les exigences de performance pour le SIS.
  
- **Basic Process Control System (BPCS) (Système de contrôle de processus de base) :** C'est l'équipement et le système de contrôle installés pour réguler les fonctions normales de production (CCPS (Center for Chemical Process Safety), 2001).
  
- **Couche de protection indépendante (IPL) :** C'est une couche de protection indépendante de toutes les autres couches de protection pour un risque donné. Il ne devrait y avoir aucune défaillance de cause commune ou défaillance de mode commun qui se traduit par la perte de la protection offerte par cette couche de protection et toutes les autres couches de protection) (CCPS (Center for Chemical Process Safety), 2001).

- **Probabilité de défaillance par demande (PFD)** : C'est la probabilité qu'un système ou sous-système défaillant réponde avec succès à une demande (CCPS (Center for Chemical Process Safety), 2001).

- **Target Mitigated Event Likelihood (TMEL)** : Ce sont Les critères de risque établis qui doivent être attendus afin d'assurer la fonction du processus qui dispose de garanties suffisantes (JGC Corporation, 2007).

- **Vulnérabilité** : C'est la probabilité que les personnes soient touchées au niveau défini pour un TMEL sélectionné si un risque se produit. Cela inclut la probabilité d'allumage pour la libération de matières inflammables et la probabilité que des personnes soient présentes à l'intérieur de la zone de danger (JGC Corporation, 2007).

## 2.2. Méthodologie d'analyse des couches de protection (LOPA)

Le processus de LOPA se déroule selon les étapes suivantes (JGC Corporation, 2007)

### 2.2.1. Définition des scénarios des risques à étudier par LOPA

Il s'agit de filtrer les scénarios de danger pour l'étude LOPA en fonction des résultats de l'étude HAZard and IDentification HAZID (et/ou autres méthode d'analyse de risques telle que HAZOP).

### 2.2.2. Conséquence de sécurité, niveau de sécurité et de TMEL

Il faut identifier pour chaque scénario les conséquences en matière de sécurité et décider du niveau de gravité requis et du TMEL pour la sécurité. La méthode LOPA doit utiliser les TMELs suivants (Tableau 3) pour la sécurité.

Tableau 3 : Niveau de gravité et TMEL des conséquences de sécurité  
(JGC Corporation, 2007)

Degré de gravité	Conséquences de sécurité	TMEL
1	Conséquence limitée à des blessures mineures	Aucune exigence particulière
2	Événement, Impact pouvant causer des blessures graves ou une invalidité	$1 \times 10^{-3}$ par an
3	Événement, impact qui conduit à un seul décès sur place	$1 \times 10^{-4}$ par an
4	Événement, impact qui conduit à plus d'un décès sur place	$1 \times 10^{-5}$ par an

### 2.2.3. Identification des causes de danger

L'équipe en charge de l'étude LOPA quantifie la probabilité de défaillance pour chaque cause initiale. Le tableau 4 fournit des valeurs par défaut pour la probabilité de défaillance des causes.

Tableau 4 : Causes initiées et probabilités de défaillance  
(JGC Corporation, 2007)

Causes Initiées IC	Probabilité de défaut (événements par an)
BPCS échec de la boucle d'instrument	$1 \times 10^{-1}$
Défaillance du régulateur	$1 \times 10^{-1}$
Défaillance d'un équipement fixe (par exemple défaillance du tube d'un échangeur)	$1 \times 10^{-2}$
Pompes et autres équipements rotatifs	$1 \times 10^{-1}$
Manque d'eau de refroidissement (pompes redondantes, divers pilotes)	$1 \times 10^{-1}$
Perte de puissance (alimentations redondantes)	$1 \times 10^{-1}$
Erreur humaine - (tâche de routine, une fois-par-jour)	$1 \times 10^0$
Erreur humaine - (tâche de routine, une seule fois par mois)	$1 \times 10^{-1}$
Erreur humaine - (Tâche Non-Routine, faible stress)	$1 \times 10^{-1}$
Erreur humaine - (Tâche Non-Routine, stress élevé)	$1 \times 10^0$
Joint / emballage à souffler	$1 \times 10^{-2}$
Survitesse du moteur à turbine / diesel avec boîtier violation	$1 \times 10^{-4}$
Intervention d'une tierce partie (impact externe par pelle rétro caveuse, véhicule, etc.)	$1 \times 10^{-2}$
Grue chute de charge	$1 \times 10^{-4}$ par ascenseur
Foudre	$1 \times 10^{-3}$
Soupape de sécurité ouverte par faute	$1 \times 10^{-2}$
Défaut d'étanchéité d'une pompe	$1 \times 10^{-1}$
Rupture d'un tuyau de déchargement / chargement	$1 \times 10^{-1}$
Petit feu extérieur (causes globales)	$1 \times 10^{-1}$

Grand feu extérieur (causes globales)	$1 \times 10^{-2}$
Procédure LOTO (lock-out tag-out) * échec * Échec global d'un processus à plusieurs éléments	$1 \times 10^{-3}$ par opportunité
Echec de l'opérateur (pour exécuter la procédure de routine, en supposant qu'il est bien formé, sans contrainte, et qu'il n'est pas de fatigué)	$1 \times 10^{-2}$ par opportunité
Autres événements initiateurs	Développer en utilisant l'expérience du personnel

#### 2.2.4. Quantification individuelle de chaque cause de danger

- Identifier les couches indépendantes de protection (IPL) pour chaque danger

Les couches de protection doivent répondre aux quatre critères suivants afin d'être pris en compte dans LOPA :

- ✓ La couche de protection est spécialement conçue pour prévenir ou atténuer les conséquences d'un scénario potentiellement dangereux ;
- ✓ La couche de protection doit être fiable ;
- ✓ La couche de protection est (sera) conçue de sorte qu'elle peut être contrôlée ;
- ✓ Chaque couche de protection comptée doit être véritablement indépendante des autres couches de protection. Cela signifie qu'aucune cause de défaillance commune ou défaillance de mode commun ne peut désactiver deux ou plusieurs couches de protection.

- Quantifier la PFD pour chaque IPL

L'équipe de l'étude LOPA élabore la probabilité de défaillance à la demande (PFD) pour chaque couche de protection indépendante. Les valeurs de PFD sont fournies dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Probabilité de défaillance à la demande (PFD) des Couche de protection indépendante (IPL) (*JGC Corporation, 2007*)

Couche de protection indépendante IPL	Probabilité de défaillance par demande PFD
Système de commande de processus de base, s'il n'est pas associé à l'événement initiateur envisagé	$1 \times 10^{-1}$
Action de l'opérateur sur l'alarme en fonction d'un temps d'au moins 10 minutes de réaction.	$1 \times 10^{-1}$
Soupape de sécurité	$1 \times 10^{-2}$
Disque de rupture	$1 \times 10^{-2}$
Parafoudres flamme / détonation	$1 \times 10^{-2}$
Digue	$1 \times 10^{-2}$
Système de drainage souterrain	$1 \times 10^{-2}$
Évent ouvert (pas de soupape)	$1 \times 10^{-2}$
Ignifugation	$1 \times 10^{-2}$
Explosion-mur / bunker	$1 \times 10^{-3}$
Équipement redondant identique	$1 \times 10^{-1}$ (crédit max)
Équipement redondant diverse	$1 \times 10^{-1}$ à $1 \times 10^{-2}$
D'autres événements	Utilisez l'expérience du personnel

- Identifier et quantifier les facteurs de vulnérabilité
  - ✓ **Personne Présente**

Pour être considérée comme un scénario lié à la sécurité, une personne doit être dans la zone où le danger peut se produire.

Les facteurs de vulnérabilité suivants doivent être appliqués :

VFp = 1,0 si les gens sont présents tout le temps ;

VFp = 0,5 si les gens sont présents depuis moins de 12 heures par jour ;

VFp = 0,1 si les gens sont présents depuis moins de 1 à 2 heures par jour.

✓ **Probabilité d'allumage**

Pour qu'un incendie ou une explosion, soit qualifié comme un risque, les produits libérés doivent être allumés. La probabilité d'inflammation est généralement fonction de la taille du nuage et du type de matériau libéré. Les facteurs de vulnérabilité suivants devraient être utilisés pour la probabilité d'inflammation :

$V_{Fi} = 1$  pour un matériau libéré au-dessus de la température d'auto-inflammation et pour un matériel pyrophore ;

$V_{Fi} = 0,1$  pour les rejets de liquides lourds ;

$V_{Fi} = 0,2$  pour les liquides volatils ;

$V_{Fi} = 0,3$  pour les liquides/ gaz inflammables.

**2.2.5. Calcul de la probabilité totale réduite et vérification de l'intégrité de sécurité**

Pour chaque scénario, la probabilité totale réduite est calculée par l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^n (ICL_i * PFD_{1i} * PFD_{2i} * \dots) * VFp * VFig \quad (2.1)$$

Où :

TMEL = la probabilité de l'événement cible mitigé pris de la table indiquée

ICL = Probabilité de défaillance de cause initiée (tableau 4)

PFD = Probabilité de défaillance par demande pour chaque IPL (tableau 5)

VFig = Facteur de vulnérabilité pour la probabilité d'inflammation

VFp = Facteur de vulnérabilité pour la probabilité des personnes présentes

n = Nombre de causes

Si la probabilité réduite totale est inférieure ou égale au TMEL, les couches de protection existantes sont appropriées et le scénario "passe LOPA".

Si la probabilité réduite totale est supérieure au TMEL, les couches de protection existantes sont insuffisantes et nécessiteront des mesures d'atténuation supplémentaires par la mise en place de couche de protection.

### **2.2.6. LOPA Worksheets (feuille d'étude de LOPA)**

Les feuilles d'étude LOPA sont préparées pour l'enregistrement de résultats de l'étude conformément aux instructions.

Lorsque les dangers potentiels sont identifiés, des mesures correctives seront recommandées en fonction de la nature du danger et ses conséquences. Si une solution immédiate ou garantie suffisante est disponible et acceptable pour l'équipe, elle doit être enregistrée dans la feuille de LOPA.

### **2.3. Application de la méthode LOPA au module MPP1 du site Hassi-R'Mel**

L'étude LOPA (Layer Of protection Analysis) a été réalisée au niveau l'usine d'exploitation du module MPP1 du champ gazier de Hassi-R'Mel, Algérie. Elle a été réalisée en utilisant l'approche systématique des couches de protection.

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés seulement au cas de l'explosion de gaz par défaut dans le ballon de GPL

La feuille de travail de LOPA concerne les principaux éléments liés au scénario catastrophique choisi avec plusieurs membres de SONATRACH. Seuls les scénarios qui concernent la tour de contrôle ont été pris en considération.

### **2.4. Résultats de l'étude**

La feuille d'étude de LOPA est donnée en annexe 1. L'étude a abouti à un total de 5 recommandations qui sont les suivantes :

- Modifier le bâtiment de la tour de contrôle par des constructions résistant à l'explosion ou installer un blast proof (mur de souffle) ;
- Installer un System d'instrument de sécurité pour l'arrêt de chaque four par détection des gaz à l'entrée d'air du four ;
- Fournir de l'eau pulvérisée pour une couverture complète avec confirmation d'une extinction pendant 2 heures ;
- Réaliser une pente du fond du réservoir au bord de réservoir ;
- Installer une ligne d'injection d'eau dans le réservoir inférieur de GPL.

Tous ces éléments sont recommandés pour prévenir les risques catastrophiques et améliorer la sécurité des installations du MPP1.

Les éléments qui ont été évalués comme première priorité par SONATRACH dans le suivi des recommandations, devraient être mis en œuvre dans l'année.

Le résultat le plus important pour notre problématique expliqué par cette étude LOPA est que les salles de contrôle sont les plus vulnérables aux effets de surpressions des explosions. A cet effet, le chapitre suivant, aborde les concepts liés aux explosions et les méthodes de calculs des surpressions sur les parois des tours de contrôle.

# Chapitre III

## **Chapitre III LES EXPLOSIONS ET LES TYPES DE PROTECTION**

Dans ce chapitre, nous allons donner un aperçu sur les explosions dans les installations pétrochimique et les différents types de protection utilisés.

### **3. ASPECT THEORIQUE SUR LES EXPLOSIONS**

Le phénomène d'explosion peut être défini par une libération soudaine d'énergie, plus ou moins maîtrisée. Il est donc considéré comme un phénomène dangereux à cinétique rapide au sens de la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) (Duy-Hung Duong, 2012). Il se manifeste principalement par la propagation, à grande vitesse, d'une onde de surpression communément appelée «souffle», mais aussi par la présence d'une boule de feu de courte durée. L'explosion s'accompagne généralement par un dégagement de projectiles.

#### **3.1. Types d'explosion**

Différents phénomènes physiques peuvent donner lieu à des explosions dans l'industrie pétrochimique. Ces derniers peuvent être classés en quatre types (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997) :

- Explosion d'un nuage de gaz (VCE) ;
- Explosions sous pression ;
- Explosions de phases condensées ;
- Explosions de poussières.

##### **3.1.1. Explosion d'un nuage de gaz VCE**

L'explosion d'un nuage de gaz, (Vapour Cloud Explosion : VCE), est une combustion rapide d'un mélange réactif avec l'oxygène de l'air. L'intensité des effets de surpressions liés à la génération de gaz brûlés en grande quantité varie en fonction du régime d'explosion ce qui peut donner lieu à des déflagrations lentes, rapides ou des détonations (ce dernier cas est rare). Le VCE est lié à la vitesse de propagation de la flamme à travers le nuage explosible et dépend principalement (Techniques de l'ingénieur, 2009):

- 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 ;
- Et de la source d'allumage.

Il convient de rappeler qu'une explosion d'un nuage de gaz est la conséquence de l'enchaînement d'événements selon le scénario suivant :

- Libération à l'atmosphère d'une quantité de combustible, à des conditions appropriées de pression ou de température, en phase liquide ou gaz. Ce rejet pouvant être alimenté en continu ou non selon l'origine de la fuite ;
- Evaporation et/ou dispersion dans l'air pour former un mélange explosible (nuage de gaz);
- Inflammation retardée du nuage de gaz lorsque celui-ci entre en contact avec une source d'allumage suffisante. La taille maximale du nuage inflammable est généralement atteinte en 30 à 60 secondes [livre].

L'enchaînement des événements consécutifs à une fuite de gaz ou de liquide est présenté sur la figure 5.

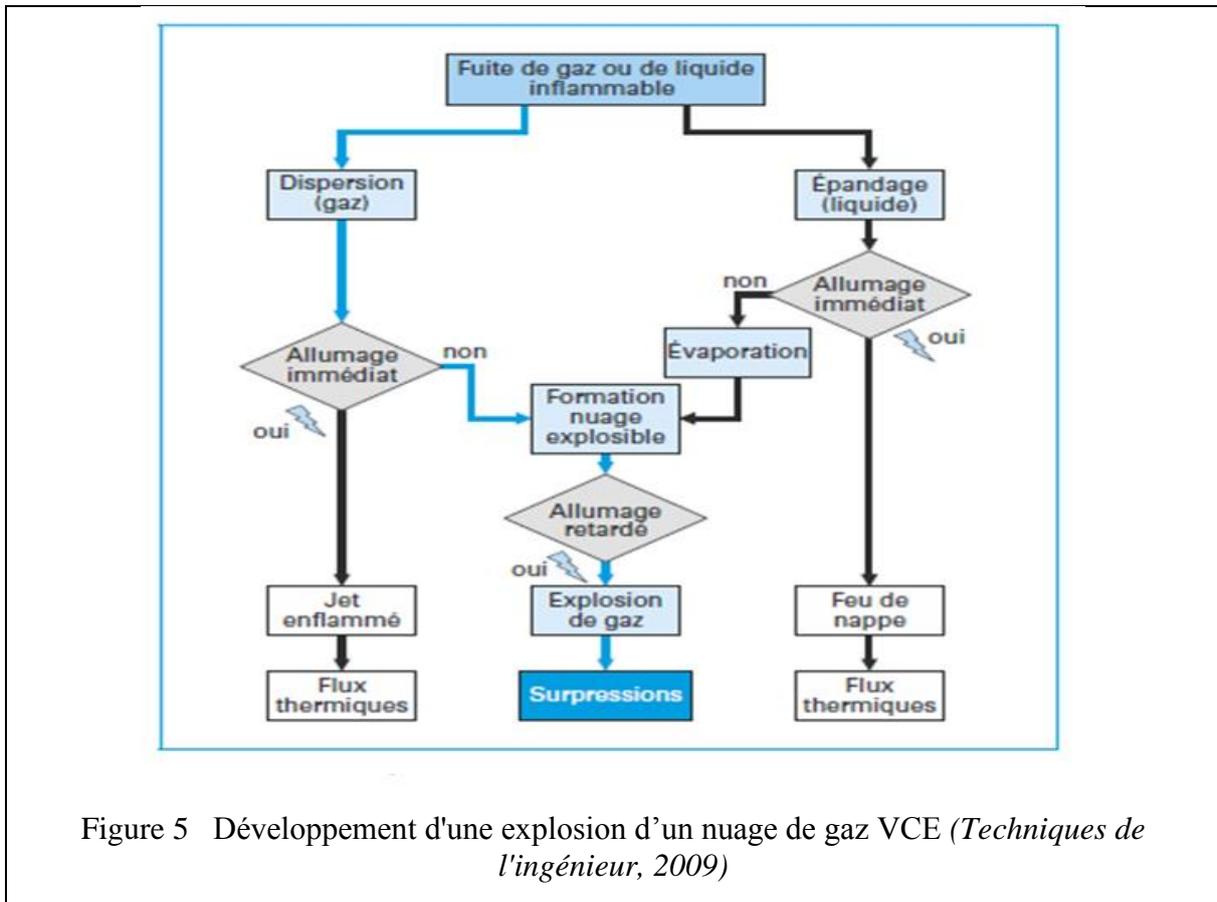


Figure 5 Développement d'une explosion d'un nuage de gaz VCE (*Techniques de l'ingénieur, 2009*)

L'onde de surpression générée par une explosion de gaz non confiné est nettement moins intense que dans le cas des explosifs solides. Elle peut atteindre tout au plus quelques bars, mais en revanche sa durée peut atteindre plusieurs centaines de millisecondes selon le régime de la déflagration gazeuse.

### 3.1.2. Éclatement de capacité sous pression

Une explosion peut aussi être de type pneumatique, c'est-à-dire liée à la rupture brutale d'une capacité de gaz sous pression. Ces capacités peuvent être des ballons ou des réservoirs. L'éclatement libère brutalement une grande quantité d'énergie stockée sous pression.

Différentes causes peuvent conduire à la rupture de l'enveloppe. Parmi celles-ci, on pourra retenir une agression mécanique ou thermique, une fragilisation de l'enveloppe (corrosion) ou encore un remplissage excessif (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997).

Dans les usines pétrochimiques, les explosions de capacité peuvent se présenter sous plusieurs sous-types :

- Déflagrations et détonations de gaz purs non mélangés avec des oxydants : l'acétylène est un exemple de gaz qui peut subir une décomposition auto-entretenue qui libère de l'énergie. Il peut brûler avec l'oxygène de l'air et donner lieu à une déflagration ou une détonation. Seul, sans oxygène, il peut également déflagrer ou exploser.
- Les combustions, déflagrations et détonations dans les enceintes : celles-ci peuvent être alimentées par un liquide, des combustibles gazeux, ou des particules de poussières (voir Explosions de poussière, ci-dessous). Si une paroi est trop faible pour supporter la pression résultant de la combustion, elle explose.
- Les réactions d'emballement : de nombreuses réactions chimiques industrielles sont exothermiques, elles libèrent de l'énergie. Certaines réactions peuvent favoriser l'accélération des conditions de l'explosion si l'énergie libérée n'est pas retirée assez vite. Si une enceinte de confinement a des capacités de ventilation insuffisantes, une augmentation de pression peut se produire. Si cette pression dépasse les capacités de pression de la cuve, celle-ci explose.
- Surpressions simples de l'équipement avec un contenu gazeux non réactif : elles sont aussi appelées explosions mécaniques. La rupture des réservoirs dus à la surpression peut se produire si une erreur humaine ou des pannes d'équipement auxiliaires entraînent une pression interne trop haute.

- Des explosions physiques en phase vapeur : elles se produisent lorsque deux courants de températures très différentes se mélangent brusquement, de sorte qu'il y a génération d'une pression au-delà de la capacité de charge du réservoir.
- Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions (BLEVE) : Le phénomène de BLEVE est produit par la vaporisation quasi instantanée d'un liquide sous pression, surchauffé, et libéré brutalement à l'atmosphère. Dans le cas d'un produit inflammable, la détente conduit à la formation d'une boule de feu dont les effets thermiques sont particulièrement destructeurs. Ils s'accompagnent d'une onde de choc qui se propage dans l'environnement ainsi que de projectiles issus de l'enveloppe. Ce sont principalement les installations de stockage de gaz de pétrole liquéfiés (GPL) qui peuvent être soumises à ce type d'accident. Ce phénomène est généralement dû à un incendie externe de longue durée, entraînant à la fois une réduction de la résistance de l'enveloppe et l'élévation de la pression interne du fluide résultant de l'échauffement.

### 3.1.3. Explosions de phases condensées

Le phénomène d'explosion en phases condensées (liquide ou solide) est souvent désigné sous différents vocables qui dépendent des circonstances dans lesquelles il intervient.

On parle d'**explosion thermique** pour signifier qu'un phénomène exothermique s'est développé conduisant à une explosion.

L'expression **emballement thermique**, rencontrée fréquemment, se rapporte à une réaction particulière qui peut être aussi une décomposition exothermique d'une substance.

On parle aussi d'**emballement de réaction** lorsqu'il s'agit de la perte de contrôle d'une réaction chimique identifiée que l'on était en train de mettre en œuvre dans un procédé. (Techniques de l'ingénieur, 2009)

### 3.1.4. Explosion de poussières

La manipulation de produits pulvérulents entraîne le frottement des grains entre eux ou sur des surfaces rugueuses, ce qui génère la formation de poussières pouvant être inflammables. Les poussières présentent un risque d'inflammation qui, dans certaines conditions, peut entraîner une déflagration plus ou moins violente, car elles présentent une surface de combustion très importante. Ce type d'explosion est directement liée au produit, sa granulométrie, sa concentration, ainsi qu'au milieu (confiné ou non).

L'explosion de poussière résulte des conditions suivantes :

- Présence de poussières fines ( $< 1$  mm) combustibles en suspension, présentant une surface de combustion potentielle très importante (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)
- Présence d'oxygène (air).

La présence dans une suspension de poussière dans l'air, de petites concentrations de gaz inflammable, même bien au-dessous de la limite inférieure d'inflammabilité du gaz, peuvent contribuer à une explosion plus sévère que celle de la poussière seule. De tels mélanges sont appelés mélanges hybrides.

### 3.2. Explosions et ondes de choc

Lors d'une explosion des ondes de choc sont émises. La connaissance des caractéristiques de ces ondes est primordiale pour pouvoir prendre les dispositions nécessaires afin d'en limiter les conséquences.

#### 3.2.1. Caractéristiques d'une onde de choc idéale

Une explosion peut être définie comme une réaction chimique très rapide impliquant un solide, de la poussière ou des gaz, au cours de laquelle il se produit une libération rapide de gaz chauds et d'énergie. Le phénomène qui ne dure que quelques millisecondes, produit de très hautes températures et de pressions. Au cours de la détonation, les gaz chauds se dilatent afin d'occuper l'espace disponible, provoquant des ondes qui se propagent et se transmettent à travers le milieu environnant. L'onde de choc contient une grande quantité d'énergie qui se libère lors de la détonation et se déplace plus vite que la vitesse du son (SOLOMOS, 2011).

La figure 6 montre le profil dans idéal de la pression par rapport au temps pour le cas de la libération d'une onde de choc dans l'air. La pression entourant un élément est initialement égale à la pression ambiante  $P_0$ , et elle subit une augmentation instantanée à une valeur maximale  $P_{s0}$  au temps d'arrivée  $t_A$ . Le temps nécessaire pour que la pression atteigne sa valeur de crête est très faible et à des fins de conception, il est supposé être égal à zéro. Après sa valeur maximale, la pression diminue exponentiellement jusqu'à ce qu'elle atteigne la pression ambiante à  $t_A + t_0$ ,  $t_0$  est appelée la durée de la phase positive. Après la phase positive du diagramme pression-temps, la pression devient inférieure à la valeur ambiante, c'est la phase négative qui est plus longue que la phase positive. La valeur minimale de la pression est notée  $P_{s0-}$  et sa durée est  $t_{0-}$ . Au cours de cette phase, les structures sont soumises à des forces d'aspiration, raison

pour laquelle parfois pendant le souffle les fragments de verre des façades se trouvent à l'extérieur d'un bâtiment.

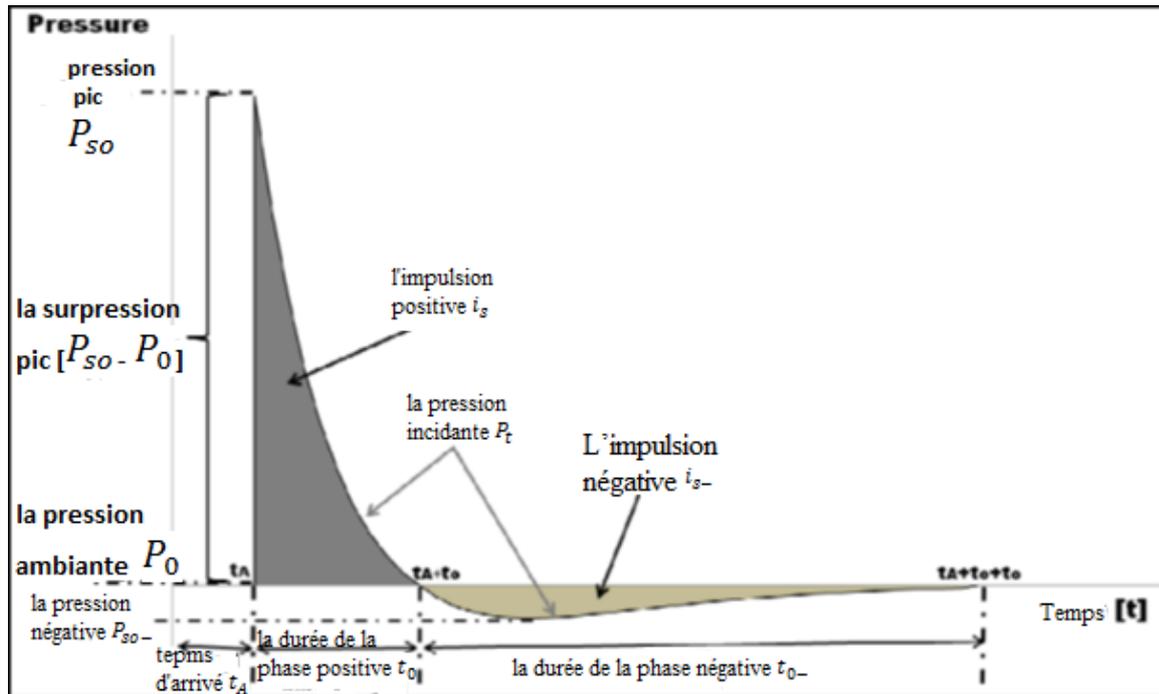


Figure 6 La pression d'une onde de choc idéale en fonction du temps (SOLOMOS, 2011)

La phase négative de l'onde de l'explosion n'est généralement pas prise en compte pour la conception car le principal dommage structurel est relié à la phase positive. En outre, les pressions qui sont produites à partir de la phase négative de l'onde de choc sont relativement petites comparées à celles de la phase positive, de plus elles et sont dans des directions opposées.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 6, la pression d'incidence positive diminue de façon exponentielle. La forme de l'équation de Friedlander suivante a été proposée (SOLOMOS, 2011), et est largement utilisée pour décrire le taux de diminution des valeurs de pression :

$$P_s(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^{-b \frac{t}{t_0}} \quad (1)$$

Où,

$P_{so}$  : Surpression de pointe,

$t_0$  : Durée de la phase positive,

$b$  : Coefficient de décroissance de la forme d'onde,

$t$  : Temps écoulé, mesuré à partir de l'instant d'arrivée de l'explosion.

Le coefficient de décroissance  $b$  peut être calculé par un ajustement non linéaire d'une courbe expérimentale de pression et de temps dans sa phase positive.

Un autre paramètre considéré dans l'onde de choc, est l'impulsion. Elle est définie comme la zone sous la courbe Surpression-Temps de la figure 6. Elle peut être positive ou négative. L'équation (2) donne l'expression dans le cas de l'impulsion positive, elle est plus importante que sa contrepartie négative.

$$i_s = \int_{t_A}^{t_A+t_0} P_s(t) dt \quad (2)$$

Pour l'équation de Friedlander ci-dessus (1), l'impulsion positive peut être analytiquement calculée par l'expression suivante :

$$i_s = \frac{P_{s0} t_0}{b^2} [b - (1 + e^{-b})] \quad (3)$$

Cette équation constitue une alternative pour résoudre de manière itérative le paramètre de décroissance  $b$  lorsque les valeurs de  $i_s$ ,  $P_{s0}$  et  $t_0$  sont connues d'après les données expérimentales.

### 3.2.2. Mise à l'échelle des lois

L'un des paramètres les plus critiques pour les calculs de chargement de l'explosion est la distance entre le point de détonation et la structure d'intérêt. La valeur de pression de pointe et la vitesse de l'onde de choc, diminuent rapidement lorsque la distance entre la source du souffle et la surface de la cible augmente, comme illustré sur la figure 7, où seules les phases positives des ondes de choc sont représentées. Nous remarquons que les durées sont plus longues lorsque la distance entre le point de détonation et la cible augmente.

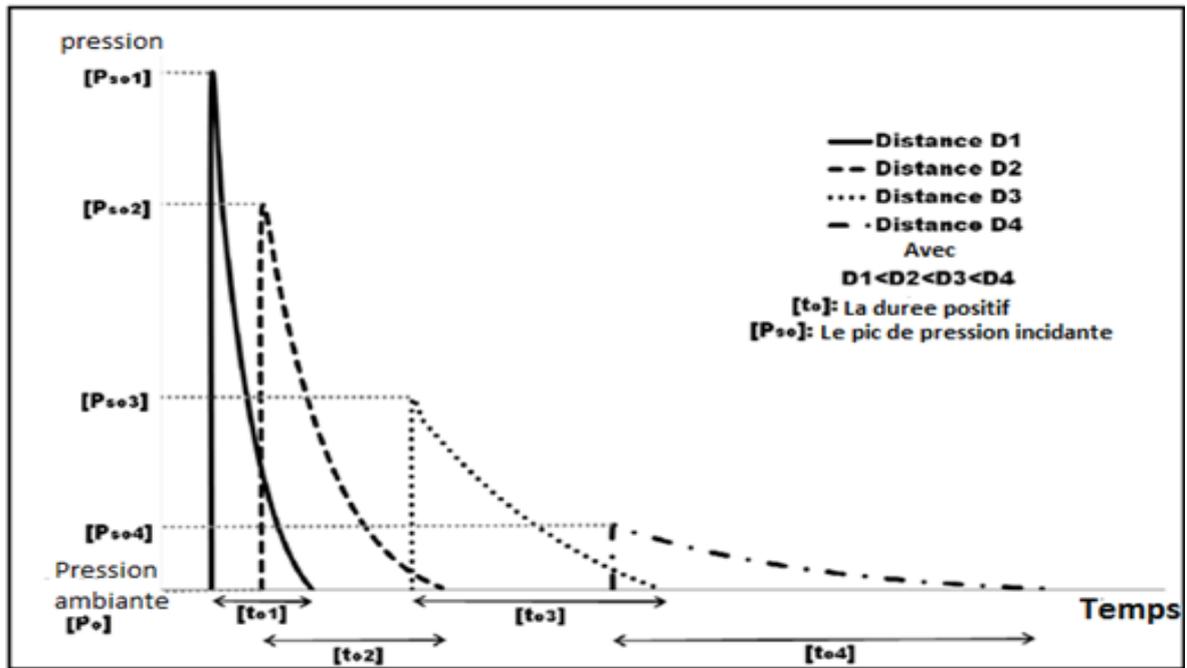


Figure 7 Influence de la distance sur la pression de l'onde de choc de la phase positive (SOLOMOS, 2011)

L'effet de la distance sur les caractéristiques de soufflage peut être pris en compte par l'introduction de lois d'échelle. Ces lois ont la capacité de définir les paramètres d'explosion par des courbes empiriques, afin d'être utilisés pour des valeurs de distance et de charge variables. L'intérêt de ces lois est que lors de la détonation de deux charges d'un même explosif ayant une géométrie similaire, et situées à la même distance mise à l'échelle d'une surface cible, et dans les mêmes conditions atmosphériques, les ondes de choc produites sont semblables au point d'intérêt.

D'après la loi de Hopkinson-Cranz une distance mise à l'échelle par l'équation (4),

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \quad (4)$$

Où,

Z : est la distance mise à l'échelle (m. kg<sup>-1/3</sup>),

R : distance de la source de détonation au point d'intérêt (m),

W : Masse de l'explosif (kg).

### 3.2.3. Types et poids de l'explosif

La première étape dans la conception d'un bâtiment résistant à la charge de l'explosion est la définition du type et du poids de l'explosif. Il existe plusieurs types de matières explosives. Dans le cas de notre étude (installation de pré traitement de gaz), les matières explosives existantes sont le gaz naturel, le GPL et le condensat.

La grande variété de matières explosives a conduit à l'adoption d'une matière universelle, le trinitrotoluène (TNT), utilisé pour tous les calculs nécessaires des paramètres de souffle. Le TNT a été choisi, car la méthode équivalent TNT ne s'applique en toute rigueur que pour l'évaluation des effets de surpression en milieu non confiné. La masse équivalente de TNT est calculée à partir de l'équation (5) qui relie la masse de matière explosive utilisée avec la masse équivalente de TNT en utilisant le rapport entre les chaleurs produites lors de la détonation :

$$W_e = W_{exp} \frac{r \cdot H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} \quad (5)$$

Où :

$W_e$  : Masse équivalente de TNT (kg),

$W_{exp}$  : Masse réelle de la matière explosive (kg),

$r$  : le rendement de l'explosion avec  $r = 0,1$  pour une explosion non confinée,  $r = 0,5$  pour une explosion confinée

$H_{exp}^d$  : Chaleur de détonation de l'explosif réel (MJ. Kg<sup>-1</sup>), (Annexe 3)

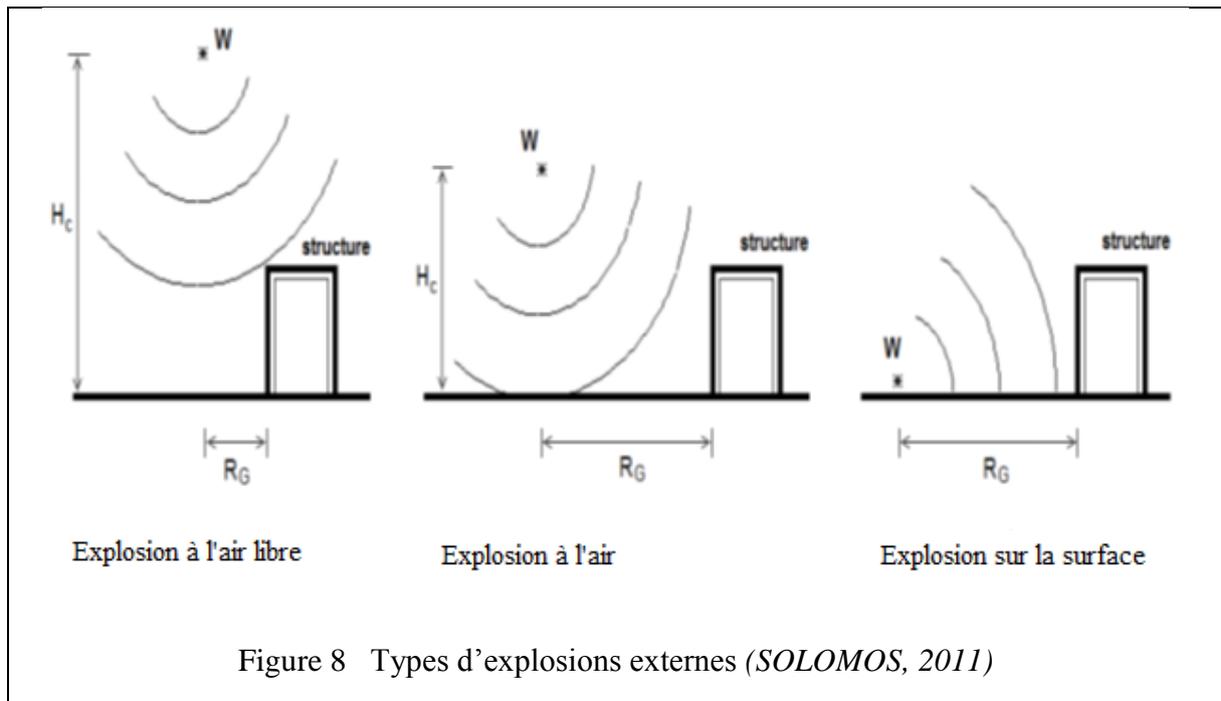
$H_{TNT}^d$  : Chaleur de détonation du TNT (MJ. Kg<sup>-1</sup>) (Annexe 3).

### 3.2.4. Types d'ondes d'explosion

Comme on le voit sur la figure 8, on peut distinguer trois types d'explosion de base. Elles dépendent de la position relative de la source et de la structure, à savoir la hauteur  $H_c$  au-dessus du sol, lorsque la détonation d'une charge  $W$  se produit, et à distance horizontale  $R_G$  entre la projection de l'explosif au sol et la structure. Ces trois types d'explosion sont :

- Explosion à l'air libre : La charge explose dans l'air, les ondes de choc se propagent sphériquement vers l'extérieur et empiètent directement sur la structure sans interaction préalable avec d'autres obstacles ou le sol.

- Explosion à l'air : La charge explose dans l'air, les ondes de choc se propagent sphériquement vers l'extérieur et empiètent sur la structure après avoir interagi avec le sol.
- Explosion sur la surface : La charge explose presque à la surface du sol, les ondes de choc interagissent immédiatement avec le sol, se propagent sous une forme hémisphérique vers l'extérieur et empiètent sur la structure.



### 3.2.5. Ondes de souffle réfléchies

La charge supportée par une structure dépend de divers paramètres, tels que le type et le poids de l'explosif, la distance du point de détonation, la géométrie et le type de la structure, l'interaction de l'onde avec l'environnement et le sol, etc.

Lorsque l'onde de choc entre en contact avec une surface rigide, la pression réfléchie est supérieure à la pression incidente de pic  $P_{so}$  (figure 9). Les ondes de choc fortes sont des phénomènes non-linéaires, donc la réflexion de ces particules est obstruée par des particules

d'air qui y sont transférés, conduisant ainsi à des valeurs de pression réfléchies beaucoup plus importantes.

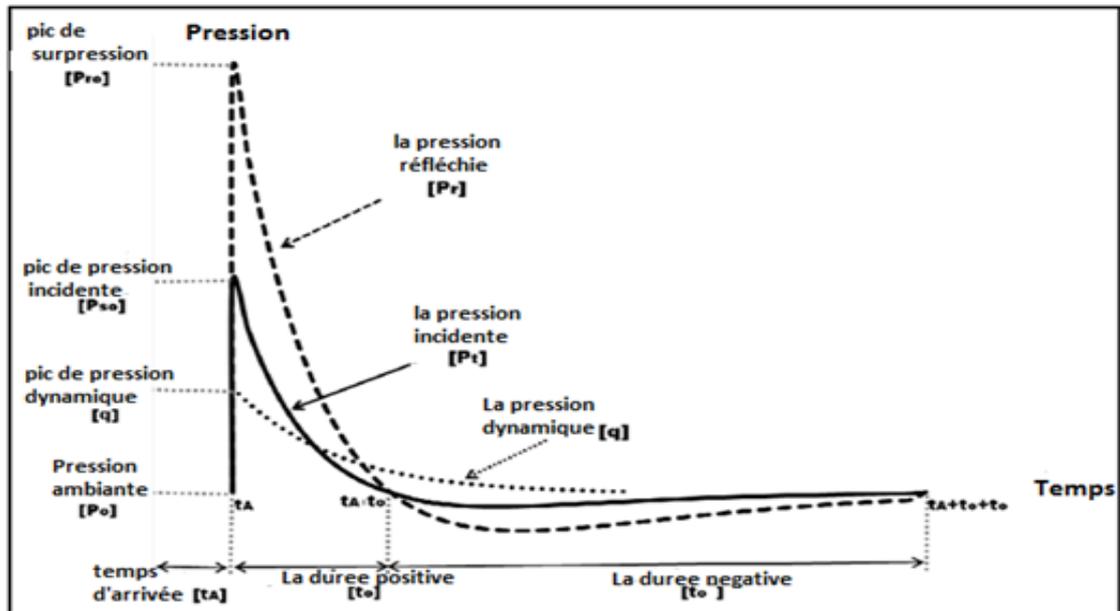


Figure 9 Pressions incidente, réfléchie et dynamique en fonction du temps (SOLOMOS, 2011)

La figure 10 illustre la différence entre la surpression réfléchie et la surpression sur le côté dans le cas d'une explosion à l'air libre sans amplification d'onde. La valeur de la pression réfléchie par la face devient maximale au point de distance normale  $R_A$  entre la source de détonation et la surface.

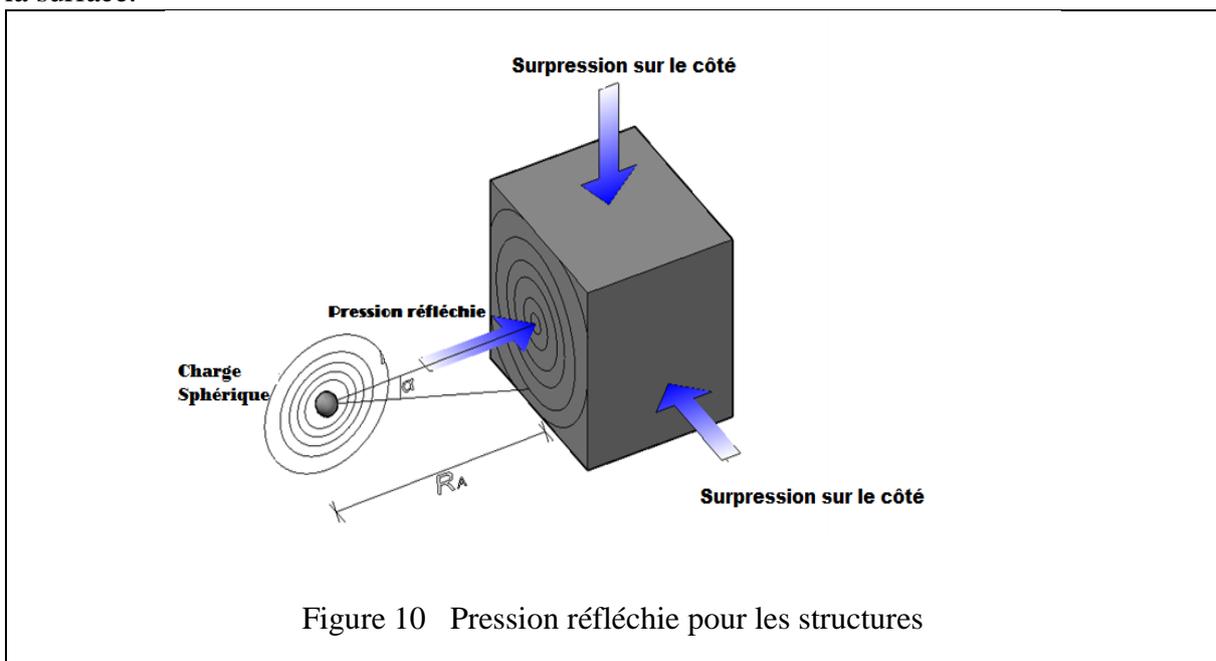


Figure 10 Pression réfléchie pour les structures

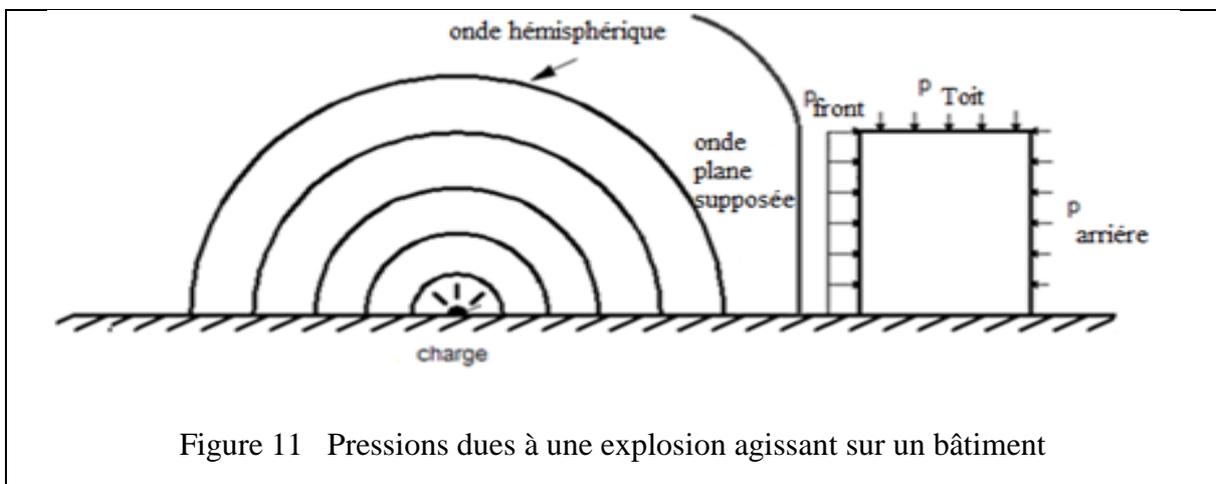
### 3.2.6. Charges sur une structure

Il y a une interaction immédiate entre le sol et l'onde de choc pour les explosions voisines de la terre. Il s'agit d'une explosion de surface hémisphérique.

Lorsque l'onde de choc entre en contact avec un obstacle (structure), exerçant des pressions sur tous les côtés exposés, il est englobé. Dans le cas d'un bâtiment autonome la première onde de choc frappe sa face avant, puis elle diffracte sur le reste de la structure (le toit, les côtés et les parois arrière, Figure 11).

Afin de calculer la pression à appliquer sur les parois latérales et la partie supérieure de la structure une procédure est proposée dans la littérature [8-9], basée sur le facteur de charge équivalente  $C_E$ , et le coefficient de traînée  $C_D$ .

Concernant la paroi arrière, comme l'onde de pression passe devant les arêtes des parois latérales et le toit, des vagues secondaires sont créées. Elles sont responsables du chargement de la partie arrière de la structure. Habituellement, la même formulation utilisée pour les parois latérales est appliquée pour le toit.



### 3.2.7. Effet de la surface réfléchissante finie

La forme de la courbe réfléchié montré dans la figure 9 est valable dans le cas d'une action d'onde de choc sur une surface infinie. Cependant, pour un seul bâtiment, la pression réfléchié par l'avant de la structure est finalement soulagée par la fuite de la vague sur les côtés et le toit quel que soit le type de souffle (explosion à la surface ou à l'air libre). Ce phénomène permet la réduction de la pression réfléchié à un rythme rapide, jusqu'à ce qu'elle soit égale à la somme

de la pression incidente et la pression dynamique. Le temps nécessaire pour que la pression réfléchie tombe à ce niveau inférieur est connu sous le nom de temps de compensation  $t_c$ .

La figure 12 représente la différence entre les courbes de pression réfléchies dans le cas d'une surface finie et infinie. La pression maximale réfléchie est identique pour les deux cas, mais les courbes suivent une trajectoire différente lors de leur partie de désintégration. Le temps de compensation est également indiqué selon la définition présentée ci-dessus. La durée de la phase positive dans le cas d'une surface finie est généralement inférieure à celle de la surface infinie, comme dans le premier cas, les valeurs de pression chutent plus rapidement en raison de la propagation de l'onde sur les côtés et toit de la surface. Le temps de compensation ne dépend pas seulement de la géométrie de l'obstacle (structure), mais aussi de type de charge, du poids et de la distance du point de détonation du bâtiment.

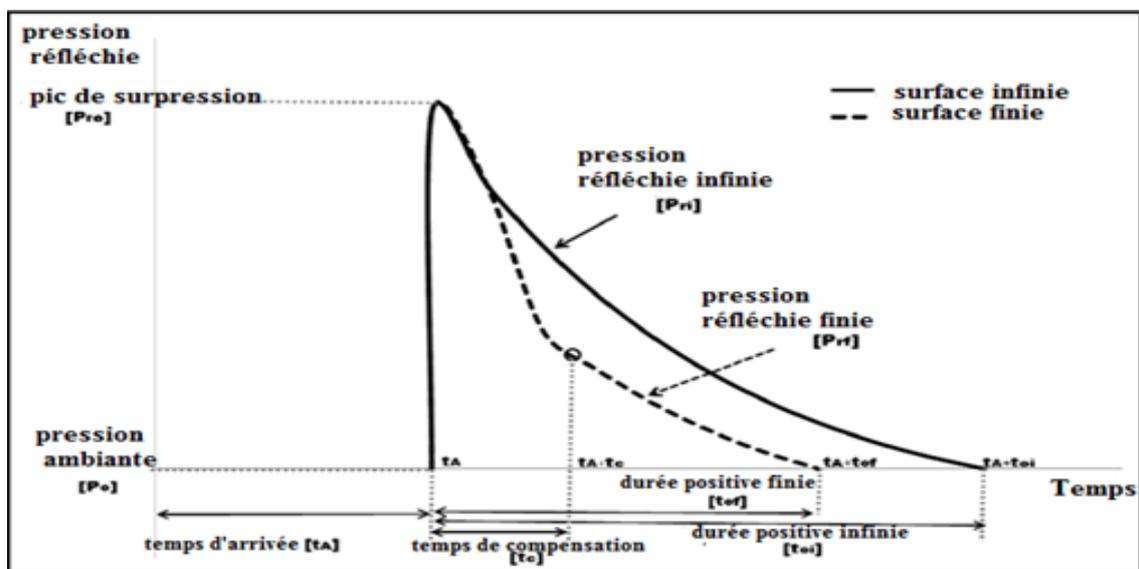


Figure 12 Influence des dimensions d'une surface finie sur la pression réfléchie en fonction du temps (SOLOMOS, 2011)

### 3.2.8. Pression dynamique

L'onde de choc se propage à travers l'air avec une vitesse décroissante en continu supérieure à la vitesse du son. L'air derrière le front de l'onde de choc se déplace également dans la même direction que le vent, mais avec une vitesse plus faible.

Ces vents derrière le front d'onde de l'explosion sont responsables pour charger une surface pendant toute la durée de la phase positive et après cette phase pour un peu de temps. La pression produite est connue sous le nom de pression dynamique ou pression de glissement

$q(t)$ , elle a une valeur initiale de crête  $q_0$  inférieure à celles de la pression incidente et des pressions réfléchies. La différence est que les deux pressions incidente et réfléchie ne durent que pendant un temps très court (généralement très inférieur à une seconde), tandis que la pression dynamique peut durer pendant des périodes plus longues (jusqu'à 2-3 secondes).

La figure 13 montre la variation de la pression dynamique de crête en fonction des valeurs de la pression incidente de pointe. La pression dynamique dépend de la densité de l'air et de la vitesse du vent derrière le front de l'onde de choc, qui sont influencées par la surpression incidente de pointe. Sa valeur effective dépend en outre, du coefficient de traînée, de l'orientation de la surface par rapport à l'explosion et de la direction du vent.

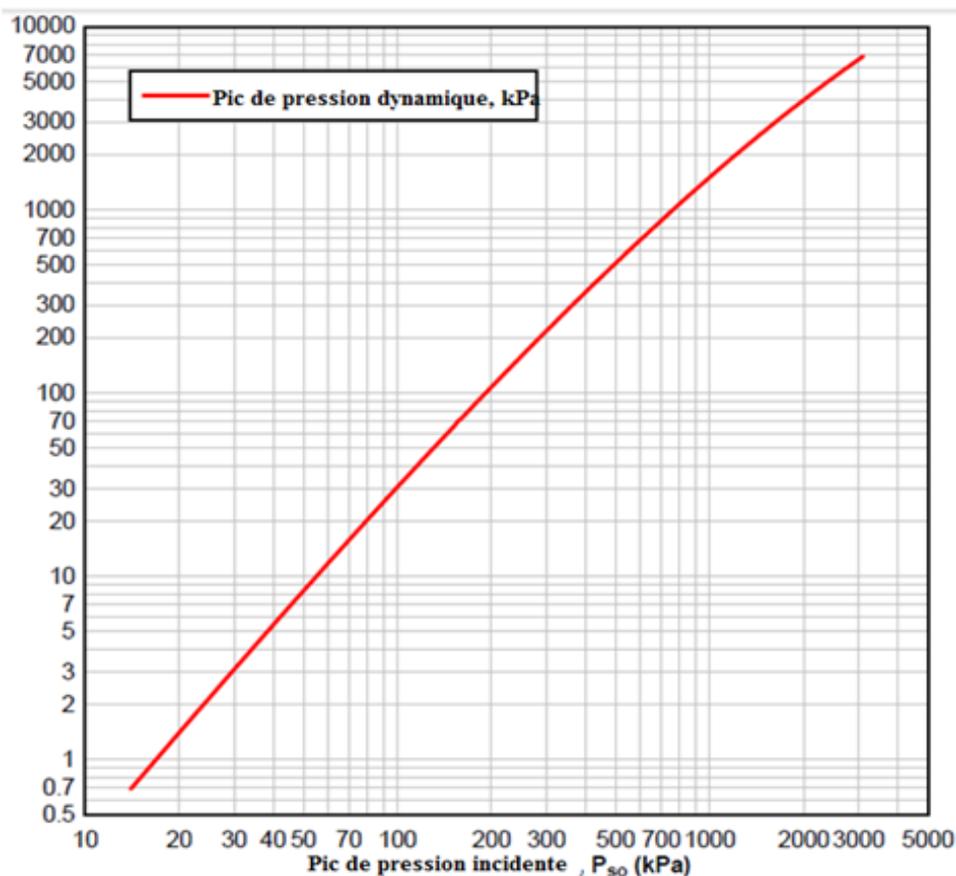


Figure 13 : Variation de la pression dynamique de pointe en fonction de la pression incidente de pointe

### 3.3. Calcul des charges de souffle structurelles

Il existe plusieurs relations et approches pour la détermination de la valeur de la pression incidente à une distance donnée d'une explosion. Toutes les relations proposées impliquent le calcul de la distance à l'échelle, qui dépend de la masse de l'explosif et de la distance réelle du centre de l'explosion.

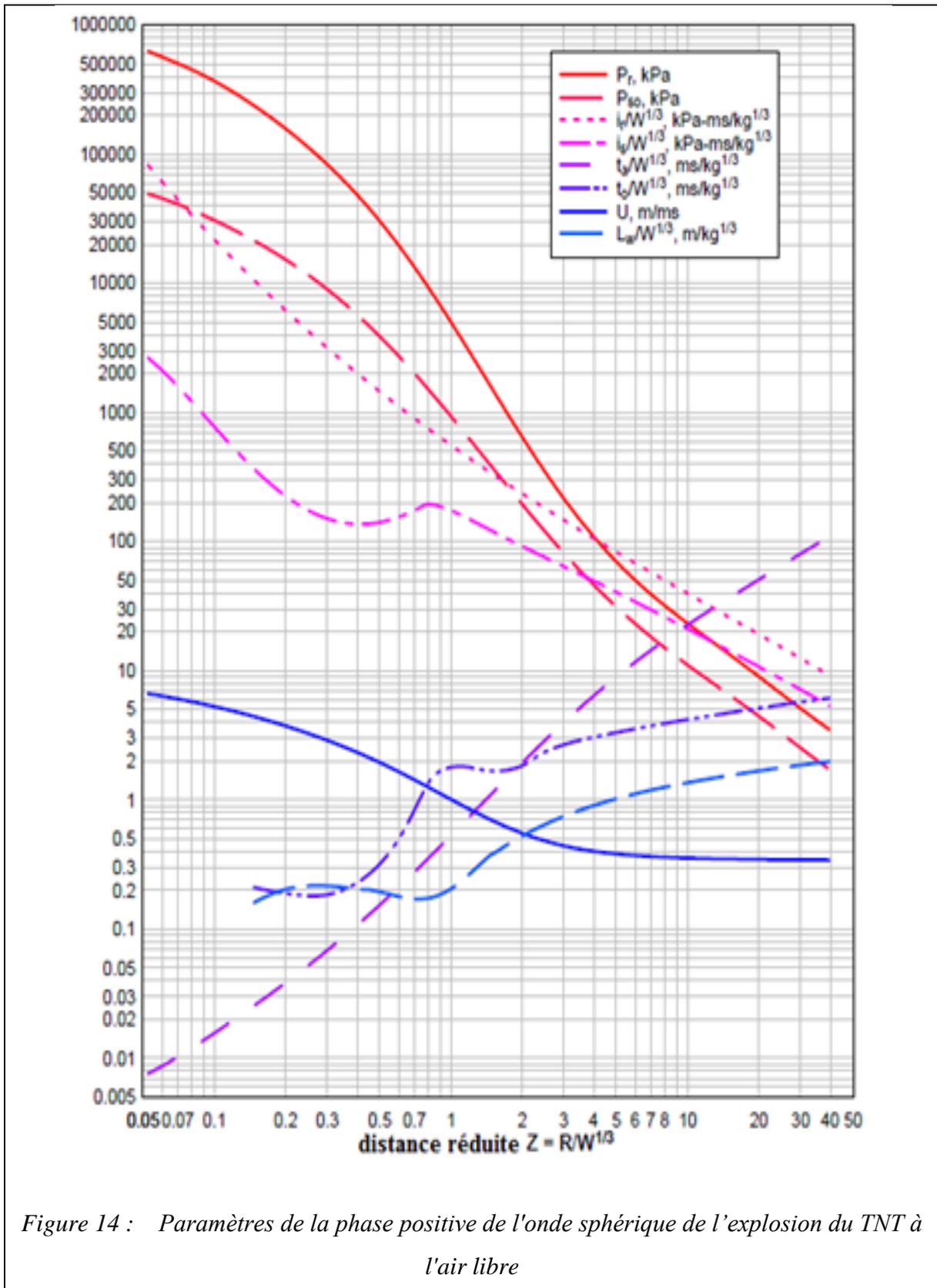


Figure 14 : Paramètres de la phase positive de l'onde sphérique de l'explosion du TNT à l'air libre

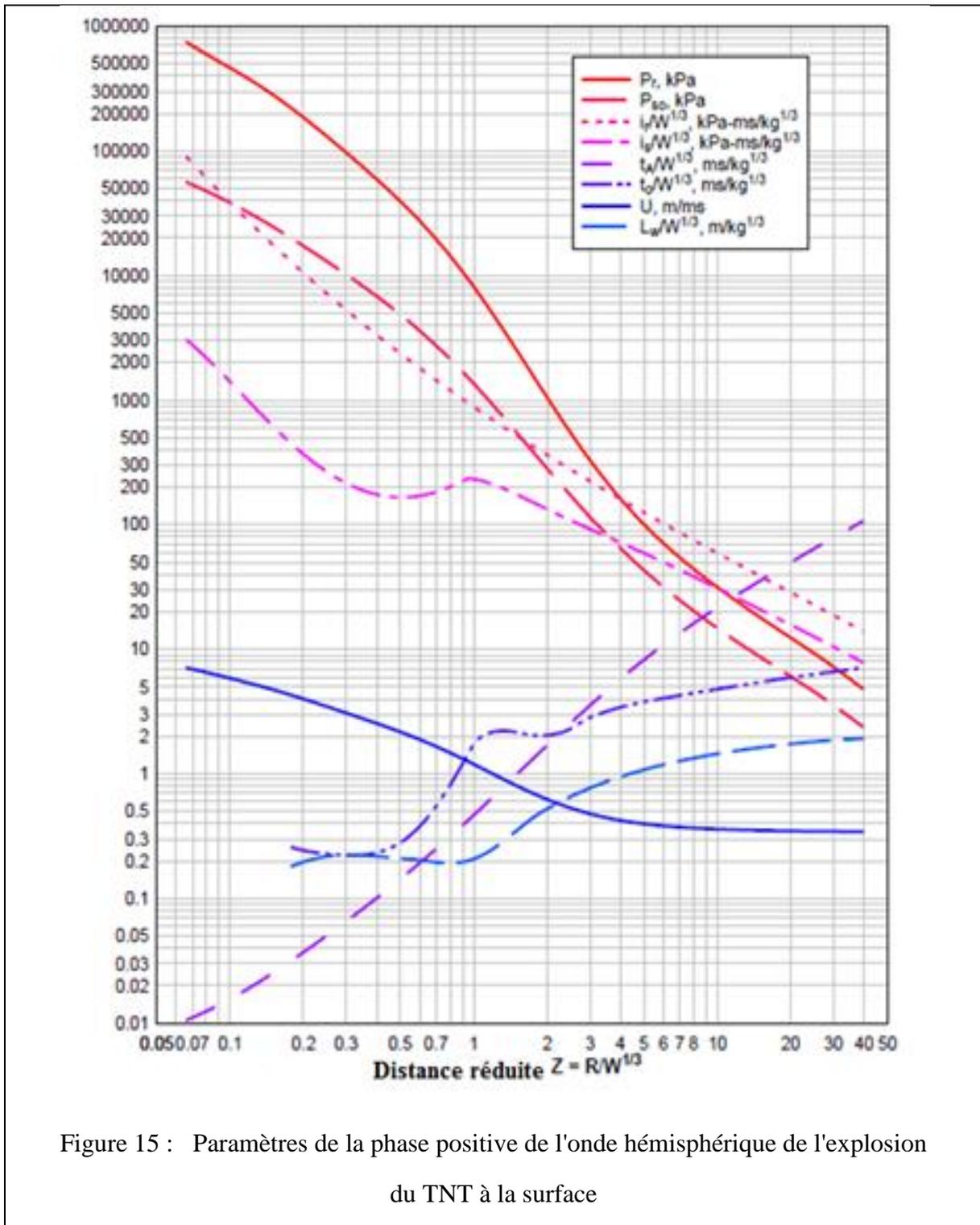


Figure 15 : Paramètres de la phase positive de l'onde hémisphérique de l'explosion du TNT à la surface

Les figures 14 et 15 montrent la représentation des paramètres de souffle pour la phase positive de l'onde de choc pour des explosions à la fois à l'air libre et de surface. Ces diagrammes ont été établis par rapport à des distances réduites  $Z$  variant de  $0,05 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$  à  $40 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ . La valeur de chaque paramètre mise à l'échelle obtenue à partir de ces diagrammes, est multipliée par le facteur  $W^{1/3}$  pour obtenir la valeur absolue correspondante, à l'exception de la pression

et de la vitesse dont les valeurs sont prises directement car elles ne sont pas mises à l'échelle.

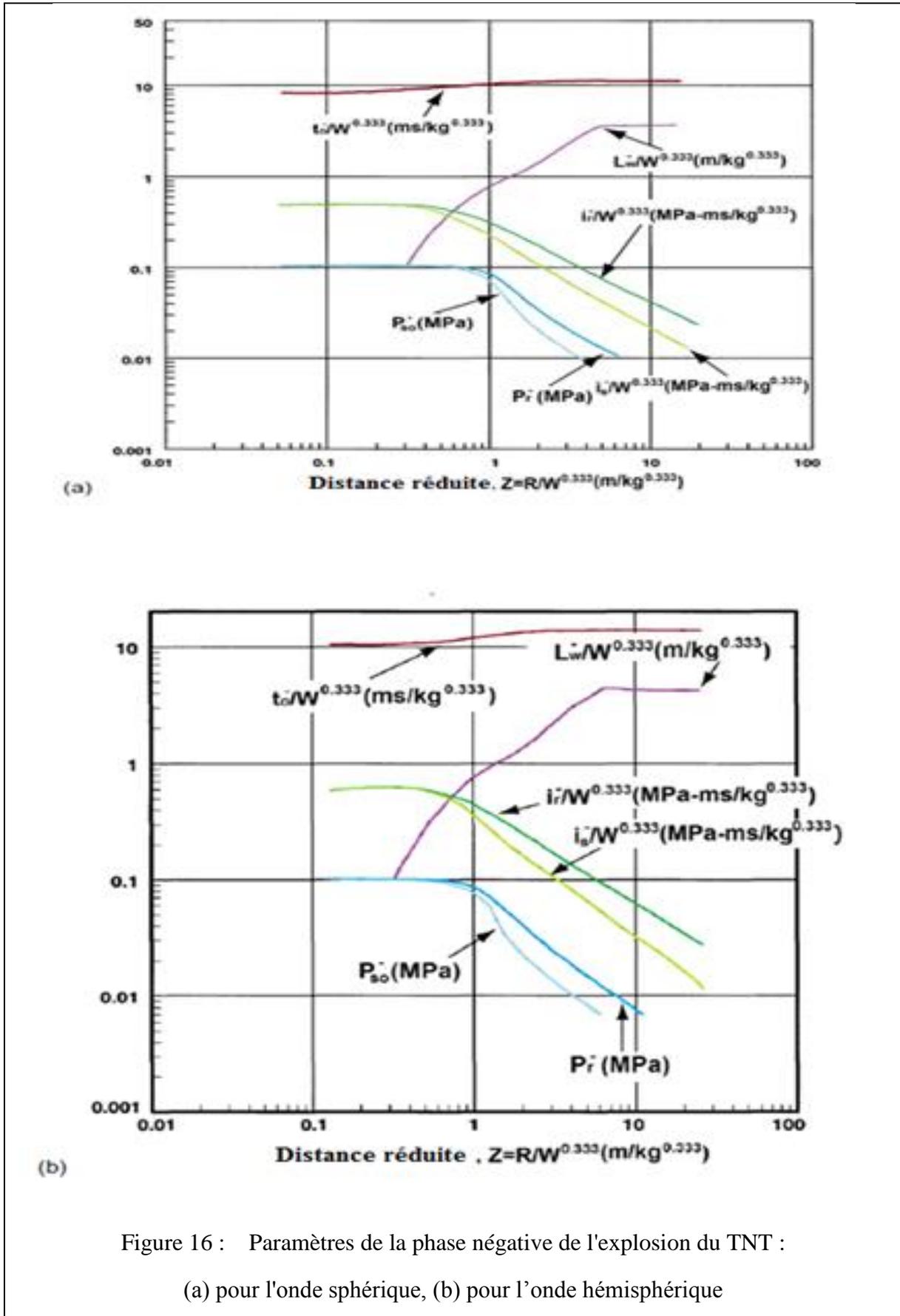


Figure 16 : Paramètres de la phase négative de l'explosion du TNT :

(a) pour l'onde sphérique, (b) pour l'onde hémisphérique

Les symboles rencontrés dans les figures 14, 15 et 16 ont été définis dans la figure 6. Les symboles additionnels sont : la vitesse de l'onde de choc  $U$  ( $\mathbf{m. ms}^{-1}$ ) et la longueur d'onde de l'explosion  $L_w$  ( $\mathbf{m}$ ).

La figure 16 représente les diagrammes pour les paramètres de souffle de la phase négative de l'onde de choc de surface et à l'air libre pour le TNT au niveau de la mer (SOLOMOS, 2011).

### 3.3.1. Pression exercée sur la paroi avant

La première surface qui sera chargée par de l'onde de choc est la paroi avant de la structure. Dans la référence (SOLOMOS, 2011) une procédure est proposée pour le calcul de la charge sur la face avant. Pour des rafales de surface, la première étape est le calcul de la pression de pic réfléchi  $P_r$  au temps  $t = t_A$  lorsque l'onde de choc arrive à la surface du plan considéré.

La pression sur la face avant commence à diminuer alors que la vague se déplace en avant de la face, entourant le reste de la structure durant le temps de compensation  $t_c$ . A l'instant  $(t_A + t_c)$  la pression au niveau de la surface avant diminue sensiblement, mais reste supérieure à la pression ambiante initiale. Après un temps  $(t_A + t_c)$  la pression est la résultante de l'effet combiné de la pression incidente et la pression dynamique. Elle est obtenue à partir l'équation (6),

$$P = P_s + C_D q \quad (6)$$

Où,  $P$  : est la pression exercée sur la paroi avant (kPa)

$P_s$  : Pression incidente (kPa),

$C_D$  : Coefficient de traînée, pris égal à 1 pour la paroi avant (SOLOMOS, 2011)

$q$  : Pression dynamique (kPa).

Diverses formules existent pour calculer le temps de compensation  $t_c$ . Il peut être estimé à partir de l'équation (7) (SOLOMOS, 2011).

$$t_c = \frac{4S}{(1 + R)C_r} \quad (7)$$

Où,  $t_c$  : est le temps de compensation (ms),

S : La plus petite valeur entre la hauteur H et la demi-largeur W/2 de la structure (voir Figure 20),

$C_r$  : la Vitesse du son dans le milieu réfléchi, représentée sur la figure 17,

R : le rapport S/G, où G est la plus grande valeur entre la hauteur H et la demi-largeur de W/2 de la structure (voir Figure 20).

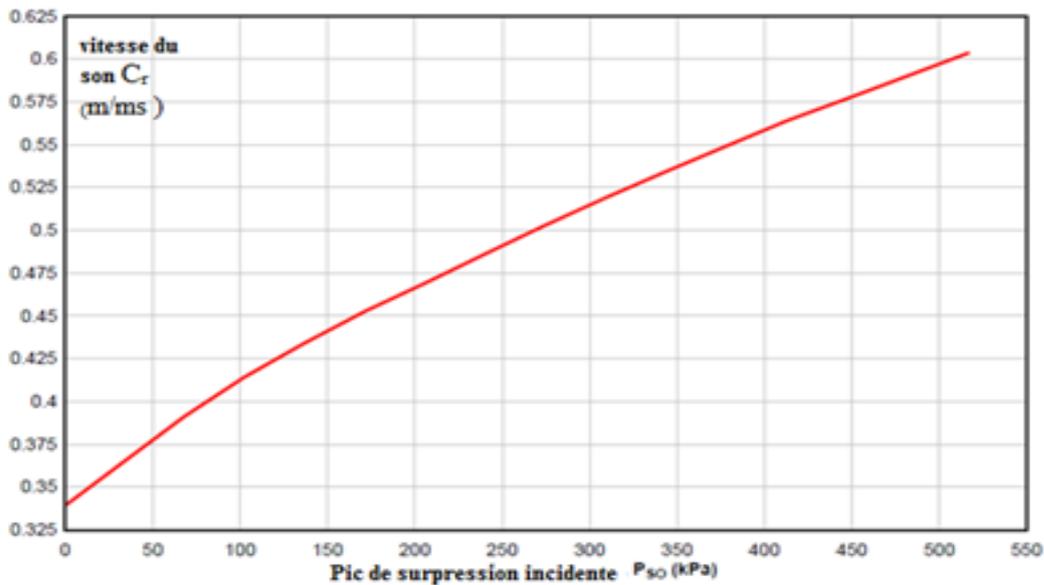


Figure 17 : Vitesse du son dans la région de la surpression réfléchie

Après le temps  $t_A + t_c$ , la pression au niveau de la face avant de la structure continue à diminuer pour atteindre finalement la valeur de la pression ambiante. En réalité, la forme de cette courbe décroissante est pratiquement exponentielle négative (Figure 12). Afin de simplifier l'analyse, la pression incidente peut être considérée comme triangulaire (linéaire par morceaux).

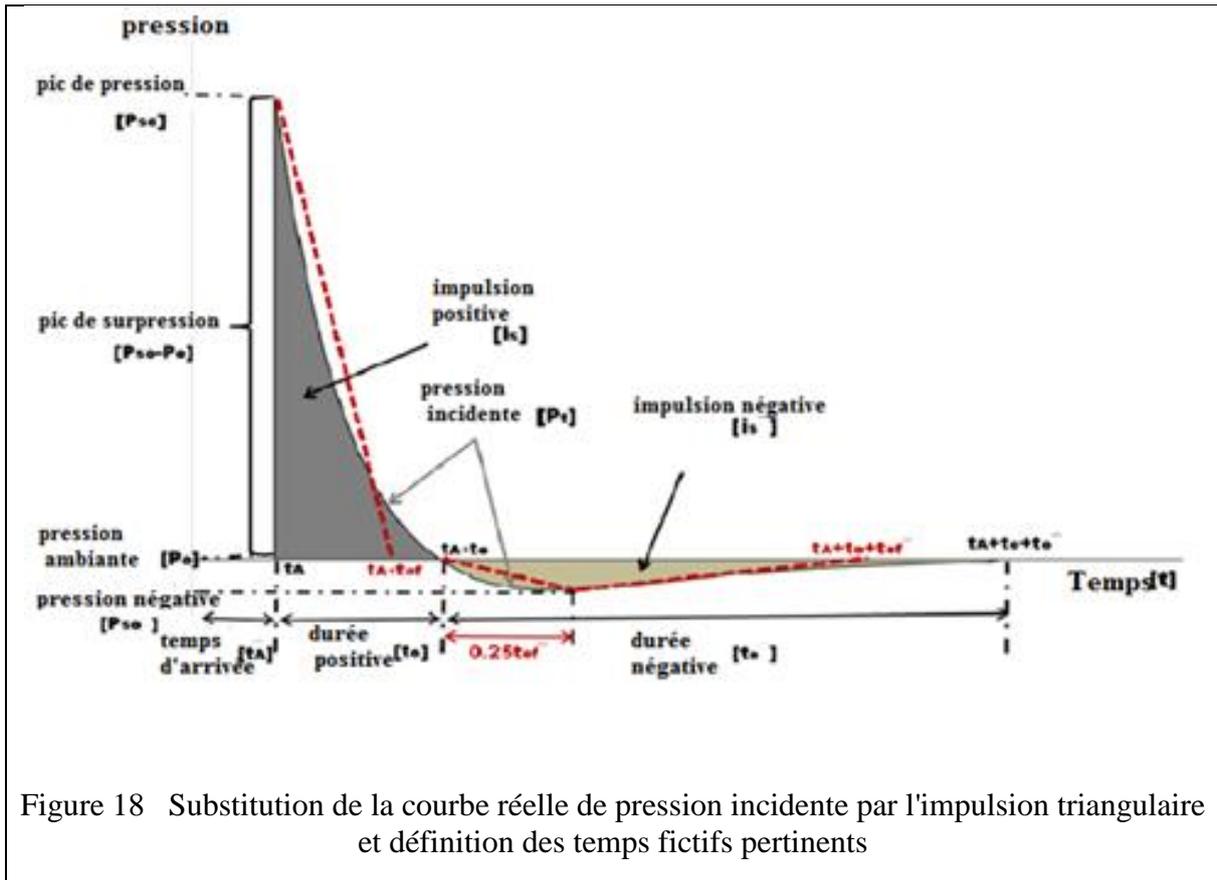
Selon cette approche, la durée réelle de la phase positive de l'onde incidente est remplacée par un temps fictif  $t_{of}$  ( $t_{of} < t_0$ ) qui dépend de l'impulsion positive et de la pression de pic, tel que décrit par l'équation (8).

$$t_{of} = \frac{2i_s}{P_{so}} \quad (8)$$

Où,  $i_s$  est la valeur de l'impulsion de la phase positive de l'onde de choc et  $P_{so}$  la Pression incidente de pointe.

Une procédure similaire peut être appliquée pour la phase négative de l'onde de choc définissant ainsi un temps fictif  $t_{of-}$  en utilisant les valeurs de l'impulsion et de la pression de crête correspondantes.

L'introduction des temps fictifs permet de produire des impulsions plus simples et triangulaires dans un intervalle de temps entre la fin de la phase positive et le début de la phase négative, comme on peut le voir sur les figures 18 et 19.



L'hypothèse de forme triangulaire de l'onde de choc n'est pas toujours exacte. A partir de l'équation (7), on déduit que le calcul du temps de compensation dépend de la géométrie de la surface empiétée et de la vitesse du son dans la région réfléchie, qui à son tour dépend de l'amplitude de l'onde incidente. Des expériences ont montré qu'à chaque fois que des valeurs élevées de pression sont présentes, la durée de la phase positive de l'onde de choc est extrêmement courte, ce qui entraîne un temps fictif  $t_{of}$  plus court que le temps de compensation  $t_c$ . Dans ce cas, la procédure mentionnée ci-dessus se traduira par un diagramme triangulaire qui ne représente pas l'évolution temporelle de la pression réelle réfléchie.

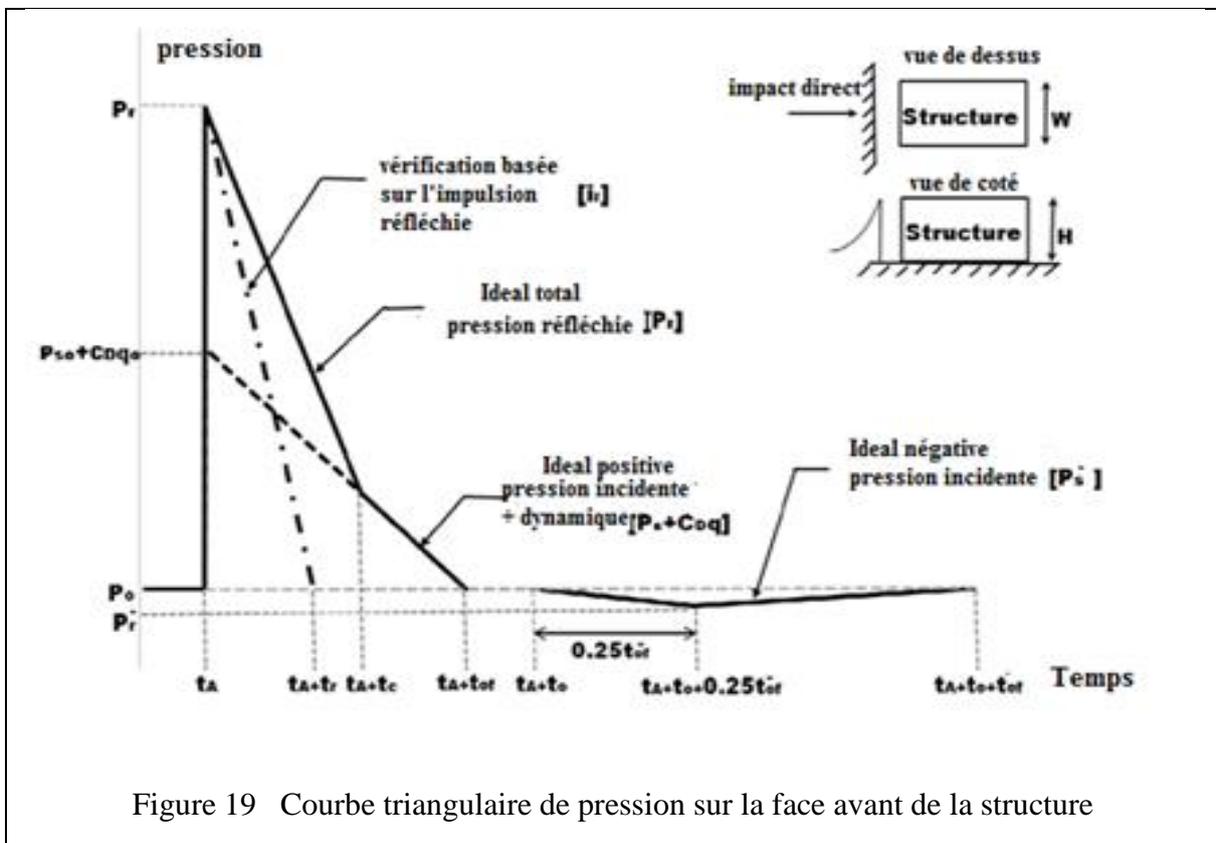
Dans ce cas, une courbe supplémentaire est habituellement construite comme représenté sur la figure 19, qui utilise l'impulsion de la pression totale réfléchie  $i_r$  en supposant une réflexion normale. Pour une  $P_{so}$  donnée, l'impulsion réfléchie peut être obtenue à partir des diagrammes des figures 14 et 15 et la durée fictive  $t_{rf}$  pour l'onde réfléchie est calculée par l'équation (9).

$$t_{rf} = \frac{2 i_r}{P_r} \quad (9)$$

Où :  $t_{rf}$

$i_r$  est l'impulsion totale réfléchie et

$P_r$  est la pression maximale réfléchie.



### 3.3.2. La pression exercée sur le toit et les parois latérales

La face avant d'une structure est chargée en premier à la suite d'une onde de choc directe qui empiète sur elle. Comme l'onde se propage, elle entoure la structure provoquant une pression sur le toit, les faces latérales et la surface arrière. Si les parois latérales et le toit de la structure sont parallèles à la direction de l'onde de choc, les surpressions de pointe sont égales

à la pression incidente. Un variant dans le temps de pression équivalente est appliquée, dont la valeur de crête  $P_R$  est donnée par l'équation (10).

$$P_R = C_E P_{sof} + C_D q_{of} \quad (10)$$

Où,  $P_{sof}$  : Pression incidente au point f du bord avant du toit, (Voir figure 20),

$C_E$  : Facteur de charge équivalente

$C_D$  : Coefficient de traînée

$q_{of}$  : Pression dynamique correspondant à  $C_E P_{sof}$  (KPa)

Le facteur charge équivalente  $C_E$  dépend du rapport de la longueur d'onde de choc et de la longueur de l'envergure de la surface ( $L_w/L$  sur la figure 21).

La longueur d'onde  $L_{wf}$ , à utiliser dans les figures suivantes correspond à celle du point f (bord avant du toit). Elle est déterminée à partir des diagrammes des figures 14 ou 15.

La figure 21 montre le facteur de charge équivalente  $C_E$  en fonction du rapport  $L_{wf}/L$  pour les phases positive et négative de la charge de l'explosion.

La valeur de pression maximale pour le toit  $P_R$ , telle que calculée par l'équation (10), tient compte également la phase négative mais sans la pression dynamique.

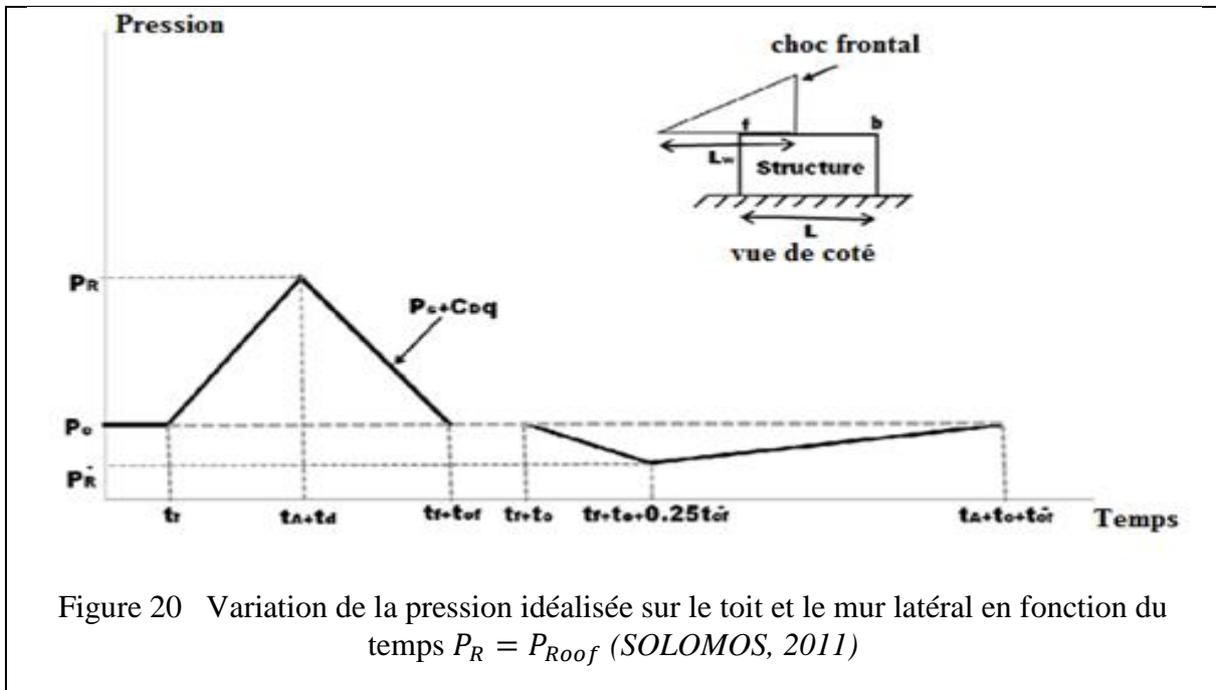
Le coefficient de traînée dépend de la gravité de l'explosion et en particulier de la pression dynamique maximale. Le tableau 6 montre les valeurs de coefficient de traînée recommandées pour les pressions dynamiques de pointes (SOLOMOS, 2011).

Tableau 6 Valeurs du coefficients de trainée  $C_D$  pour le toit et le mur latéral

Pression dynamique de pointe (KPa)	Coefficient de traînée
0 - 170	-0,40
170 - 350	-0,30
350 - 900	-0,20

La figure 20 montre la courbe de pression due à la force de souffle, appliquée sur le toit et les parois latérales d'une structure. La charge augmente linéairement jusqu'à sa valeur maximale

en temps  $t_d$ , déterminée à partir du diagramme de la figure 22 (SOLOMOS, 2011). La durée totale des phases positive et négative de la charge de l'explosion peut être déterminée à partir de la figure 23. Le paramètre  $t_{of}$  apparaissant dans les figures 20 et 23 ne doit pas être confondu avec celui des figures 18 et 19 relatif à la face avant de la structure.



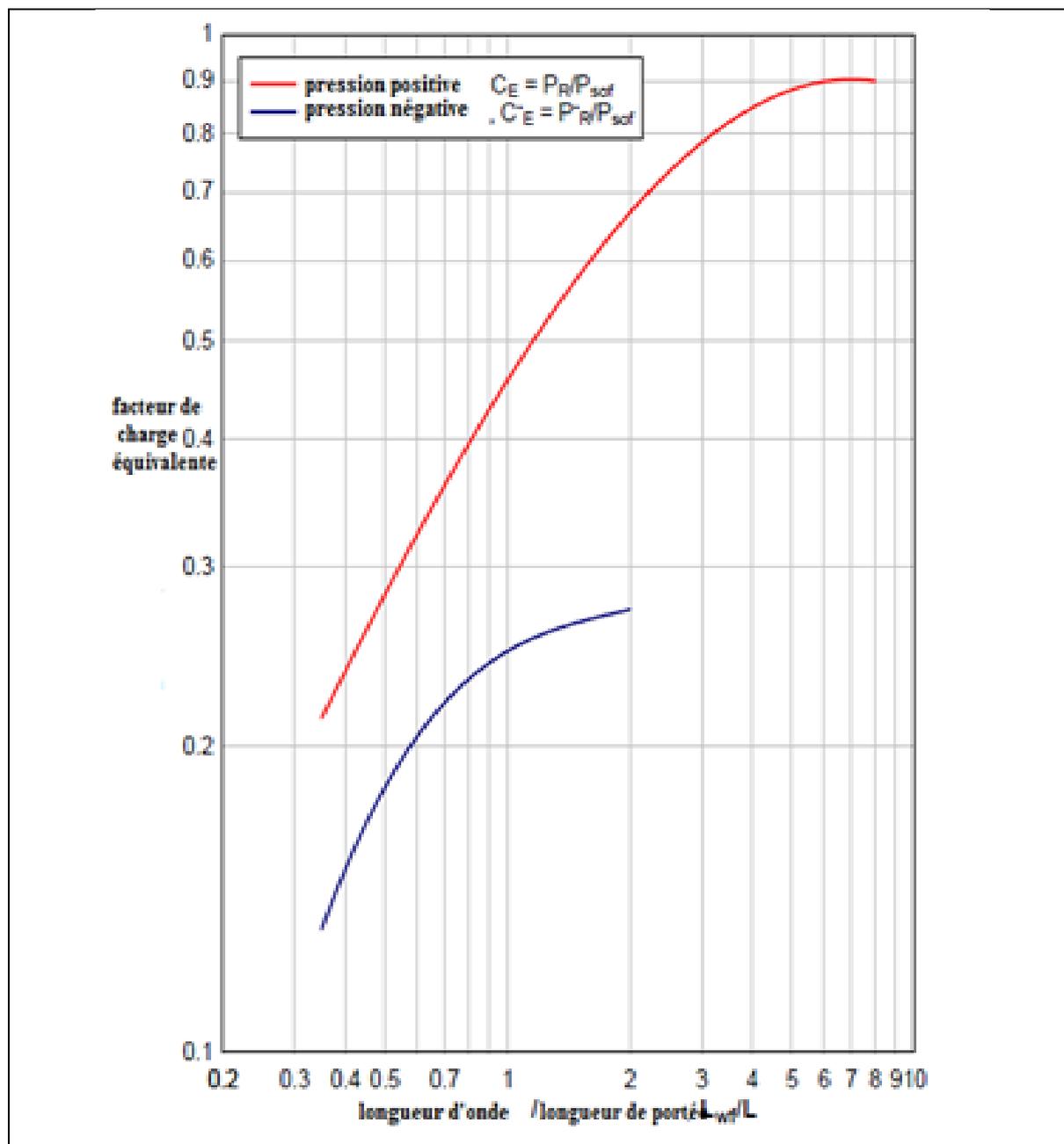


Figure 21 : Facteurs de charge des phases positive et négative de la charge de l'explosion sur le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011)

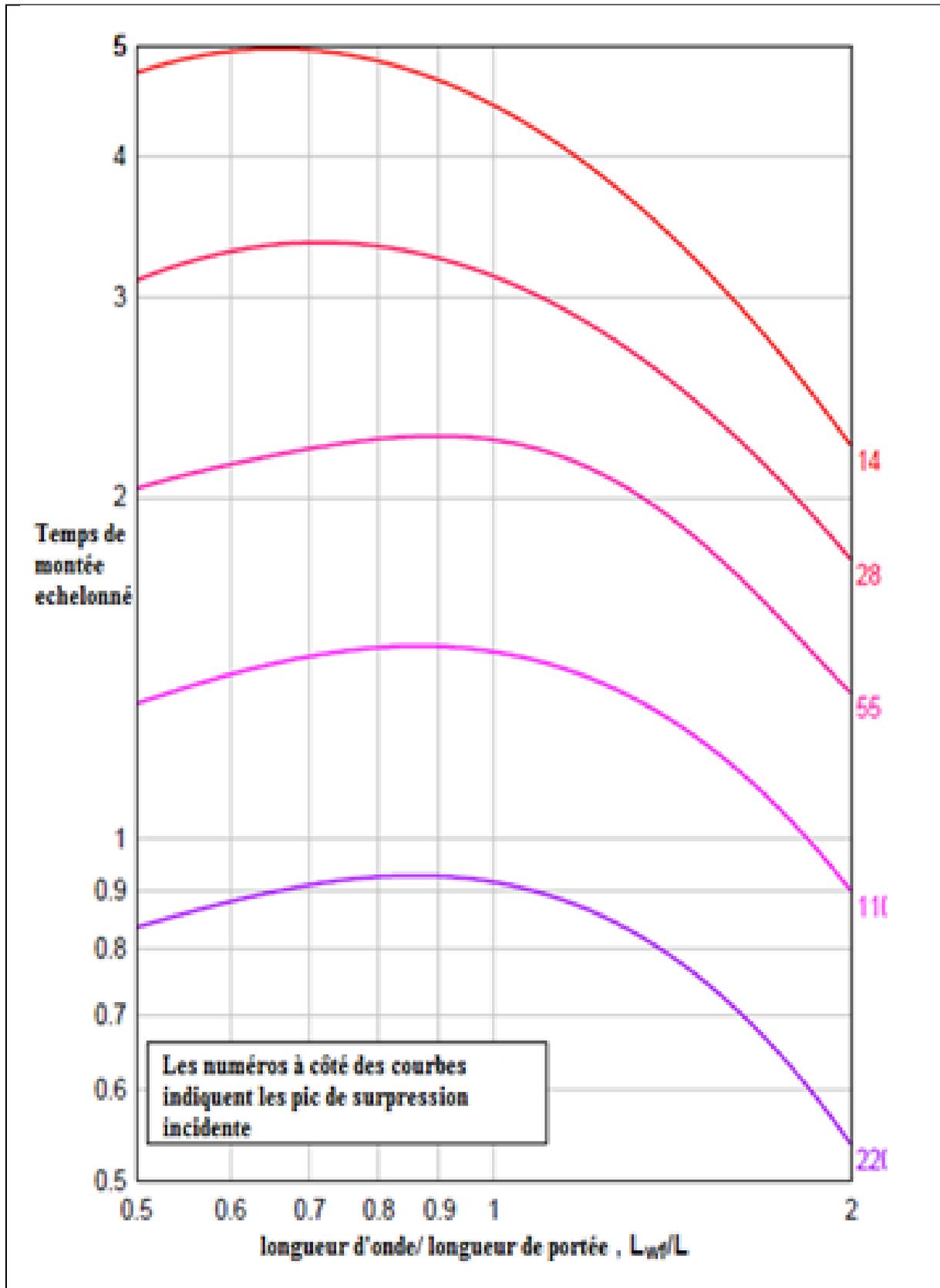


Figure 22 : Temps de montée  $t_D$  mis à l'échelle, de la charge de la pression des phases positive et négative pour le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011)

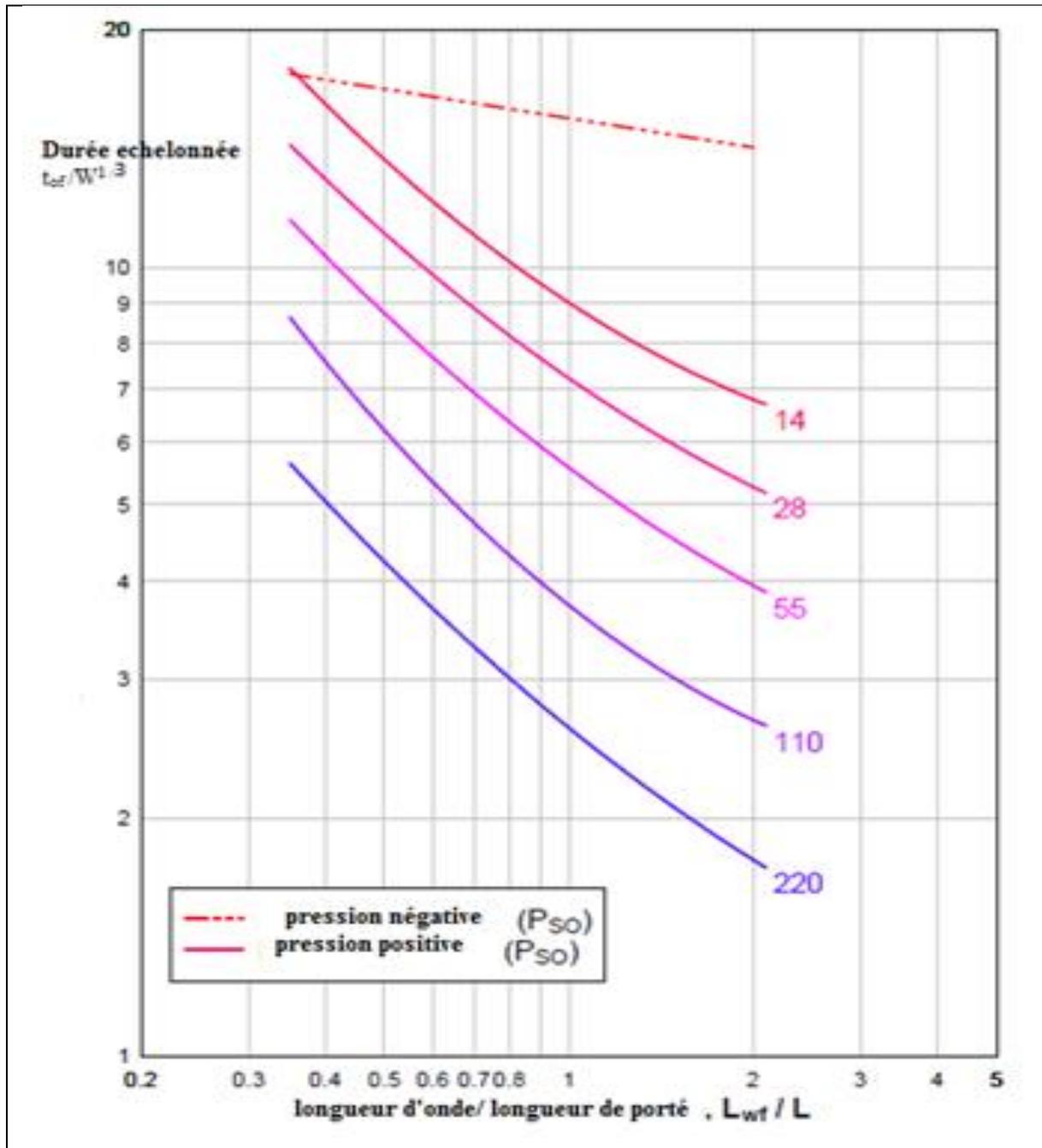


Figure 23 : Durées mise à l'échelle des phases positive et négative de la charge de la pression sur le toit et les parois latérales de la structure (SOLOMOS, 2011)

### 3.3.1. Pression sur la paroi arrière

La paroi arrière de la structure est la dernière surface qui est chargée par la propagation de l'onde à cause des vagues secondaires qui sont créées lorsque le front de l'explosion passe par les murs latéraux et le toit. Les ondes secondaires créées à partir du toit sont renforcées par leur

réflexion sur le sol, tandis que les ondes créées à partir des parois latérales sont renforcées en raison de leur impact mutuel au milieu de la distance entre les deux bords de la paroi latérale.

Le calcul simplifié de la charge générée par ces ondes est similaire à celui déjà présenté pour le toit et les parois latérales de la figure 20. Une équation similaire à l'équation (10) peut être utilisée qui comprend la valeur de pression de crête au bord arrière du toit. La charge finale sur la paroi arrière est une combinaison des valeurs de la pression incidente et de la pression de dynamique. Les coefficients de trainée  $C_d$ , qui sont utilisés pour la composante dynamique de l'équation (10) sont identiques à ceux présentés pour le toit et les parois latérales au Tableau 3, tandis que la pression dynamique  $q_0$  correspond à la pression  $C_E P_{sob}$  correspondant au bord arrière du toit (point b, Figure 20).

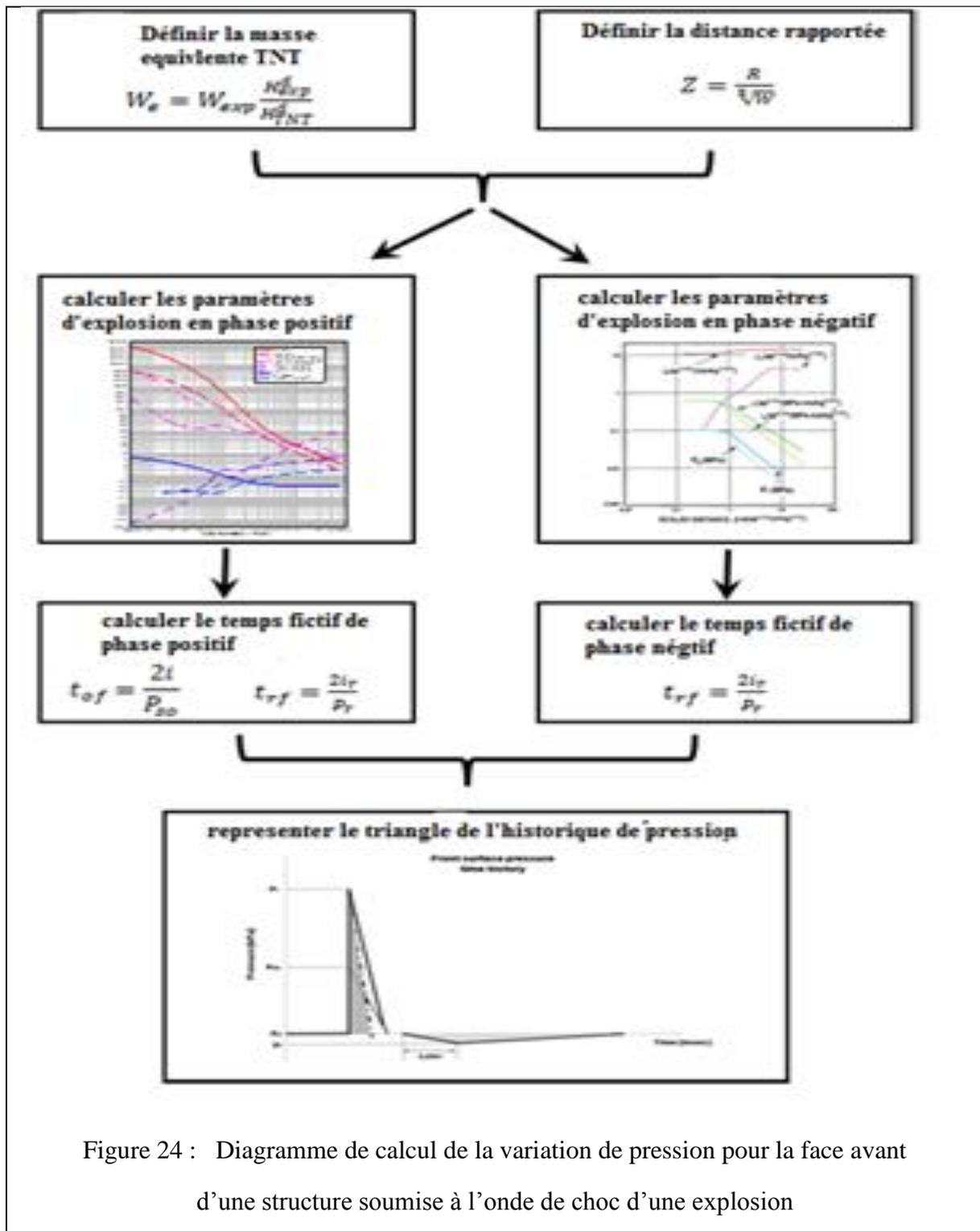
### 3.4. Résumé du calcul des charges de souffle

- Choisir les scénarios d'explosions les plus importants rapportés dans l'étude de danger du site, et définir la masse de la charge, le type et la distance de détonation.
- Si plusieurs emplacements d'explosion existent, des analyses distinctes doivent être effectuées pour tous les cas, et différentes parties de la structure peuvent être chargées dans chaque cas.
- La masse en équivalent TNT  $W$  est calculée à partir de l'équation (5).
- Les distances mises à l'échelle sont déterminées pour chaque scénario à partir de l'équation (4). Selon le type d'onde de choc (explosion hémisphérique, au sol ou explosion sphérique à l'air), les paramètres sont évalués à partir des graphes des figures 14 et 16. Ceux-ci incluent la pression incidente de pointe  $P_{so}$  et les pressions réfléchie  $P_r$ , l'impulsion incidente  $i_s$  et réfléchie  $i_r$ , la vitesse du front d'onde  $U$ , la durée de la phase positive  $t_0$ , le temps d'arrivée  $t_A$  et la longueur d'onde  $L_w$ .
- La prochaine étape comprend la construction des diagrammes de pressions triangulaires idéalisées. Pour la paroi avant et la durée de l'onde de pression positive, le temps de compensation  $t_c$  est calculé par l'équation (7), où la vitesse du son  $C_r$  est déterminée à partir de la figure 17. La durée fictive  $t_{of}$  de la phase positive devrait ensuite être estimée en utilisant l'équation (8), la durée fictive de la pression réfléchie  $t_{rf}$  par l'équation (9). A partir de la pression incidente de pointe  $P_{so}$  déjà déterminée, la pression dynamique de pointe  $q_0$  peut être obtenue à partir de la figure 13. La valeur

de  $P_{so} + C_D q_0$  est déterminée en utilisant le coefficient de traînée  $C_D = 1$  pour la face avant de la structure.

- La phase négative de l'onde de choc devrait également être prise en compte. Les valeurs des paramètres de souffle, comme la pression incidente négative de pic, la pression réfléchie normale et les impulsions négatives incidentes et réfléchies normales sont obtenues en utilisant les diagrammes de la figure 16a et 16b. Le temps où la valeur de la pression est minimale est égal à  $t_0 + 0,25t_{of-}$ .
- Cette procédure permet d'obtenir le diagramme triangulaire idéal de la phase négative de la figure 19, à partir de laquelle la force d'aspiration appliquée à la surface avant peut être calculée.
- La charge appliquée sur le toit ou sur les parois latérales de la structure est déterminée par une procédure similaire. Les facteurs équivalents de charge positive et négative  $C_E$  et  $C_{E-}$ , le temps de montée  $t_d$  et la durée  $t_{of}$  sont déterminés à partir des figures 21, 22 et 23. Le rapport  $L_{wf}/L$ , la longueur d'onde et la pression incidente au bord du toit (ou paroi latérale) sont déterminés par les figures 14 ou 15. La pression dynamique  $q_0$  peut être déterminée à partir de la figure 13 en utilisant la pression incidente appropriée. La valeur du coefficient  $C_D$  est choisie dans le tableau 3. Une procédure similaire est suivie pour déterminer la courbe temporelle de pression de la phase négative. Le temps de montée correspondant est égal à  $0.25t_{of-}$  où  $t_{of-}$  est la durée fictive de la phase négative. Enfin, un schéma similaire à celui présenté sur la figure 20 est produit à partir duquel la charge totale agissant sur les parois latérales ou sur le toit peut être calculée.
- Les charges agissant sur la paroi arrière de la structure peuvent être déterminées de manière similaire. La principale différence est que la pression incidente de pic  $P_{sob}$  correspondant au bord arrière du toit, est utilisée comme référence.

La figure 24 montre schématiquement la procédure recommandée pour le calcul de la pression exercée par une onde de choc sur la face avant d'un bâtiment.



Ce chapitre peut constituer une base permettant une évaluation de l'explosion sur une structure. Ceci est important pour dimensionner un mur de protection contre les explosions (blast proof).

Les informations techniques ont été recueillies, adaptées et présentées pour le calcul des charges d'explosion à prendre en considération pour la protection d'une structure contre les explosions.

Plusieurs formules, graphiques et diagrammes ont été utilisés, ce qui rend cette procédure complète.

L'étude de cas est élaborée dans une installation de production de gaz naturel, en utilisant les données du site et les différentes formules et graphiques pour calculer les pressions de souffle agissant sur les tours de contrôles.

### **4. TYPES DE CONSTRUCTION**

La conception de structures résistantes aux explosions nécessite l'utilisation de bonnes pratiques de conception et de construction, ainsi qu'une connaissance des caractéristiques de la charge de l'explosion et le comportement des structures.

Des considérations non structurelles telles que la sécurité, le fonctionnement, l'architecture, le coût et la préférence du propriétaire peuvent dicter la forme et l'orientation d'un bâtiment de l'usine. Cependant, l'ingénieur doit également tenir compte des exigences en matière de construction résistant à l'explosion. (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

#### **4.1. Considérations générales**

La caractéristique la plus importante des constructions résistantes aux explosions est la capacité d'absorber l'énergie de l'explosion sans provoquer une défaillance catastrophique de la structure dans son ensemble. Les matériaux de construction dans les structures de protection contre le souffle doivent avoir de la flexibilité ainsi que de la force et doivent être équipées de toutes les mesures de résistance à l'explosion. Cette exigence est similaire à celle de la conception parasismique.

Le béton armé est généralement considéré comme le matériau de construction le plus approprié et économique pour les bâtiments résistants à l'explosion, en particulier pour ces effets d'absorption de l'onde de choc pour les structures susceptibles d'être soumises à une forte surpression. Cependant, les bâtiments métalliques améliorés peuvent être utilisés s'ils sont situés à des distances appropriées des risques.

En règle générale, pour une construction donnée, le coût de la résistance à l'explosion augmente avec la hauteur du bâtiment. Un bâtiment à profil bas subit des charges de souffle plus faibles par rapport à une structure haute.

L'orientation du bâtiment doit être telle que les charges induites par l'explosion soient réduites autant que possible.

### **4.2. Systèmes communs pour bâtiments pétrochimiques**

La construction de bâtiments ordinaire peut fournir un certain niveau de résistance aux explosions. Cependant, certaines caractéristiques de la construction de bâtiments ordinaires, tels que les grandes fenêtres, les murs en maçonnerie non armée, et les connexions structurelles faibles, pourraient rendre ces bâtiments vulnérables même à des effets de souffle à bas niveau. La construction conventionnelle comprend un cadrage préfabriqué en acier avec revêtement métallique, et une charpente en acier avec des murs en maçonnerie ou en béton préfabriqué. Ces types de structures pourraient supporter (sans effondrement) des chargements de souffle de l'ordre de 6,8 kPa de surpression.

Différents types de construction appropriées pour augmenter le niveau de résistance aux forces de souffle et diminuer des dangers potentiels sont utilisés.

#### **4.2.1. Construction métallique renforcée préfabriquée**

Les bâtiments métalliques préfabriqués renforcés sont constitués de cadres et de panneaux en acier fabriqués à froid comme illustré dans la Figure 25. Les cadres en acier sont conçus pour résister à toutes les charges verticales et latérales. L'amélioration de la résistance à l'explosion peut être obtenue par : (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

- un espacement plus rapproché des cadres en acier,
- l'utilisation de sections symétriques et la réduction de leur espacement,
- l'augmentation de la taille des boulons d'ancrage et le renforcement des connexions des panneaux de murs et du toit,
- L'augmentation du nombre d'éléments de fixation à l'aide de rondelles surdimensionnées pour réduire la déchirure du matériau de revêtement,
- L'utilisation de colonnes à base fixe.

Grâce à ces améliorations, ces bâtiments ont une résistance au souffle allant de 6,9 à 21 kPa de la surpression latérale.

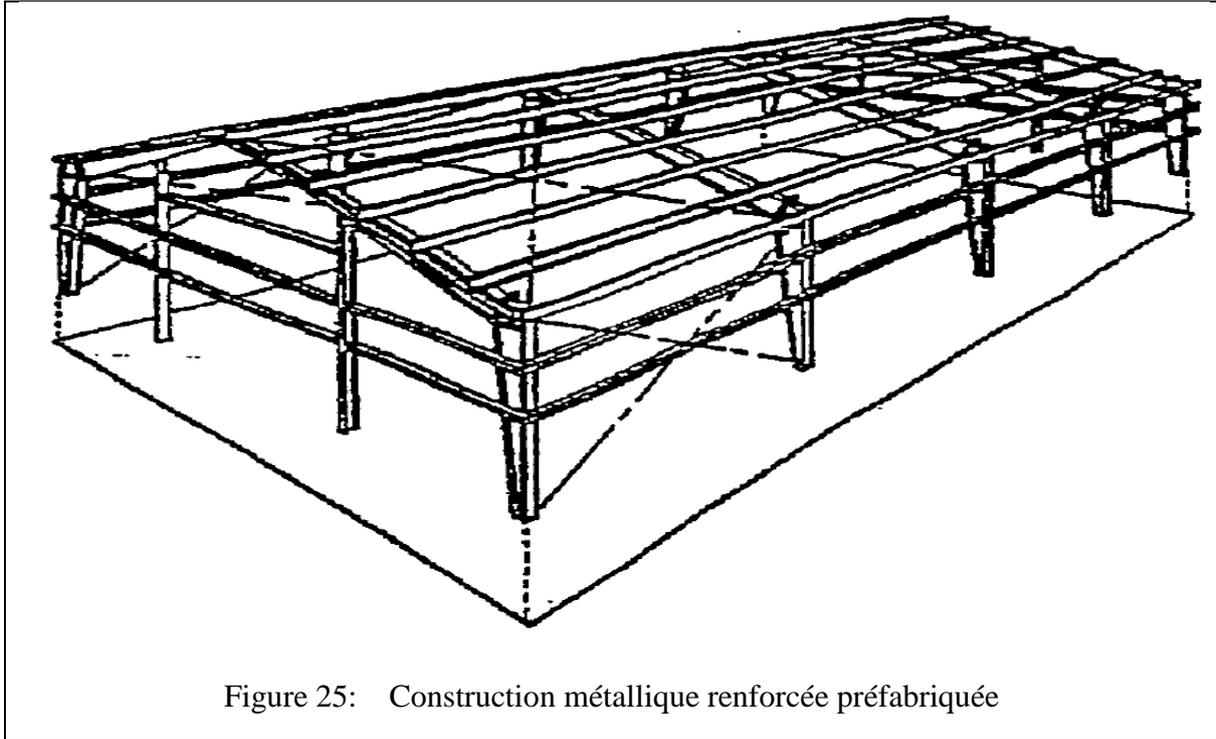


Figure 25: Construction métallique renforcée préfabriquée

#### 4.2.2. Bâtiments en maçonnerie renforcée

Les bâtiments en maçonnerie renforcée sont très semblables à des bâtiments commerciaux conventionnels normalement construits pour résister aux charges classiques. De l'acier de construction ou une structure en béton sont utilisés pour supporter des charges verticales, et dans certains cas, pour résister à des forces latérales. La maçonnerie renforcée est utilisée pour les murs extérieurs et est conçue pour étendre la structure verticalement ou horizontalement. Le mur de maçonnerie renforcée est fixé à la structure du bâtiment et attaché à l'ensemble de tous les composants. Il fournit une résistance à rebondir aux forces. Ce type de construction peut être conçu pour résister à des charges de l'ordre de 21 kPa de surpression latérale. (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

#### 4.2.3. Boîtes de béton préfabriqué

Des boîtes pré-ingénierie en béton peuvent être utilisées (Figure 26). Ces bâtiments sont fabriqués dans une usine, pré-câblé et livrés sur le site. Ils sont prêts à être fixés à une fondation et reliés aux services souhaités. Ces bâtiments sont conçus pour résister à une pression de 6,9 à 21 kPa. (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

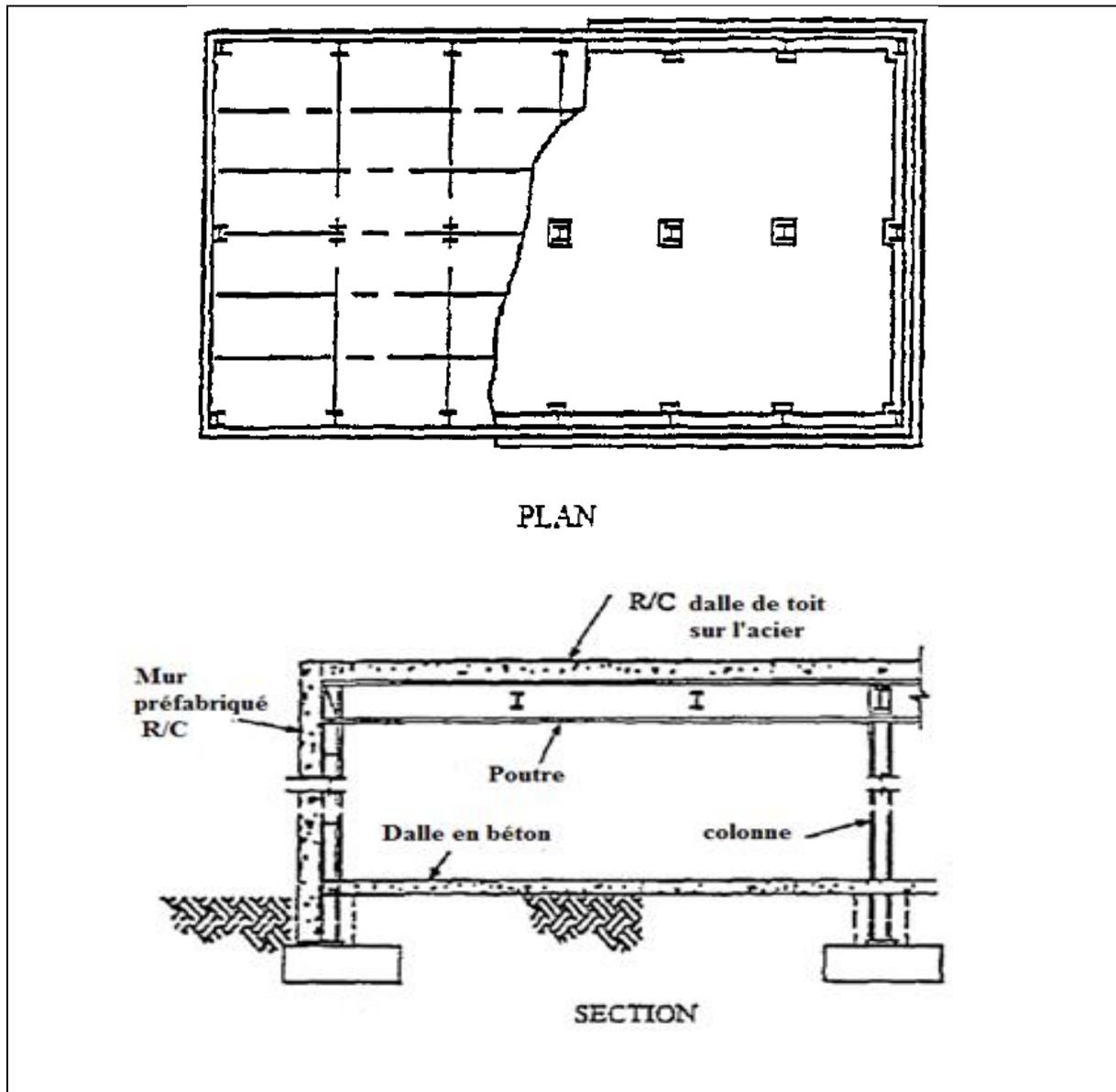


Figure 26 : Mur préfabriqué en béton armé

#### 4.2.4. Structure en arcs et dôme

Arcs et dômes (Figure 27) possèdent deux avantages, qui peuvent être exploités pour obtenir un haut niveau de résistance aux explosions. Le premier est la réduction de la charge, qui vient sur la surface courbée. Le second avantage est la grande efficacité d'éviter la force de l'onde, par la géométrie de la structure. Les inconvénients de ces types de structures proviennent de l'espace intérieur limité disponible pour la même empreinte du bâtiment, le coût plus élevé de la construction, l'arrêt de la production et le changement complet de la salle de contrôle. (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

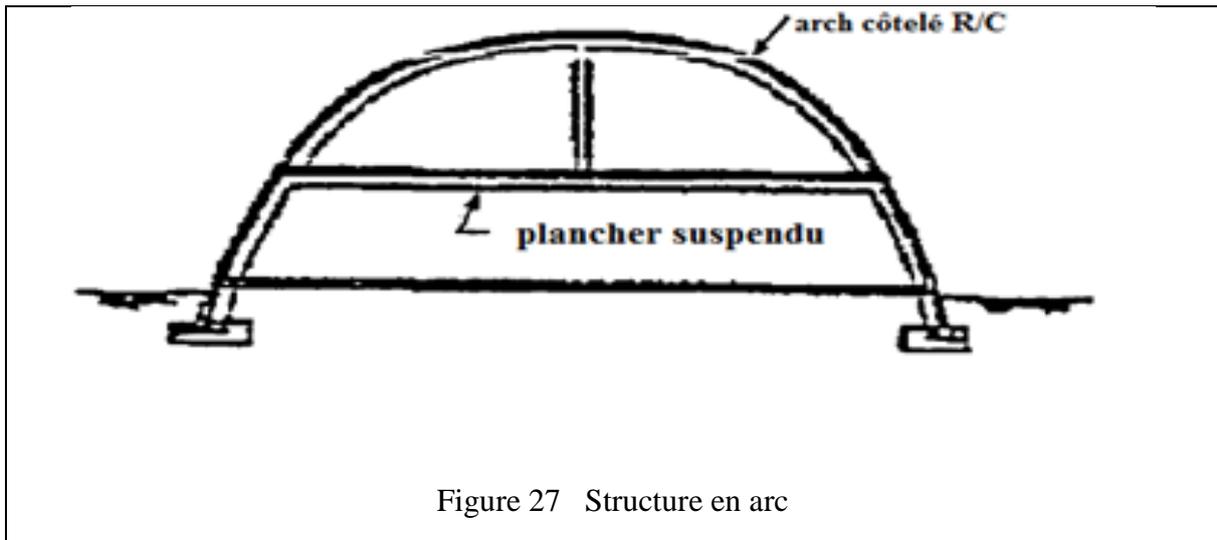


Figure 27 Structure en arc

#### 4.2.5. Structures à terre endiguée

Les structures à terre endiguée peuvent être utilisées si l'espace est disponible (Figure 28). Cette forme de construction est extrêmement résistante aux souffles de hautes surpressions. Les inconvénients comprennent l'espace supplémentaire requis, l'aspect non conventionnel, et les effets des conditions du site, telles que la nappe phréatique élevée. Ce type de construction nécessite aussi l'arrêt de la production et le changement complet de la salle de contrôle. (ASCE (American Society of Civil Engineers), 1997)

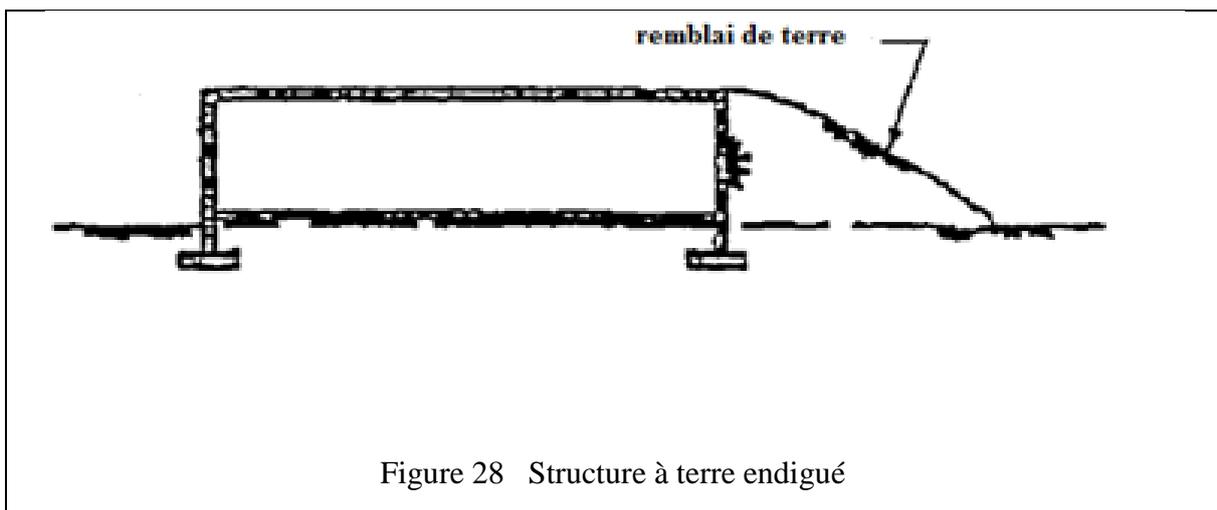


Figure 28 Structure à terre endigué

#### 4.2.6. Construction de mur en béton coulé sur place (blast proof)

La construction en béton coulé sur place (figures 29) est utilisée pour résister à des surpressions d'explosion relativement élevée où le béton préfabriqué n'est pas économique. La structure dépend de la charpente métallique ou de l'épaisseur du béton pour supporter des charges verticales. L'épaisseur du béton des murs, la taille et le placement de l'armature en acier, peuvent être choisies pour fournir la résistance à toutes les charges de souffle prévues. Ce type de construction serait normalement requis pour une explosion latérale pour des surpressions supérieures à 48 kPa.

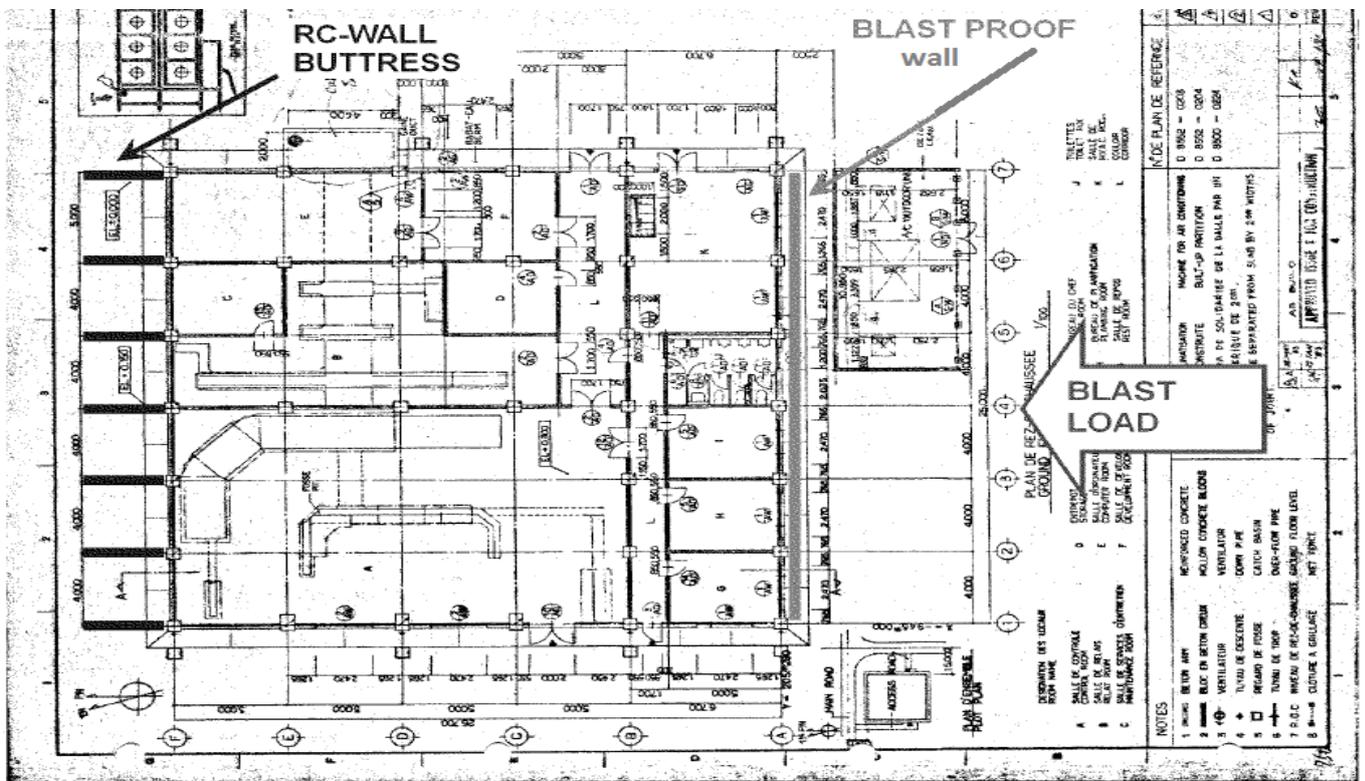


Figure 29 Mur Blast Proof et direction de l'onde de choc (SONATRACH Activité aval, 2001)

# **Chapitre IV**

## CHAPITRE IV                      CALCUL DE LA SURPRESSION DE L'ONDE D'EXPLOSION ET DIMENSIONNEMENT DU MUR DE PROTECTION

Selon une Etude d'Analyse de Risques Quantitative (QRA) des unités industrielles de la Division, SONATRACH DP– Hassi R'Mel Centre, les scénarios des accidents majeurs qui peuvent se présenter sont : (DET NORSKE VERITAS (DNV), 2010)

- Défaillance du ballon de GPL V209/V204
- Défaillance de la ligne de gaz
- Défaillance d'une ligne de GPL
- Défaillance d'une ligne de condensat

Pour notre étude, nous avons choisi le scénario relatif à la défaillance du ballon de GPL V209 en raison de la disponibilité des données nécessaires pour nos calculs. De plus il est jugé par l'étude QRA, comme étant le scénario d'explosion le plus important au niveau du module 1.

### SCENARIO 1 : DEFAILLANCE D'UN BALLON DE GPL

L'équipement représentatif pour ce scénario est le ballon V209. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 7 :

Tableau 7 Caractéristiques du ballon de GPL du MPP1 (DET NORSKE VERITAS (DNV), 2010)

Caractéristiques	V209
Substance	GPL (C3 et C4)
Température de service T (°C)	57,6
Pression de service (bar)	13,8
Pression de rupture (bar)	29
Densité : d (kg/m <sup>3</sup> )	457
Volume du GPL V (m <sup>3</sup> )	83,5

Les phénomènes d'explosions redoutés sont le BLEVE et l'explosion retardée VCE.

La figure 30 montre la configuration de la salle de contrôle (petit bâtiment). C'est une structure isolée, située à une distance  $D = 65$  m du centre de l'explosion. Ce dernier correspond à un volume de  $83,5$  m<sup>3</sup> de butane. La salle de contrôle est située directement en face du point de souffle et ses dimensions sont  $25$  m x  $25$  m x  $7$  m. La charge de l'explosion sera évaluée au centre de la face avant, qui a une superficie de  $175$  m<sup>2</sup> ( $25$  x  $7$  m<sup>2</sup>) et est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde de choc. Les pressions réfléchies sur la face avant du bâtiment, le toit, les parois latérales et arrière seront calculées.

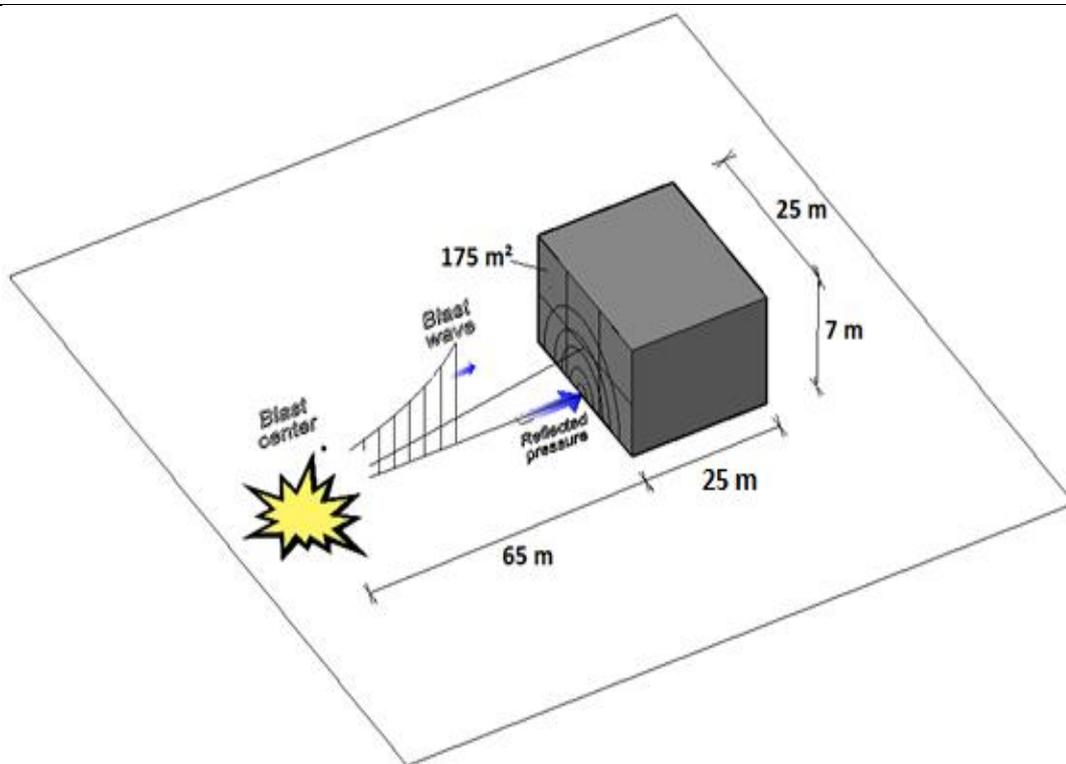


Figure 30 : Géométrie du site de l'explosion et dimensions de la salle de contrôle

Le carburant explose presque au niveau du sol, donc une onde de choc hémisphérique sera produite. La distance entre le point de souffle et la cible est considérée comme assez grande, de façon à supposer que l'onde de choc empiétant sur la structure est plane et la pression appliquée est uniforme sur toute la surface avant.

La masse de la charge de C4 est  $W_{exp} = d.V = 38159,5 \text{ Kg}$ , elle doit être convertie en une charge équivalente de TNT à partir de l'équation (5) :

$$W = W_{exp} \frac{r \times H_{exp}^d}{H_{TNT}^d} = 38159,5 \times \frac{0,1 \times 5,86}{4,69} = 4768 \text{ Kg}$$

où,

$r$  : est le rendement de l'explosion avec  $r = 0,1$  pour une explosion non confinée,

$H_{exp}^d$  et  $H_{TNT}^d$  : Données tabulées (Tableau des énergies de détonation donné en Annexe 3)

## 5. CALCULS DES PARAMETRES DE SURPRESSION

En utilisant les données citées ci-dessus, nous allons calculer les paramètres de l'onde de choc du scénario de rupture catastrophique du ballon V209 de GPL.

### 5.1. Pression sur la paroi avant

- La hauteur à partir du centre de la face avant est :  $\frac{h}{2} = 3,5 \text{ m}$
- La distance de la source de l'explosion est :

$$D_h = \sqrt{D^2 + \frac{h^2}{2}} = \sqrt{65^2 + 3,5^2} = 65,09 \text{ m}$$

- La distance mise à l'échelle est :

$$Z = \frac{D_h}{\sqrt[3]{w}} = \frac{65,09}{\sqrt[3]{4768}} = 3,87 \text{ m/Kg}^{1/3}$$

- L'angle d'incidence est :  $\alpha = \arctan\left(\frac{h}{D}\right) = 3^\circ < 40^\circ$

Nous remarquons que l'angle d'incidence est faible et inférieur à 40 degrés. Les conditions de la réflexion régulière de l'onde de choc attendue ne diffèrent pas de celles de la réflexion normale. Ainsi, l'utilisation de la pression réfléchie normale pour le dimensionnement de la construction est justifiée.

Les diagrammes de la figure 15 relatifs au cas où l'angle d'incidence est nul, peuvent être directement utilisés pour le calcul des paramètres de souffle. Les résultats sont présentés dans

le tableau 8. Pour obtenir les valeurs absolues, la multiplication par le facteur  $W^{1/3}$  a été effectuée.

Tableau 8 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour la face avant

Face avant	Pression incidente pic $P_{S0}$ (kPa)	Impulsion positive incidente $i_s$	Pression réfléchie pic $P_r$ (kPa)	Impulsion positive réfléchie $i_r$	Temps d'arrivée $t_A$ (ms)	Durée de la phase positive $t_0$ (ms)	Vitesse de l'onde de choc $U$ (m/ms)	Longueur d'onde $L_w$ (m)
Valeurs mises à l'échelle	75	75	<b><u>185,7</u></b>	178	5,3	3,4	0,44	0,9
Valeurs absolues	75	1262,33	<b><u>185,7</u></b>	2996	89,2	57,23	0,44	15,15

- Vitesse du son, obtenue à partir de la Figure 17 :

$$C_r = 0,37 \text{ m/ms}$$

- Temps de compensation :  $t_c = \frac{4s}{(1+R)C_r} = 48,5 \text{ ms}$

- La durée fictive de la phase positive :  $t_{of} = \frac{2 \times i_s}{P_{S0}} = 33,66 \text{ ms}$

- La durée fictive de la pression réfléchie :  $t_{rf} = \frac{2 \times i_r}{P_{ra}} = 32 \text{ ms}$

- La pression dynamique de pic, obtenue à partir de la Figure 13 :  $q_0 = 18 \text{ kPa}$

- Le coefficient de traînée pour la construction de la paroi avant :  $C_D = 1$

- Réduction de la pression de pointe, obtenue à partir de l'équation (6) :

$$P = P_{S0} + C_D q_0 = 93 \text{ kPa}$$

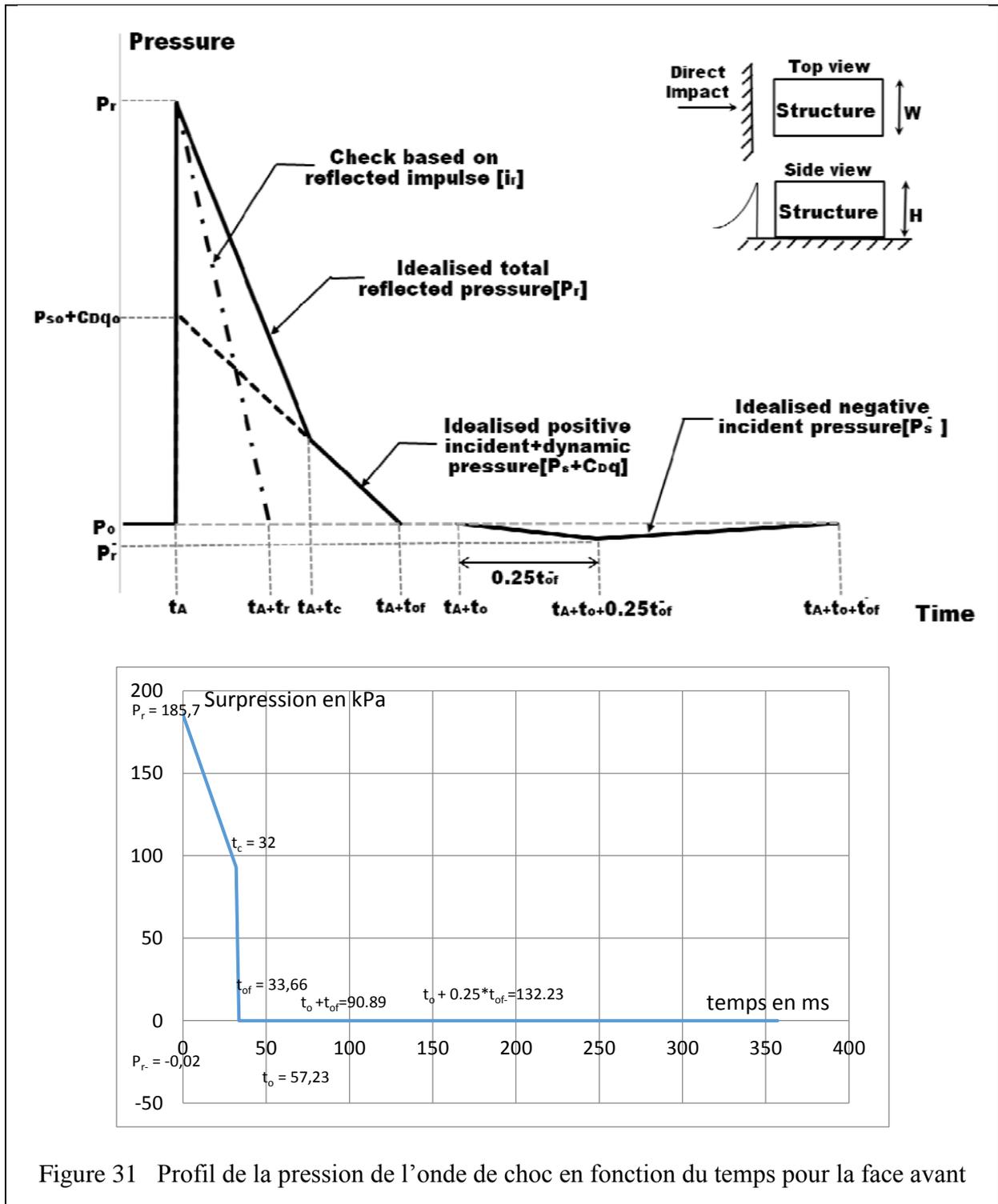
Les paramètres de la phase négative de la charge de l'explosion doivent également être déterminés. Les diagrammes de la figure 16b sont utilisés, et les valeurs des paramètres sont présentées dans le tableau 9.

En utilisant ces paramètres, l'ensemble de la courbe de pression sur toute la durée (phases positive et négative) de l'onde de choc peut être construit, comme on le voit sur la figure 31.

Tableau 9 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour la face avant

Face avant	Pression incidente négative pic $P_{s0-}$ (kPa)	Impulsion négative incidente $i_{s-}$	Pression réfléchie négative pic $P_{r-}$ (kPa)	Impulsion négative réfléchie $i_{r-}$	Temps de la phase négative $t_{0-}$ (ms)	Longueur d'onde de la phase négative $L_{w-}$ (m)
Valeurs mises à l'échelle	0,01	0,09	0,02	0,15	14,44	2,6
Valeurs absolues	0,01	1,5	<b><u>0,02</u></b>	2,5	243	43,7

Il est rappelé que la courbe de la phase négative commence exactement après la fin de la durée de la phase positive. Le temps fictif de la phase négative est :  $t_{of-} = \frac{2 \cdot i_{r-}}{P_{r-}} = 300 \text{ ms}$  et son temps de montée est égal à  $0,25t_{of-} = 75 \text{ ms}$



La même procédure est suivie pour le calcul des charges agissant sur les parois latérales et arrière, ainsi que sur le toit de la structure. Même si le chargement le plus important en termes de valeurs maximales de chargement, est celui qui agit sur la face avant du bâtiment, la détermination des charges agissant sur toutes les faces externes est importante si le comportement global du bâtiment à l'explosion est d'intérêt. Généralement, si la face avant d'une

structure est capable de résister à l'onde de choc, le reste de la structure sera également en mesure de rester structurellement sain et sauf car les charges agissant sur le reste des surfaces sont plus petites, par rapport à celles agissant sur l'avant.

## 5.2. Pression sur le toit

Pour le toit de la salle de contrôle les calculs commencent par le bord le plus proche de la source de l'explosion (point f, figure 20).

- La pression de crête incidente à cet endroit est égale à celle de la face avant, à savoir  $P_{sof} = 75 \text{ kPa}$
- La longueur d'onde au point f est déterminée à partir de la figure 14, et le rapport  $L_{wf}/L$  est calculé, après avoir calculé la distance mise à l'échelle  $Z_2$ .
- Distance du point  $D_{h2}$  entre le point f et le centre de détonation est :

$$D_{h2} = \sqrt{D^2 + 2h^2} = 65,38 \text{ m}$$

- La distance mise à l'échelle :  $Z_2 = \frac{D_{h2}}{\sqrt[3]{W}} = 3,88 \text{ m/Kg}^{1/3}$
- A partir de la figure 15 on a :

$$\frac{L_{wf}}{W^{1/3}} = 0,9 \Rightarrow L_{wf} = 15,15 \text{ m} \Rightarrow \frac{L_{wf}}{L} = \frac{15,15}{25} = 0,6$$

- Pour la pression de la phase positive le facteur équivalent de charge  $C_E$  est tiré de la Figure 21 :  $C_E = 0,32$
- La pression dynamique  $q_0$ , correspond à la pression incidente  $C_E P_{sof} = 24 \text{ KPa}$ , est déterminée à partir de la figure 13 :

$$q_0 = 2 \text{ kPa}$$

- A partir du tableau 7 le coefficient de traînée  $C_D = -0,4$ , l'équation (10) permet de calculer la pression positive maximale exercée sur le toit :  $P_R = C_E P_{sof} + C_D q_0 = 23,2 \text{ Pa}$
- Le temps de montée  $t_d$ , et la durée totale de la phase positive  $t_{of}$  sont également déterminés à partir des figures 22 et 23,

$$t_d = 1,8 \times W^{1/3} = 30,3 \text{ ms}$$

$$t_{of} = 6,6 \times W^{1/3} = 111 \text{ ms}$$

Les paramètres de lecture à partir des diagrammes ont été multipliés par  $W^{1/3}$  afin d'en tirer leurs valeurs absolues. Les résultats sont résumés dans le tableau 10.

Tableau 10 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour le toit

Toit	Longueur d'onde $L_w$ (m)	Ratio $\frac{L_{wf}}{L}$	Facteur équivalent de charge de la phase positive $C_E$	Temps de montée $t_d$ (ms)	Durée totale de la phase positive $t_{of}$ (ms)	$C_E P_{SOF}$ (kPa)	Pression positive maximale (kPa)
Valeurs mises à l'échelle	0,9			1,8	6,6		
Valeurs absolues	15,15	0,6	0,32	30,3	111	24	<u><b>23,2</b></u>

La même procédure a été utilisée pour calculer les paramètres de la phase négative. Celle-ci commence à  $t_0 = 57,23$  ms, (Tableau 8)

- Le facteur équivalent de charge de la phase négative  $C_{E-}$  obtenu à partir de la figure 21 est :  $C_{E-} = -0,20$

- La pression négative sur le toit est calculée comme suit :

$$P_{R-} = C_{E-} \cdot P_{sof} = -15 \text{ kPa}$$

- La durée totale de la de phase négative  $t_{of-}$  est obtenue à partir de la figure 23 :  $t_{of-} = 17 \times W^{1/3} = 286$  ms

- Le temps de montée  $T_{d-}$  est calculé par la formule :

$$t_{d-} = 0,25 \cdot t_{of-} = 71,5 \text{ ms}$$

Il est à noter que la pression maximale de la phase négative dépend uniquement de la pression incidente  $P_{sof}$  et non de sa combinaison avec la pression dynamique  $q_0$ . Les résultats des différents calculs sont donnés dans le tableau 11.

Tableau 11 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour le toit

Toit	Longueur d'onde $L_{w-}$ (m)	Ratio $\frac{L_{wf}}{L}$	Facteur équivalent de charge de la phase négative $C_{E-}$	Temps de montée de la phase négative $t_{d-}$	Durée totale de la phase négative $t_{of-}$	$P_{R-}$ (kPa)
Valeurs mises à l'échelle	2,6				17	
Valeurs absolues	43,7	1,75	-0,2	71,5	286	<b><u>-15</u></b>

Sur la base des paramètres déterminés, les diagrammes triangulaires des phases positive et négative de la variation de pression en fonction du temps sont présentés à la figure 32. C'est la pression à appliquer uniformément sur la surface du toit entier. Pour plus de clarté l'origine du temps a été réglée sur l'heure d'arrivée ( $t_A$ ) de l'onde sur la face avant de la salle de contrôle.

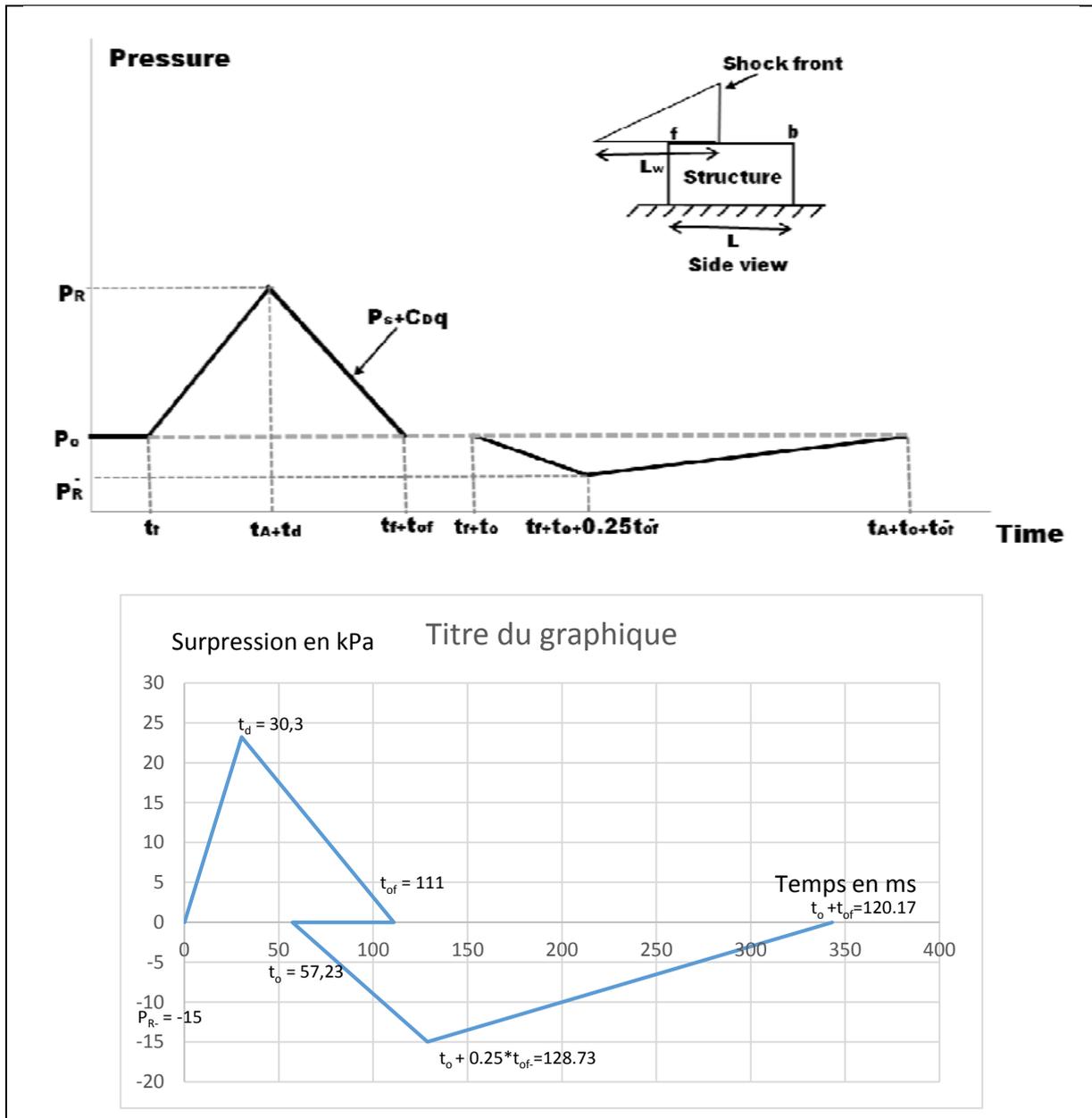


Figure 32 Diagrammes triangulaires des phases positive et négative de la variation de pression en fonction du temps

Dans le graphe de la figure 32, nous avons considéré  $t_r$  et  $t_A$  égale à 0. Pour bien expliquer, nous avons ajouté une courbe exemplaire.

### 5.3. Pression sur la paroi latérale

L'évolution temporelle de la pression pour les parois latérales de la structure est identique à celle déjà définie et représenté sur la figure 32, car les paramètres de soufflage sont identiques, tant que le bord avant du toit est utilisé comme référence pour la détermination de ces valeurs. Au contraire, pour la paroi arrière de la structure les paramètres seront différents car la distance de la source de l'explosion augmente.

### 5.4. La pression sur la paroi arrière

Les calculs se font en prenant comme référence le bord arrière du toit (point b, figure 20). La distance de la source d'explosion est :

$$D_3 = D + 25 = 90 \text{ m et la distance du point b est}$$

$D_b = \sqrt{90^2 + 7^2} = 90,27 \text{ m}$ , ainsi la distance mise à l'échelle, l'heure d'arrivée, la durée de la phase positive et la pression incidente pic sont données par la figure 15, et sont respectivement :

$$Z_b = \frac{90,27}{\sqrt[3]{W}} = 5,36 \text{ m} \cdot \text{Kg}^{-1/3}$$

$$t_A = 9 \times \sqrt[3]{W} = 151,48 \text{ ms},$$

$$t_0 = 4 \times \sqrt[3]{W} = 67,32 \text{ ms},$$

$$P_{sob} = 40 \text{ KPa}.$$

$$\text{Et aussi, } \frac{L_{wb}}{W^{1/3}} = 1,1 \Rightarrow L_{wb} = 18,51 \text{ m} \Rightarrow \frac{L_{wb}}{L} = 2,64. \text{ où, } L = h = 7 \text{ m}$$

A partir des figures 22 et 23, le temps de montée et de la durée fictive globale de la phase positive sont les suivants :

$$t_d = 0,6 \times \sqrt[3]{W} = 10 \text{ ms}$$

$$t_{of} = 3,14 \times \sqrt[3]{W} = 52,85 \text{ ms}$$

- De la figure 21 on a :  $C_E = 0,75$ ,
- Donc :  $C_E \cdot P_{sob} = 30 \text{ kPa}$
- Et à partir de la figure 15 :  $q_0 = 3 \text{ kPa}$
- Du Tableau 4 :  $C_D = -0,4$
- Et la pression positive maximale de la paroi arrière est :

$$P_R = C_E \cdot P_{sob} + C_D \cdot q_0 = \mathbf{28,8 \text{ KPa}}$$

Le tableau 12 regroupe les valeurs des paramètres de souffle calculés pour la phase de pression positive.

Tableau 12 Paramètres de la phase positive de l'onde de choc pour la face arrière

Face arrière	Pression incidente $P_{sob}$ (kPa)	Longueur d'onde $L_w$ (m)	Ratio $L_w/L$	Facteur équivalent de charge de la phase positive $C_E$	Temps de montée $t_d$ (ms)	Durée totale de la phase positive $t_{of}$ (ms)	$C_E \cdot P_{sob}$ (kPa)	Pression positive pic $P_R$ (kPa)
Valeurs mises à l'échelle		1,1			0,6	3,14		
Valeurs absolues	40	18,51	2,64	0,75	10	52,85	30	<b><u>28,8</u></b>

Une approche similaire est utilisée pour le calcul des paramètres de la phase négative de l'explosion. Les résultats sont donnés dans le tableau 13. Sur la base de ces données, le graphe de la figure 33 est construit, il représente la pression au niveau de la paroi arrière en fonction du temps. L'origine du temps dans a été fixée à l'heure d'arrivée ( $t_A$ ) de l'onde à la paroi arrière (point b). Cette origine a été déplacée vers la droite de 30,91 ms (=  $t_A(\text{arrière}) - t_A(\text{avant})$ ). C'est le retard du temps d'arrivée de l'onde de la face avant (point f) à l'arrière du bâtiment (point b).

Tableau 13 Paramètres de la phase négative de l'onde de choc pour la face arrière

Face arrière	Longueur d'onde $L_w -$ (m)	Ratio $L_w/L$	Facteur équivalent de charge de la phase négative $C_{E-}$	Durée totale de la phase positive $t_{of-}$ (ms)	Temps de montée $t_{d-}$ (ms)	$P_{R-}$ (kPa)
Valeurs mises à l'échelle	3,5			11		
Valeurs absolues	59	8,4	-0,29	185	46,25	-11,6

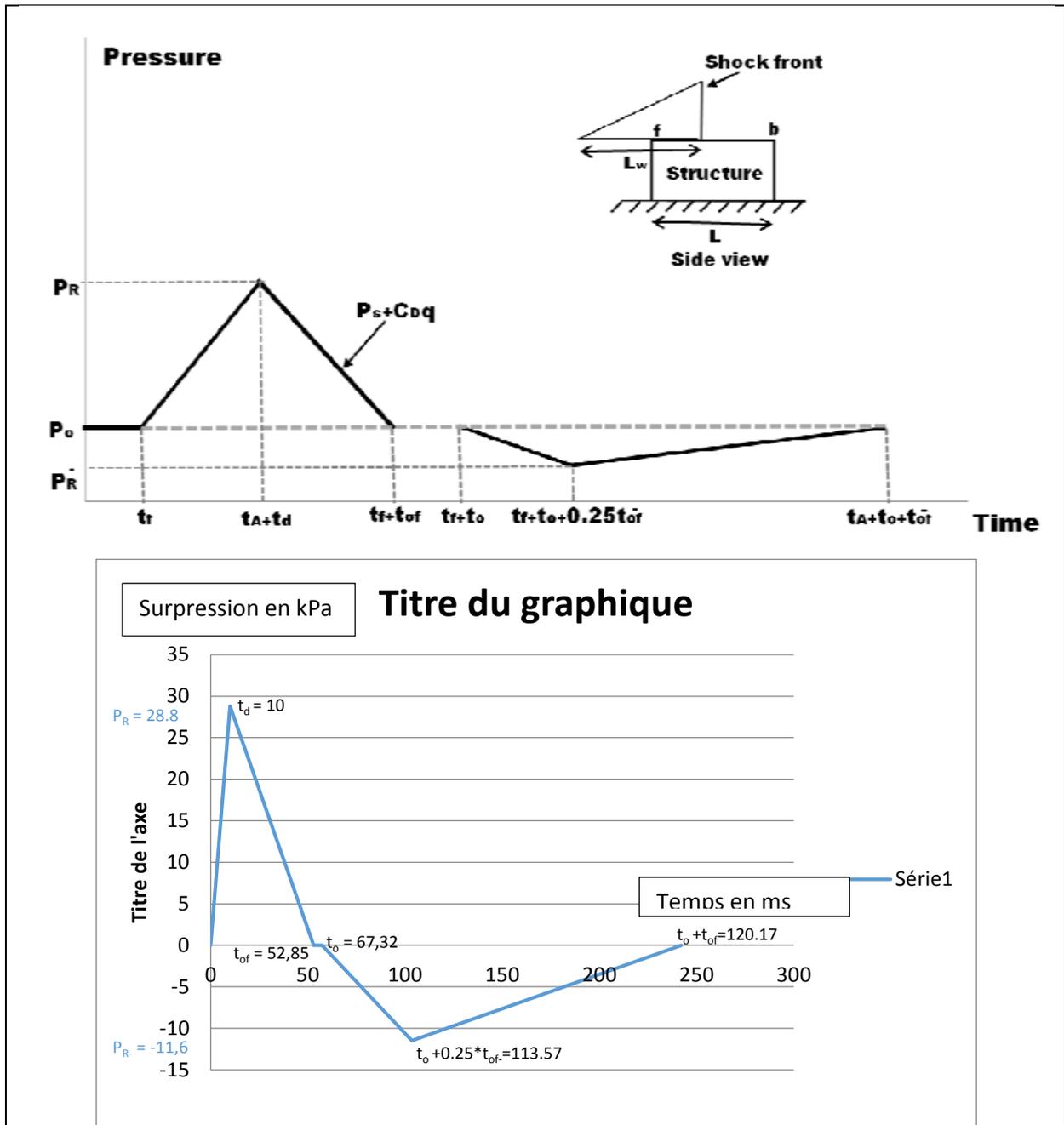


Figure 33 Pression au niveau de la paroi arrière en fonction du temps

Dans le graphe de la figure 33, nous avons considéré  $t_r$  égale à 0. Pour bien expliquer, nous avons ajouté une courbe exemplaire.

Le tableau 14 présente un récapitulatif des valeurs des paramètres de surpression calculées pour toute la structure (face avant, toit, parois latérales et arrière). Nous remarquons que la valeur de surpression la plus importante est celle trouvée pour la face avant ; ce qui est normale vu qu'elle est directement exposée au souffle de l'explosion.

Tableau 14 Valeurs des paramètres de surpression calculées pour toute la structure

	Face avant	Paroi latérale et Toit	Paroi arrière
Pression maximale positive (kPa)	<b><u>185,7</u></b>	23,2	28,8
Pression maximale négative (kPa)	-0,01	-15	-11,6
Temps fictif de la phase positive (ms)	57,23	111	52,85
Temps fictif de la phase négative (ms)	243	286	46,25

Pour la suite du travail, nous avons donc pris cette valeur de surpression comme base de calcul pour la modélisation par le logiciel PHAST et pour le dimensionnement du mur de protection pour assurer le maximum de sécurité à la structure étudiée à savoir la salle de contrôle.

## **6. MODELISATION DES PARAMETRES DE SURPRESSION PAR LE LOGICIEL PHAST**

Après avoir calculé les paramètres de surpression analytiquement, nous nous sommes proposé de les calculer en utilisant le logiciel PHAST pour vérifier et confirmer les résultats trouvés.

### **6.1. Description du logiciel PHAST**

Le logiciel PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) est un outil de calcul pour la modélisation des conséquences et l'analyse des risques. Il a été développé et commercialisé pour Rohm et Haas en 1989. Il offre plusieurs 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 ces situations. Il 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 industriel 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 risques industriels et de sécurité publique.

PHAST examine la 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, de l'explosion et de la toxicité.

Pour la modélisation et la quantification d'une explosion (objet de notre étude), ce logiciel emploie trois méthodes pour l'évaluation des effets de surpression :

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

Le logiciel PHAST présente plusieurs avantages :

- 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.

## **6.2. MODELISATION PAR LE LOGICIEL PHAST**

Dans cette partie, nous allons modéliser le phénomène d'explosion (VCE) pour le scénario de rupture catastrophique du ballon de GPL V209 pour confirmer les résultats des calculs trouvés par la méthode équivalent TNT. Nous allons situer la salle de contrôle dans la distance d'effet de surpression, et nous allons nous intéresser à la surpression maximale sur la face avant de la salle de contrôle (à 65 m de la source de l'explosion). La méthode utilisée est la méthode multi énergie, car elle nous permet d'avoir des valeurs de surpressions supérieures à 1 bar, alors que pour la méthode équivalent TNT, PHAST limite la surpression à 1 bar.

### 6.3. Résultats de la modélisation par logiciel PHAST

La modélisation nécessite les paramètres suivants :

- Le volume ou la masse de GPL contenu dans l'équipement :  $V = 83,5 \text{ m}^3$ .
- La pression de rupture de l'équipement :  $P = 29 \text{ bar}$ .
- Direction et vitesse de vent : on utilisera la direction et la vitesse du vent dominant à Hassi R'mel, qui est égale à  $6 \text{ m.s}^{-1}$ .
- Classe atmosphérique C (Annexe 4)

Les caractéristiques du ballon V209 sont mentionnées dans le tableau 7.

La figure 34 reprend les niveaux de surpressions associés au phénomène du VCE suite à une rupture catastrophique du ballon de GPL V209.

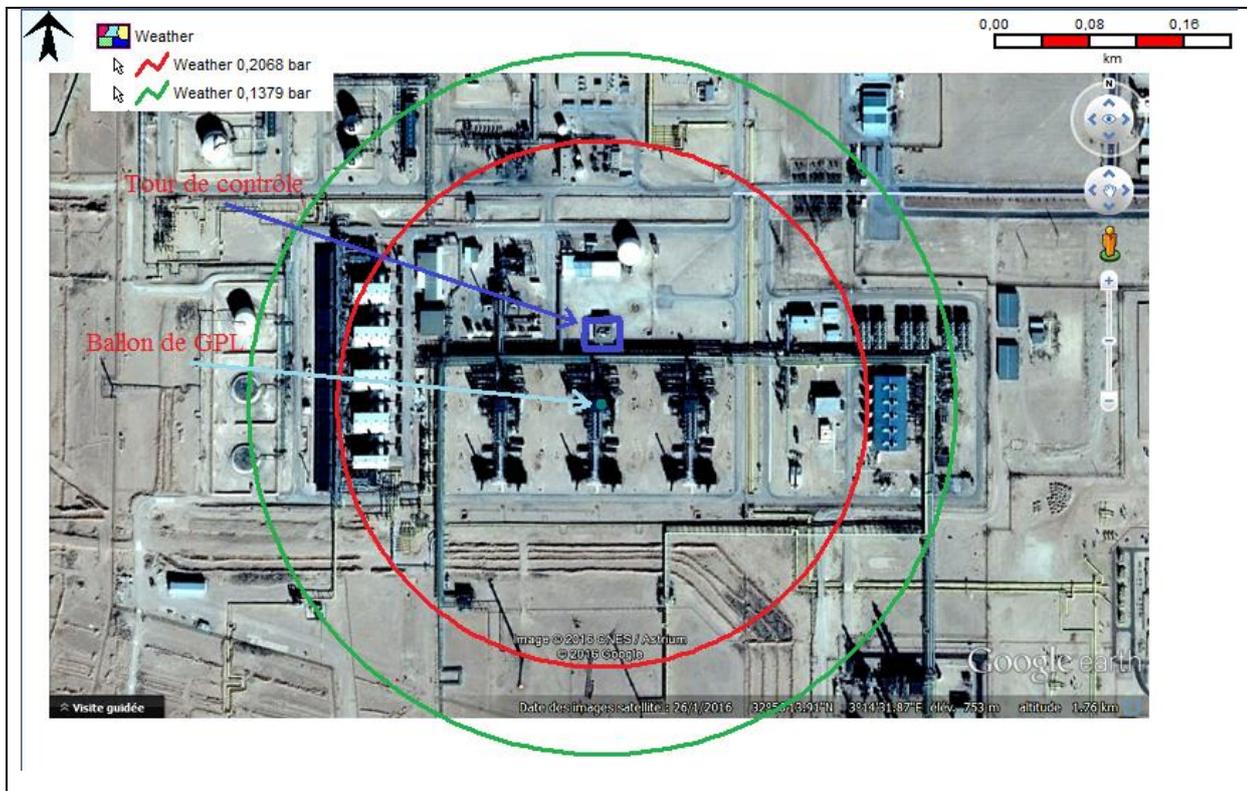


Figure 34 Niveaux de surpressions associés au phénomène du VCE suite à une rupture catastrophique du ballon de GPL V209

On voit bien que la salle de contrôle est dans la zone de létalité où la surpression est inférieure à 0,2068 bar

La courbe obtenue par le logiciel PHAST, représentant les variations de la surpression lors d'une rupture catastrophique du ballon V209 en fonction de la distance, est donnée en Figure 35.

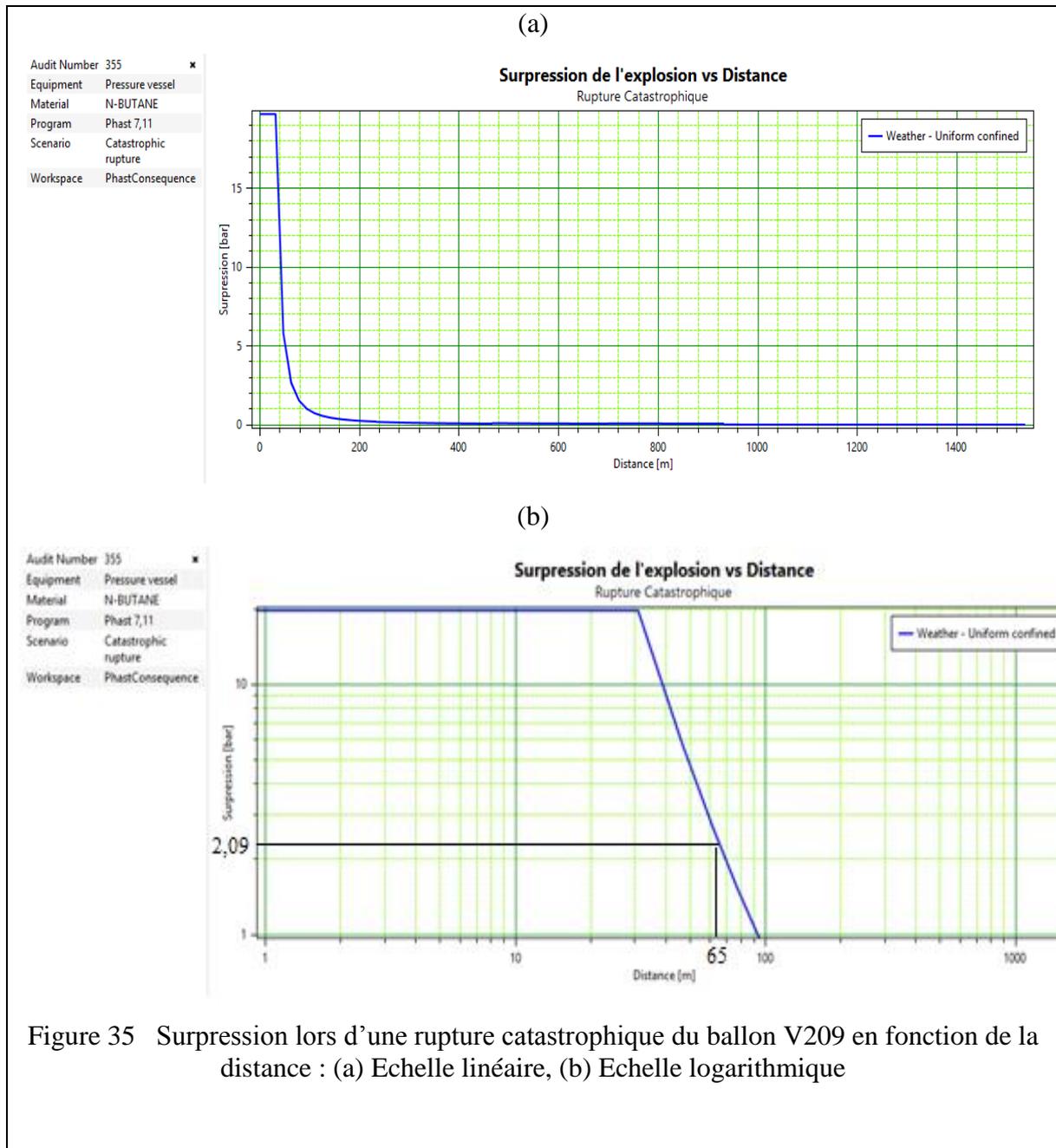


Figure 35 Surpression lors d'une rupture catastrophique du ballon V209 en fonction de la distance : (a) Echelle linéaire, (b) Echelle logarithmique

La salle de contrôle est à 65 m de la source de l'explosion. La surpression calculée par le logiciel Phast correspondant à cette distance, d'après la figure 35, est **2,09 bar**.

La surpression maximale sur la face avant calculée manuellement est **1,857 bar**.

Pour plus de précision, nous avons modifié les niveaux de surpression des cercles d'effets d'explosions, en leurs fixant les deux valeurs, déterminées par la méthode de calcul et modélisée par le logiciel PHAST.

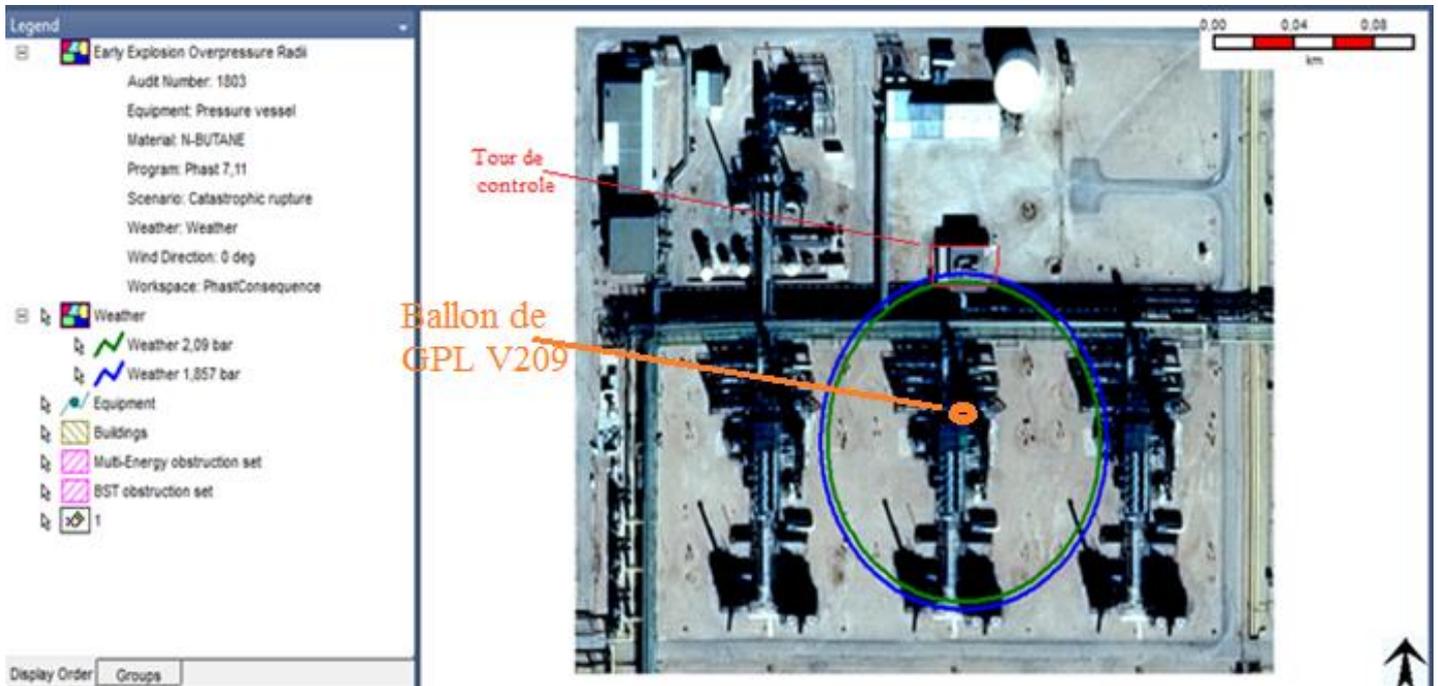


Figure 36 Niveau de surpression due à une rupture catastrophique de ballon de GPL V209 (en vert P=2,09 et en bleu P=1,857)

D'après les figures 35 et 36, on voit que la surpression maximale calculée manuellement (méthode équivalent TNT) est du même ordre de grandeur que celle modélisée par le logiciel PHAST. La petite différence observée peut être justifiée par :

- L'utilisation de deux modèles différents d'explosions
- L'incertitude sur le rendement réel de l'explosion par le modèle équivalent TNT.

## 7. DIMENSIONNEMENT DU MUR DE PROTECTION (BLAST PROOF)

Après avoir déterminé les paramètres de surpression de l'explosion, nous allons dimensionner le mur Blast Proof résistant à ces effets. Ce mur a été choisi parmi plusieurs propositions citées dans le Chapitre 3, car il permet de résister à une surpression supérieure à 48 kPa, il ne nécessite

pas l'arrêt de la production et son cout de réalisation est moins important par rapport aux autres propositions.

Nous avons trouvé deux valeurs de surpressions maximales sur la face avant par deux méthodes déférentes. Pour des mesures de précaution, nous allons prendre la plus importante (celle trouvée par le logiciel PHAST).

## **7.1. METHODE DE CALCUL DE LA RESISTANCE DES STRUCTURES AUX EXPLOSIONS**

Le comportement des structures soumises à une onde de pression n'est pas seulement en fonction de la surpression maximale de l'onde reçue, mais également de sa durée d'exposition et sa forme (INERIS, 2007).

Les méthodes employées pour déterminer la résistance des structures aux actions accidentelles sont de trois types (INERIS, 2007) :

- Méthodes empiriques qui sont les plus fréquemment utilisées pour l'évaluation des effets. On rencontre principalement des tableaux de dommages en fonction du niveau de pression (qualifiés par la suite de méthodes forfaitaires) ;
- Méthodes analytiques qui utilisent principalement une analogie masse ressort pour calculer un niveau de contrainte dans la structure qui est ensuite comparée à la contrainte de la rupture afin de déterminer si la structure reste intègre. Dans le domaine des risques accidentels l'approche en « pression-temps » est la plus pertinente. Cette méthode donne le choix entre le calcul statique élastique linéaire équivalent et le calcul dynamique non linéaire ;
- Les méthodes numériques qui permettent de coupler un code donnant le champs de pression appliqué à la structure à un code éléments finis permettant d'avoir la répartition de contraintes dans la structure.

### **7.1.1. Méthode analytique**

Cette méthode consiste à déterminer une pression statique équivalente par la relation suivante :

$$P_{se} = DLF \times P_{max} \quad (11)$$

Avec :  $P_{se}$  : pression statique équivalente

$P_{max}$  : pression maximale exercée sur la structure par l'onde de souffle.

Le coefficient DLF dépend du rapport entre la durée de la surpression et la période propre de l'élément de structure étudiée ( $t_0 / T$ ) et aussi de la forme de la courbe  $P(t)$ .

La démarche de ce type d'analyse met en œuvre les étapes suivantes :

- Détermination de la pression maximale et la durée du chargement ( $P$  et  $t$ ) ;
- Détermination de la période propre de l'élément étudié ( $T$ ) ;
- Déduction, en fonction du rapport ( $t_0 / T$ ), du DLF à partir de la figure 37 ;
- Calcul de la pression statique équivalente ;
- Utilisation des règles classiques en génie civil pour calculer les structures.

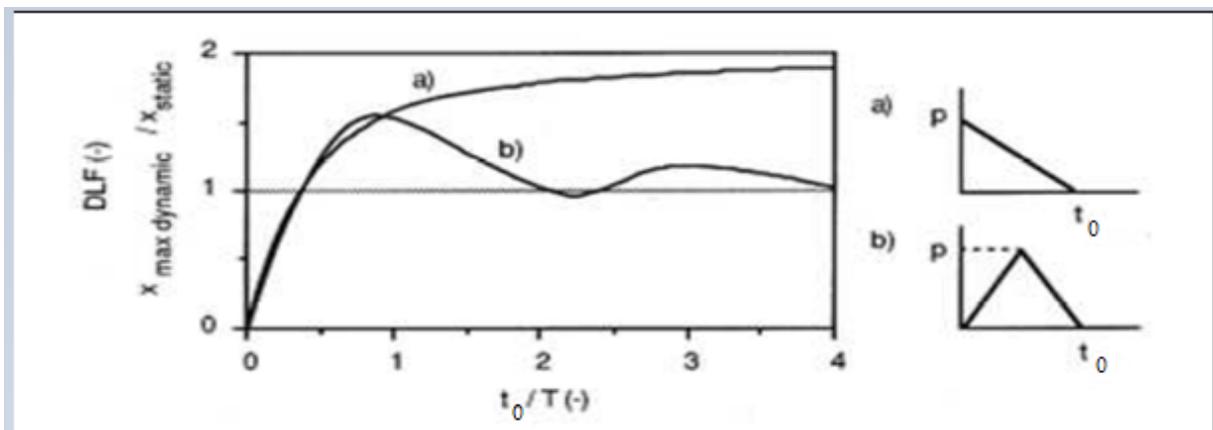


Figure 37 Facteur d'amplification dynamique

#### 7.1.1.1. Dimensionnement du mur

Nous allons utiliser les lois du génie civil pour calculer l'épaisseur minimale du mur qui permet de résister à des effets inférieurs ou égaux à 2,1 bar en utilisant un béton de ferrailles simple en un bloc, avec :  $M_{Ed} \leq M_{Rd}$

$M_{Ed}$  est le Moment maximal de calcul (déterminé à partir de l'équation (11),  $P$  la Pression générée par la surpression, et  $H$  la Hauteur du mur.

$$M_{Ed} = \frac{P \times H^2}{8} \quad (11)$$

Moment résistant du mur  $M_{RD}$  est donné par l'équation 12 :

$$M_{Rd} = A_s \times f_{ds} \left[ d - \frac{0,85 \times f'_{dc}}{2} \right] \quad (12)$$

Où :

$A_s$  : est la Section d'armature ;

$f_{ds}$ : la Contrainte dynamique de plastification des acier ;

$f'_{dc}$  : la Contrainte dynamique limite en compression du béton.

La Contrainte dynamique de plastification des acier peut être déterminée par l'équation (13) :

$$f_{ds} = 1,2 f_y + \frac{(1,05 f_u - 1,2 f_y)}{4} \quad (13)$$

Où ,  $f_y$  : est la Contrainte limite élastique des aciers ;

$f_u$  : la Contrainte ultime des aciers.

La Contrainte dynamique limite en compression du béton est calculée à partir de l'équation (14) :

$$f'_{dc} = 1,25 f_c \quad (14)$$

On suppose que  $M_{Ed} = M_{Rd} \Leftrightarrow \frac{P \times H^2}{8} = A_s \times f_{ds} \left[ d - \frac{0,85 \times f'_{dc}}{2} \right] \quad (15)$

D'où :

$$d = \frac{P \times H^2}{8 A_s f_{ds}} + \frac{0,85 \times f'_{dc}}{2} \quad (16)$$

Sachant que :  $d = 0,9 \times e \quad (17)$

L'épaisseur minimale du mur sera donnée par l'équation (18) :

$$e_{\min} = \frac{1}{0,9} \left[ \frac{P \times H^2}{8 A_s f_{ds}} + \frac{0,85 \times f'_{dc}}{2} \right] \quad (18)$$

### 7.1.1.2. Calcul de l'épaisseur minimale du mur

La pression maximale que nous allons considérer est celle calculée par le logiciel PHAST,  $P = 2,09$  bar, que nous arrondirons à  $2,1$  bar.

Les données nécessaires pour le calcul de la période de l'élément finie n'étant pas disponibles, donc pour plus de précautions, nous avons pris la valeur maximale :  $DLF=1,9$ .

La pression statique équivalente est donnée par la relation (19) :

$$P_{stat} = P_{dyn.} \times DLF = 2,1 \times 1,9 = 3,99 \text{ bar} \quad (19)$$

Le calcul de l'épaisseur minimale du mur anti déflagration correspond à un type de béton et de ferrailage simples. Les caractéristiques du mur sont :

- La hauteur de la salle de contrôle est égale à  $7$  m, pour une sécurité maximale nous allons prendre  $H=8$ m
- La largeur de la salle de contrôle est égale à  $25$  m, pour une sécurité maximale nous allons prendre  $L = 30$  m.

Les caractéristiques du béton et du ferrailage sont :

Acier Fe E50:  $f_y = 500$  MPa ;  $f_u = 550$  MPa

Béton C30 :  $f_c = 30$  MPa

Ferrailage 12 Ø 16 :  $A_s = 2,41 \times 10^{-3}$  m

$$\text{à partir de l'équation (13)} \Rightarrow f_{ds} = 1,2(500) + \frac{1,05(550) - 1,2(500)}{4} = 594,375 \text{ MPa}$$

$$\text{à partir de l'équation (14)} \Rightarrow f'_{dc} = 1,25 \times f_c = 1,25 \times 30 = 37,5 \text{ MPa}$$

On remplace dans (18)  $\Rightarrow$

$$e_{min} = \frac{1}{0,9} \left[ \frac{0,399 \times (8)^2}{8 \times 2,41 \times 10^{-3} - 3 \times 594,375} + \frac{\frac{2,41 \times 10^{-3} - 3 \times 594,375}{0,85 \times 37,5}}{2} \right] = 2,5 \text{ m}$$

L'épaisseur trouvée ( $2,5$  m) par cette méthode est irréalisable dans la réalité.

### 7.1.2. Méthode numérique

Pour résoudre ce problème, nous avons fait appel à un ingénieur en génie civil, qui nous a proposé 5 murs de soutènement de  $6$  mètres de largeur ;  $25$  centimètres d'épaisseur et  $8$  mètres

de hauteur. Chaque mur présente 2 poteaux à ses deux extrémités et une poutre tous les 2 mètres de hauteur (Figure 38).

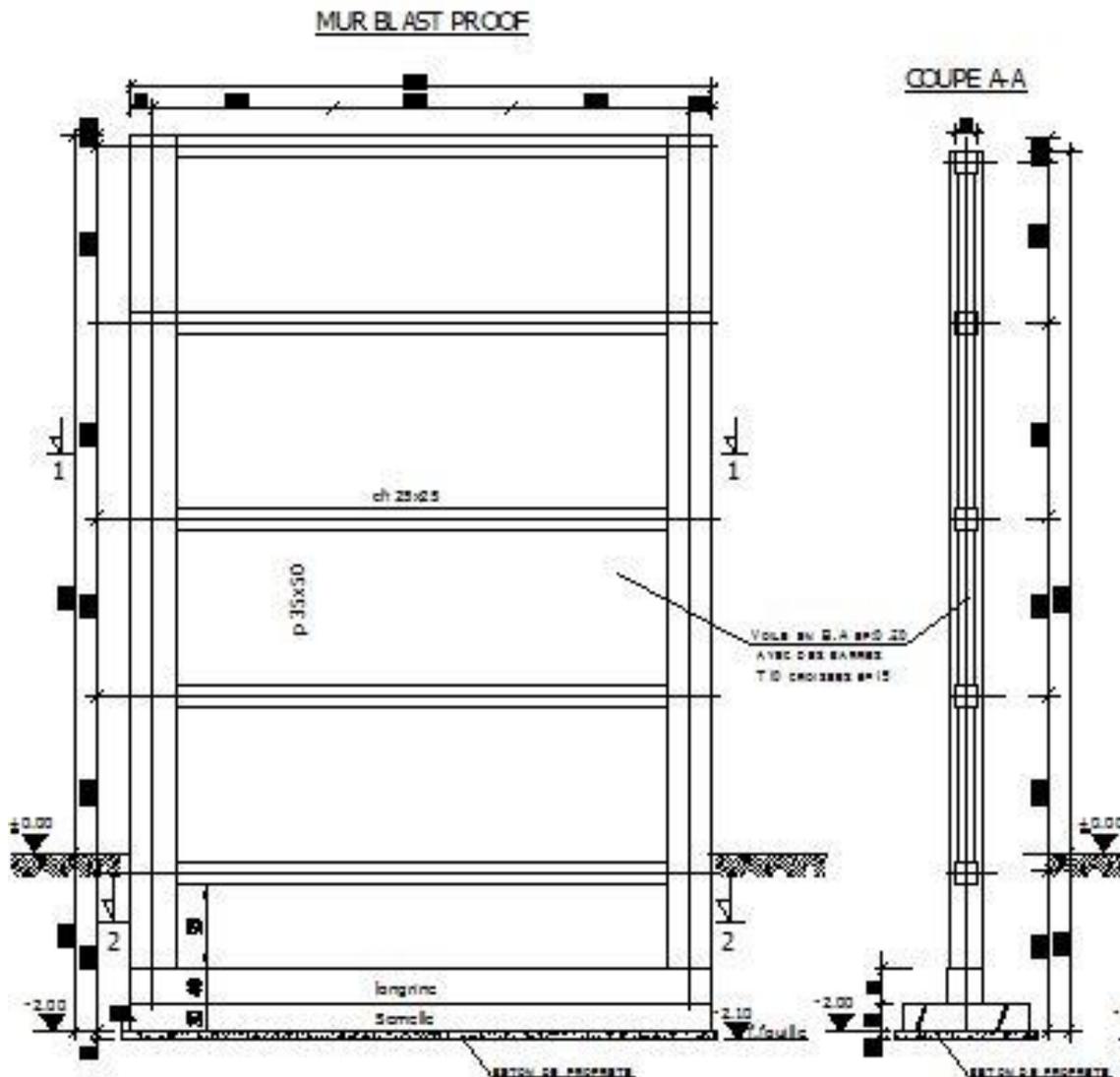


Figure 38 Structure du mur Blast proof avec poteaux et poutres

Pour confirmer la stabilité de cet ouvrage, nous avons utilisé le logiciel ROBOTBAT pour déterminer les caractéristiques de ce mur.

#### 7.1.2.1. Logiciel Autodesk Robot Structural Analysis Professional (ROBOTBAT)

C'est une application collaborative, polyvalente et rapide. Elle est capable de calculer les modèles les plus complexes grâce à un maillage automatique par éléments finis d'une puissance exceptionnelle, des algorithmes non linéaires, ainsi qu'un jeu complet de codes de conception,

pour des résultats quasiment instantanés. Autodesk Robot Structural Analysis Professional offre également l'avantage d'un flux de travail collaboratif plus fluide et d'une remarquable interopérabilité grâce à ses liaisons bidirectionnelles 3D vers les produits complémentaires Autodesk. L'API ouverte aide à offrir une solution d'analyse évolutive et adaptée à chaque pays pour des types de structure de bâtiments vastes et complexes. (Autodesk, 2010).

Les calculs donnés en annexe 5, ont montré que ce type de structure est stable et peut résister à la valeur de surpression calculée.

### **7.1.2.2. Estimation du coût de réalisation du mur**

À titre indicatif, nous avons considéré le prix du mètre cube du Béton Armé sur la base de 35000 DA.

Le volume du mur est :  $V = L \times H \times e = 30 \times 0,25 \times 8 = 60 \text{ m}^3$

La construction du mur anti déflagration nécessite  $60 \text{ m}^3$  de béton afin d'avoir les résistances voulues avec les dimensions calculées. Le prix du mur serait :

Prix =  $60 \times 35000 = 2100000 \text{ DA}$

L'entreprise doit donc déboursier 2,1 millions de dinars de marchandises pour la construction du mur anti déflagration. Ce coût qui pourrait réduire de dix fois les coûts indirects liés à une explosion est raisonnable, d'autant qu'il s'agit de protéger en premier lieu le personnel et les équipements de l'entreprise.

### **7.1.2.3. Positionnement du mur**

Ce mur a pour rôle de protéger les cibles humaines (employés) contre les effets de l'explosion.

Pour positionner le mur, nous avons deux possibilités, la première est de le mettre à 2 mètres de distance de la salle de contrôle, le deuxième cas est de le mettre à 7 mètres car il y a une route qui sépare la salle de contrôle des installations. Mais pour le premier cas, nous aurons des problèmes de visibilité des installations par la salle de contrôle, donc nous avons opté pour le deuxième cas. (voir la Figure 39)

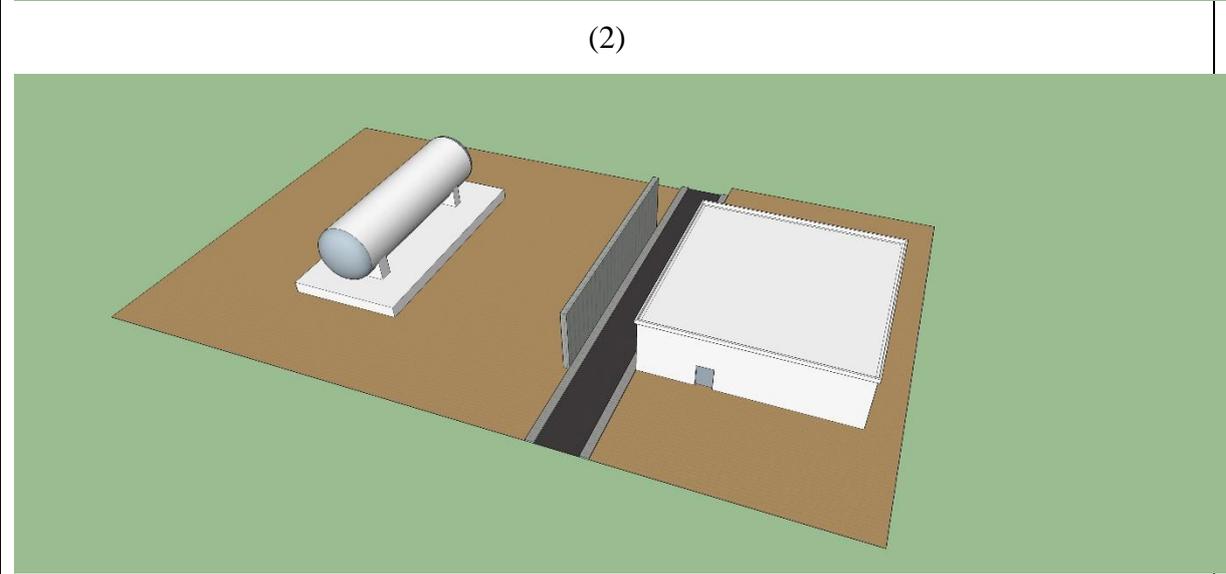
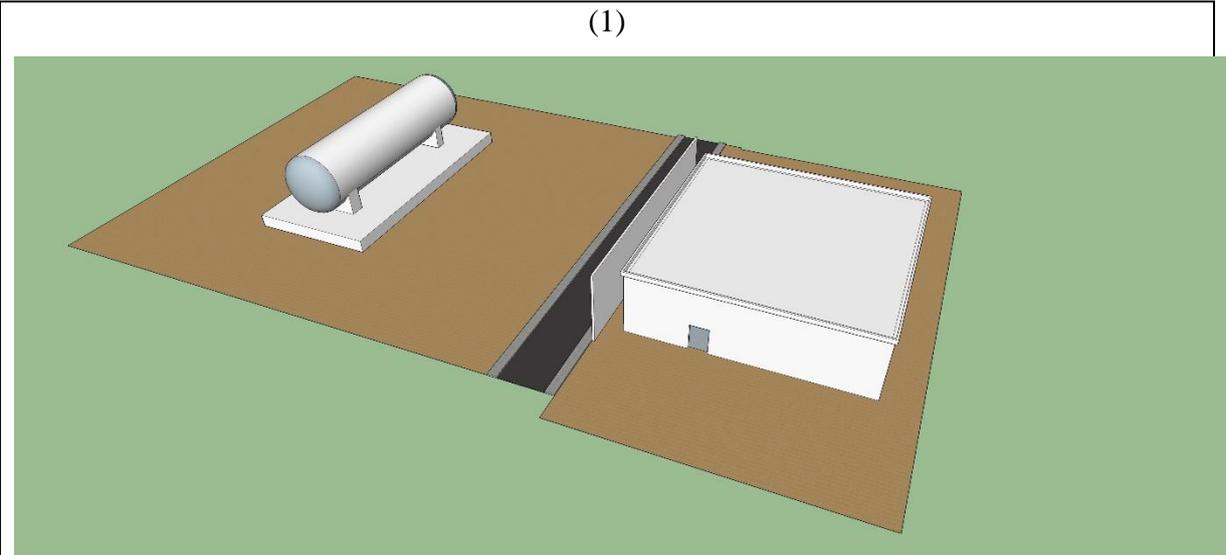


Figure 39 Positionnement du mur

## CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire de fin d'étude a comme objectif de répondre à la question, « **Comment protéger la tour de contrôle contre les effets de surpression des explosions dans le module 1, Sonatrach Hassi R'mel ?** » pour préserver la sécurité des personnes et des biens et réduire les conséquences financières des effets d'explosions.

Cette problématique a été définie après avoir examiné l'intégrité des barrières de sécurité des scénarios de risques majeurs dans le module 1 par l'étude LOPA.

Pour ce faire nous avons mené dans un premier temps une recherche bibliographique sur les aspects théoriques relatifs aux phénomènes d'explosions dans les installations pétrochimique.

En nous basant sur les équations théoriques, nous avons pu déterminer les paramètres de surpression sur toute la structure de la tour de contrôle à savoir la face avant, les parois latérales et arrière et le toit. Le modèle adopté pour les calculs est le modèle de l'équivalent TNT.

Les valeurs de surpression trouvées sont de 1,857 bar pour la face avant ; 0,233 bar pour les faces latérales et le toit, et 0,288 bar pour la face arrière. Les temps fictifs correspondant à ces valeurs de surpression ont également été déterminés aussi bien pour la phase positive que pour la phase négative du souffle de l'explosion.

Les résultats obtenus ont montré que la valeur de surpression la plus importante est celle trouvée pour la face avant ; ce qui est normale vu qu'elle est directement exposée au souffle de l'explosion.

Pour confirmer ce résultat, nous avons procédé à une modélisation des effets de surpressions par le logiciel PHAST ; la valeur obtenue est de 2,09 bar. Cette valeur est comparable à celle calculée analytiquement.

Sur la base de la valeur maximale de surpression déterminée, nous avons proposé un modèle de protection des salles de contrôle. Pour notre cas, la mesure la plus efficace serait la construction d'un mur en béton armé coulé sur place (Blast Proof) vue sa capacité d'amortir l'onde de choc calculée, sa mise en place ne nécessite pas l'arrêt de la production et son cout de réalisation est moins important par rapport aux autres mesures de protection.

Pour dimensionner ce mur, nous avons proposé en premier lieu une structure en un bloc avec un ferrailage simple. La valeur de l'épaisseur du mur déterminée est égale à 2,5 mètres. Cette

valeur est matériellement irréalisable. Ceci nous a amené à proposer un autre type de structure constituée d'un bloc avec un poteau tous les 6 mètres et une poutre tous les 2 mètres. La stabilité de cet ouvrage a été confirmée par le logiciel ROBOTBAT.

Ce travail est une contribution pour la maîtrise des effets de surpression dans les installations pétrochimiques et plus précisément au niveau des tours de contrôle. Il serait intéressant de continuer cette étude en développant les points suivants :

- Evaluer les effets de surpression pour les trois autres scénarios des risques majeurs susceptibles de se présenter au niveau du MPP1 ;
- L'importance d'élaborer des textes réglementaires exigeant la mise en place des tours de contrôle anti déflagration avant l'exploitation de l'installation, ou alors l'installation des tours de contrôle dans des zones de moindre risques pour éviter les effets de surpression des explosions.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARIA. (2016, 06 10). *Bleve de sphères GPL dans une raffinerie suite à un séisme*. Récupéré sur ARIA : retour d'expérience sur accidents technologiques: <http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/40256/>
- ASCE (American Society of Civil Engineers). (1997). *Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*. New York: R. W. Clough and J. Penzien, McGraw-Hill BookCompany.
- Autodesk. (2010). *Une analyse complète de vos projets de structure*. Paris, France.
- CCPS (Center for Chemical Process Safety). (2001). *Layers of Protection Analysis, Simplified Process Risk Assessment*. New York.
- DET NORSKE VERITAS (DNV). (2010). *Etudes Analyse de Risque Quantitative (QRA) des unités industrielles de la Division Production SONATRACH DP*. Hassi R'Mel Centre.
- Duy-Hung Duong. (2012). *Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*. Orléans, France.
- INERIS. (2007). *La résistance des structures aux actions accidentelles*. France.
- Izouaouen, N. (2015). L'Algérie produira 151 milliards de m<sup>3</sup>/an de gaz en 2019. *L'Econews*.
- JGC Corporation. (2007). *METHODOLOGY FOR LOPA (LAYER OF PROTECTION ANALYSIS)*. Hassi R'mel Algeria .
- Lagadec, P. (2008). *Le risque technologique majeur*. Paris Oxford: PERGAMON PRESS.
- SKIKDA, C. G. (2004). *Explosion du complexe pétrochimique GNLIK Zone industrielle Skikda*. Skikda.
- SOLOMOS, V. K. (2011). *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Italy.
- SONATRACH. (s.d.). Hassi R'mel.
- SONATRACH Activité aval . (2001). *Calculation sheet of Blast Proof Evaluation For Local Control Room*. Arzew.
- SONATRACH. (s.d.). *Manuele Opérateur du module 1*. Hassi R'mel.
- Techniques de l'ingénieur. (2009). *Évaluation des effets d'une explosion de gaz à l'air libre*. Paris.
- Téchniques de l'ingénieur. (2009). *Risque d'explosion*. France: T . I.

## **ANNEXES**

## ANNEXE 1 :

## La feuille d'étude de LOPA

Description de l'impact de l'évènement	Mesures de mitigation supplémentaire	Discrétion de l'évènement	Degré de gravité	cause	Les couches de protection											
					Protection					Mitigation						
					Conception du process	BPCS	Alarmes, opérateur, etc.	SIS	Dispositif de secours	ESD/EDP	Système anti incendie	Protection physique	Contrôle administratif	Réponse d'urgence	Facteur de fonctionnement	
1.0 Grande fuite de gaz à MPP1 (original)	1.0 Aucun	Explosion retardée du gros nuage de gaz et des dégâts sur la salle de contrôle	4	(Cause) Dommages mécaniques (par exemple par les grues)			Opérateur conscient de la rupture par une faible pression d'entrée Séparateur				Aucun système d'arrêt à faible pression, mais l'opérateur actionne PICA-901			Permis de travail sur place		
				0.01	1	1	0.1	1	1	0.5	1	1	0.1	1	1	
				(Cause 2) Une fuite de gaz est alimentée au four (l'excès de cuisson et la rupture de la tuyauterie d'entrée)		TIC commande de tir FG		Processus TAHH arrêt FG offre		Système d'arrêt	Pulvérisateur d'eau					
				0.01	1	1	1	0.1	1	0.5	0.1	1	1	1	1	
1.0 Grande fuite de gaz MPP1	1.1 (1) Modifier la salle de contrôle par une construction résistante ou installer le mur de souffle (blast proof)	Explosion retardée du gros nuage de gaz et de dégâts sur la salle de contrôle	4	(Cause 1) Dommages mécaniques (par exemple par les grues)			Opérateur conscient de la rupture par une faible pression d'entrée Séparateur				Aucun système d'arrêt à faible pression, mais l'opérateur actionne PICA-901			Permis de travail sur place		
				0.01	1	1	0.1	1	1	0.5	1	1	0.1	1	1	
				(Cause 2) Fuite de		TIC comm		Processus		Système d'arrêt	Pulvérisateur d'eau					

Annexe

				gaz alimentée au four et excès de feu ou explosion		ande de tir FG		TAHH arrêt FG offre						
				0.01	1	1	1	0.1	1	0.5	0.1	1	1	1
1.0 Grande fuite de gaz à MPP1	1.2 (1) ci-dessus + (2) Fournir un SIS (SD four par détection de gaz à l'entrée d'air du four	Explosion retardée du gros nuage de gaz et des dégâts sur la salle de contrôle	4	(Cause 1) Dommages mécaniques (par exemple par les grues)			Opérateur conscient de la rupture par une faible pression d'entrée Séparateur			Aucun système d'arrêt à faible pression, mais l'opérateur actionne PICA-901			Permis de travail sur place	
				0.01	1	1	0.1	1	1	0.5	1	1	0.1	1
				(Cause 2) fuite de gaz est alimenté au four et l'excès de feu ou d'explosion		TIC commande de tir FG		Processus TAHH arrêt FG offre		Système d'arrêt	Pulvérisateur d'eau			
				0.01	1	1	1	0.1	1	0.5	0.1	1	1	1

Suite du tableau (à droite) :

Facteur de vulnérabilité (pour seulement la sécurité)	Probabilité d'ignition (pour seulement la sécurité)	probabilité réduite	TMEL	Les résultats de LOPA	Réduction supplémentaire requise	Recommandation	Note
12 Opérateur x 4 heures / jour au niveau du site et 6 opérateurs dans la salle de contrôle	Gaz/liquide inflammable	3.00E-05	1.00E-05	Exiger une atténuation supplémentaire	0.33333333		
1	0.3						
12 Opérateurs x 4 heures / jour au niveau du site	Gaz/liquide inflammable	1.50E-05	1.00E-05	Exiger une atténuation supplémentaire	0.66666667		
0.5	0.3						
12 Opérateurs x 4 heures / jour au niveau du site	Gaz/liquide inflammable	8.25E-06	1.00E-05	Passe LOPA	Aucune exigence		
0.5	0.3						

**ANNEXE 2 : Liste des recommandations de LOPA :**

N°	Place	Cause	Conséquences	Recommandations	Responsabilité d'actions	Remarques
1	MPP1	Dommages mécaniques par machine	Suppression d'explosion et rayonnement thermique.	Modifier le bâtiment de contrôle par une construction résistante ou installer le mur de souffle (blast proof) pour salle de contrôle	Département technique	
2	MPP1	Fuite de gaz dans le four	Suppression d'explosion et rayonnement thermique.	Fournir un System d'Instrument de sécurité pour l'arrêt de chaque four par détection de gaz à l'entrée d'air du four	Département des opérations	
3	MPP1	Dommages mécaniques par machine	Rayonnement thermique élevé entraînant des dommages sur le réservoir de GPL et BLEVE.	Fournir de l'eau pulvérisée pour assurer une pleine couverture (Ajouter un jet d'eau pour la moitié inférieure du réservoir de GPL en plus de celui à la partie supérieure)	Département HSE	
4	MPP1	Dommages mécaniques par machine	Rayonnement thermique élevé entraînant des dommages sur le réservoir de GPL et BLEVE.	Faire une pente du fond du réservoir au bord de réservoir.	Département des Opérations	
5	MPP1	Dommages mécaniques par machine	Rayonnement thermique élevé entraînant des dommages sur le réservoir de GPL et BLEVE.	Fournir une ligne d'injection d'eau dans le réservoir inférieur GPL	Département des Opérations	

**ANNEXE 3 : valeurs indicatives de chaleur de détonation de quelque explosifs**

Nom de l'explosif	Energie de detonation en MJ/Kg
TNT	4,10 – 4,55
C4	5,86
RDX	5,13 – 6,19
PETN	6,69
PENTOLITE 50/50	5,86
NITROGLYCERIN	6,30
NITROMETHANE	6,40
NITROCELLULOSE	10,60
AMON./NIT. (AN)	1,59

**ANNEXE 4 : Conditions météorologiques utilisées pour les modélisations d'accidents majeurs (DET NORSKE VERITAS (DNV), 2010)**

Conditions	Vitesse de vent (m/s)	Stabilité de l'air	Humidité (%)	Température de l'air (°C)
Jour Eté	6	C	20	45
Jour Hiver	4	B	30	20
Nuit Eté	3	D	30	20
Nuit Hiver	2	F	60	0

## **Annexe 5 : Calculs trouvés par le logiciel ROBOTBAT :**

Etude en génie civil du Blast Proof

### **HYPOTHESE DE CALCULS**

#### **BETON**

Soit un béton dose a 350 kg/m<sup>3</sup> avec utilisation du ciment CPA ,

contrôle atténue, densité : 2500 kg/m<sup>3</sup> .

#### **Résistance nominale a 28 jours**

Compression  $\sigma'_{28} = 270 \text{ kg/cm}^2$ .

Traction  $\sigma_{28} = 23.2 \text{ kg/cm}^2$ .

#### **Contraintes admissibles**

$\sigma'_b = 137 \text{ kg/cm}^2$  (flexion simple)

$\sigma'_{bo} = 68.5 \text{ kg/cm}^2$  (compression simple)

$\sigma'_b = \sigma'_{bo} (1+2e/ht)$  (flexion composée)

$\sigma_b = 5.9 \text{ kg/cm}^2$  (traction simple)

$$\tau_b = 1.15 \sigma_b \text{ (cisaillement dalle)}$$

$$\tau_b = 3.5 \sigma_b \text{ (cisaillement poutre si } \sigma'_b < \sigma'_b o)$$

$$\tau_b = (4.5 - \sigma'_b / \sigma'_b o) \sigma_b \text{ (cisaillement poutre si } \sigma'_b o < \sigma'_b < 2\sigma'_b o)$$

## ACIER

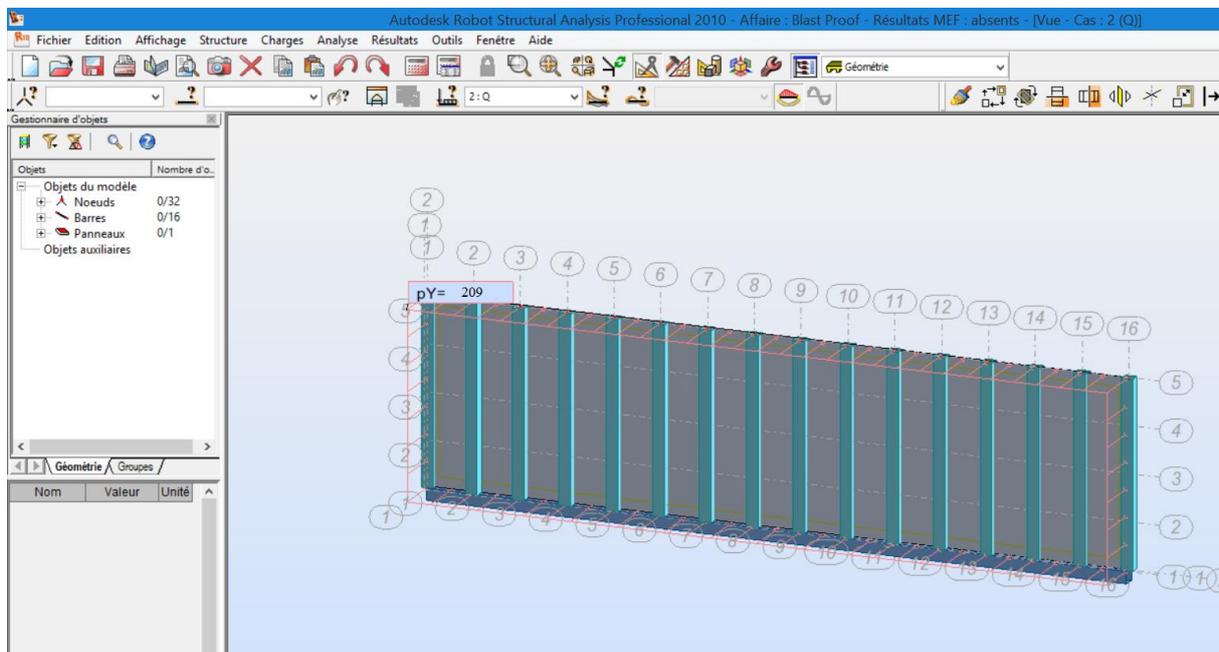
Soit un acier a haute adhérence FeE40.

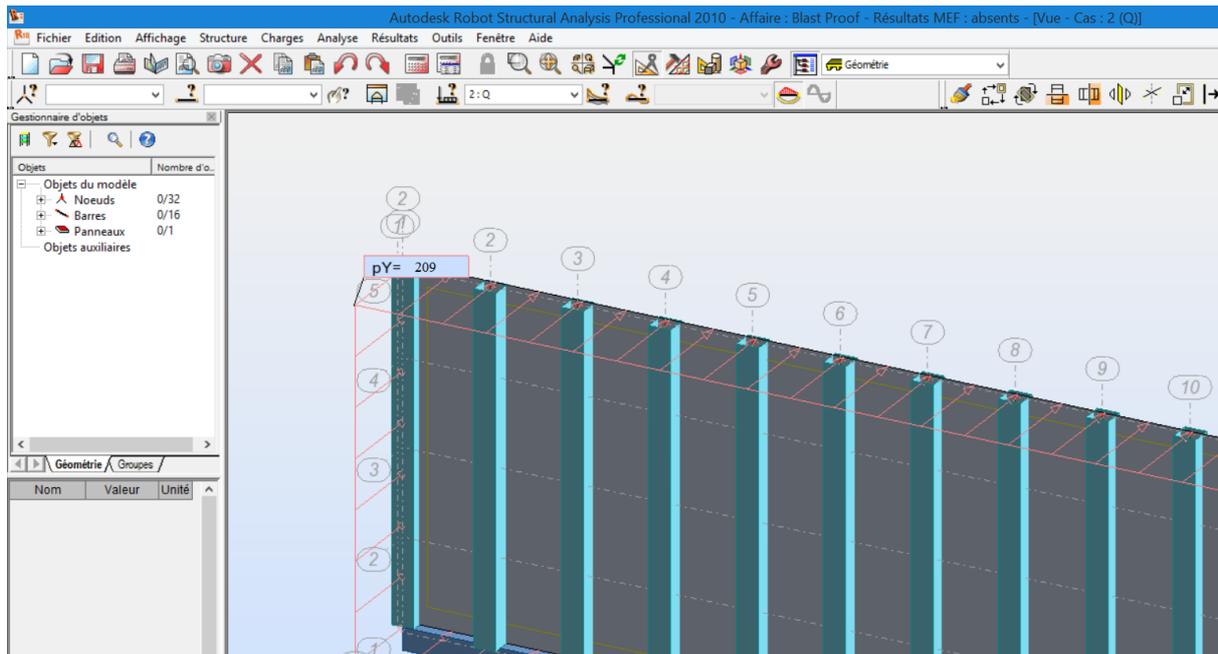
Contraintes admissibles

$$\sigma_{adm} = 2800 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{en} = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

Vue en 3D de la structure dans Autodesk Robotbat:





Force

Force horizontale = 209 kPa

SOL

$$\sigma_{sol} = 3.0 \text{ kg/cm}^2$$

Le projet consiste à la réalisation d'un mur en béton armé Blast Proof protégeant la salle de contrôle des effets de surpression de l'explosion, Ce dernier est constitué par un quadrillage de poteaux et de chaînages puis d'un remplissage en béton.

Pré dimensionnement

**Poteaux : 25x40**

**Chaînages : 20x20**

**Longrines : 40x40**

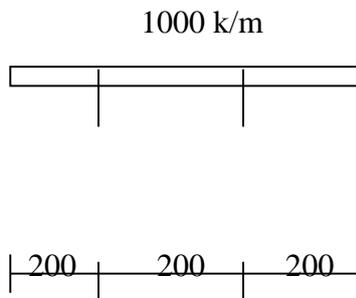
**Béton : ep :0.20**

**Calcul du chaînage**

Poids propre----- 0.20x0.20x2500 -----100 kg/m

Béton ----- 1.80x0.20x2500 -----900 kg/m

-----  
 $Q = 1000 \text{ kg/m}$



$$M_0 = 1000 \times (2.00)^2 / 8 = 500 \text{ kg.m}$$

$$M_o = 0.5 \times 500 = 250 \text{ kg.m}$$

$$M_t = 0.81 \times 500 = 405 \text{ kg.m}$$

**Ferraillage en travée et appuis**

$$A = 2 \text{ T12 (2.26)} \quad \omega = 0.665 \quad K = 26.9 \quad \varepsilon = 0.8807$$

$$\sigma'a = 24462 / 0.8807 \times 17 \times 2.26 = 722.94 \text{ kg/cm}^2 < 2800$$

$$\sigma'b = 722.94 / 26.9 = 26.88 \text{ kg/cm}^2 < 137$$

**Effort tranchant**

$$T = 604 \times 2.00 / 2 = 604 \text{ kg} \quad \tau_b = 604 \times 8/7 \times 20 \times 17 = 2.03 \text{ kg/cm}^2$$

Soit un cadre T8 e = 20cm constant

**Calcul du poteau**

Effort normal sur poteau :

Poids poteau----- 0.25x0.40x7.2x2500 ----- 1800 kg  
Poids chainage ----- 4x0.20x0.20x2.00x2500 ----- 800 kg  
Poids parpaing ----- 1.60x5.30x0.20x1400 -----2374.4 kg

-----  
N = 4974.4 kg/m

EHM/MP

Pression dynamique du vent :  $q = 70 \text{ daN/m}^2$        $B_z = 0.8$        $S_z = 1$

$Q_z = 70 \times 0.8 \times 1 = 56 \text{ daN/m}^2$

Charge horizontale du au vent :  $Q = 56 \times 5.9 \times 2.00 = 660.8 \text{ kg}$

Moment de renversement à la base :

$M_r = 660.8 \times 2.95 = 1949.36 \text{ kg.m}$        $e = 194936 / 4974.4 = 39.2 \text{ cm} > ht/6(\text{part comp})$

Moment /aciers tendus :

$M = M_r + N_x(ht/2 - d) = 194936 + 49744 = 244680 \text{ kg.cm}$

### Ferraillage en console et travée

$A = 2T14 + 2T12 (5.34)$        $\omega = 0.607$        $K = 28.4$        $\varepsilon = 0.8848$

$\sigma'_a = 244680 / 0.8848 \times 22 \times 5.34 = 2353.9 \text{ kg/cm}^2$

$\sigma'_b = 2353.9 / 28.4 = 82.88 \text{ kg/cm}^2$

### Cisaillement

$$T = 660.8 \text{ kg} \quad \tau_b = 660.8 \times 8/40 \times 7 \times 22 = 0.86 \text{ kg/cm}^2$$

Soit un cadre T8 e = 15cm constant

### Fissuration

$$A = 2T14 + 2T12 \text{ (5.34)} \quad B_f = 200 \quad \omega_f = 0.0226 \quad \sigma_1 = 3612.58 \text{ kg/cm}^2 > \sigma_a$$

(vérifiée)

### Calcul de la semelle

Soit une semelle filante de 1.40m de largeur 0.30m d'épaisseur avec une longrine de 40x40.

Charge reprise par poteau : 4974.4 kg

Poids de la semelle+longrine : 2900 kg

Effort sur normal semelle : 7874.4 kg

$$E = 194936 / 7874.4 = 24.75 \text{ (dans le } 1/3 \text{ central)}$$

$$\sigma_s = 7874.4 / 140 \times 200 (1 + 6 \times 24.75 / 200) = 0.49 \text{ kg/cm}^2$$

$$M = 4900 \times 2.00 \times (0.50)^2 / 2 = 1225 \text{ kg.m}$$

### Sens transversal

$$A = 8T10 \text{ (6.28)} \quad \omega = 0.121 \quad K = 71.5 \quad \varepsilon = 0.9422$$

$$\sigma'_a = 122500 / 0.9422 \times 26 \times 6.28 = 796.27 \text{ kg/cm}^2$$

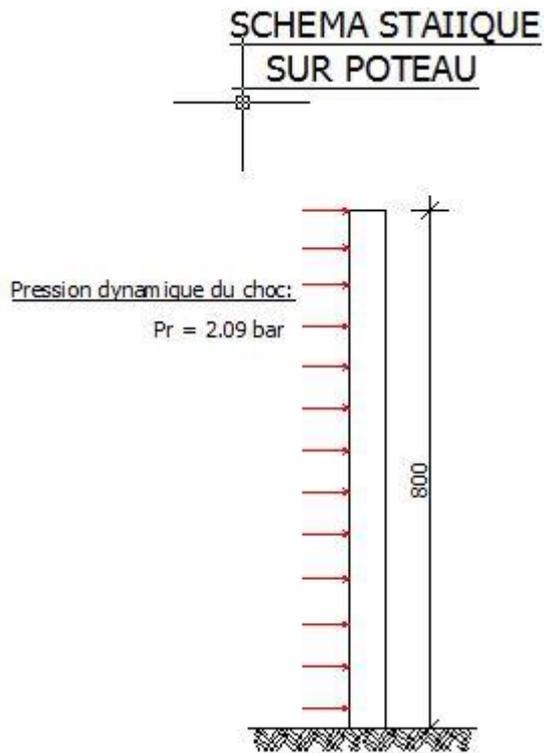
$$\sigma'_b = 796.27 / 71.5 = 11.14 \text{ kg/cm}^2$$

Soit T10 = 20cm

### Longrine 40X40

Soient 2x4T10 filantes en nappe supérieure et inférieure avec des cadres croisés espacement 20cm en armatures transversales.

### Shéma de ferrailage:



**Annexe 6 : Ferrailage du mur**

