



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Office National Des Substances Explosives
Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Augmentation des capacités des zones de stockage d'explosif de classe 1.1, Caractérisation et modélisation des effets d'explosion d'un dépôt

AMROUN Karim

Et

YOUNSI Yacine

Présenté et soutenu publiquement le 20 - 06 - 2018 devant le jury composé de :

<i>Président</i>	M. BENKOUSSAS Bouzid	Professeur à l'ENP
<i>Examineur</i>	M. DJILI Atmane	Maitre-assistant A à l'ENP
<i>Encadreur</i>	Mme. BENTAALLA Souad	Maitre-assistant A à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. BOUSBAI M'hamed	Maitre de conférence B à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. SAOUNE Tarzi	Responsable HSE à l'ONEX



Département Maîtrise des Risques Industriels et Environnementaux
Office National Des Substances Explosives

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
QHSE-GRI

Augmentation des capacités des zones de stockage d'explosif de classe 1.1, Caractérisation et modélisation des effets d'explosion d'un dépôt

AMROUN Karim

Et

YOUNSI Yacine

Présenté et soutenu publiquement le 20 - 06 - 2018 devant le jury composé de :

<i>Président</i>	M. BENKOUSSAS Bouzid	Professeur à l'ENP
<i>Examineur</i>	M. DJILI Atmane	Maitre-assistant A à l'ENP
<i>Encadreur</i>	Mme. BENTAALLA Souad	Maitre-assistant A à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. BOUSBAI M'hamed	Maitre de conférence B à l'ENP
<i>Encadreur</i>	M. SAOUNE Tarzi	Responsable HSE à l'ONEX

Dédicaces

À la mémoire de mes Grands Parents

À mes chers parents Mourad et Nouara

À mes deux frères Sofiane et Hocine

À ma sœur Imene

*À tous mes chers amis et à tous ceux que je garde dans mon
cœur*

*Et que le fait d'être lu soit notre plus bel accomplissement sur
terre.*

Je dédie ce modeste travail

Dédicaces

À la mémoire de mes Grands Parents

À mes chers parents Salah et Khedidja

À mes chers frères Tarek, Walid, Housseem et Radouane

À ma chère sœur Noudjoud

*À tous mes chers amis et à tous ceux que je garde dans mon
cœur*

Je dédie ce modeste travail

YOUNSI Yacine

Remerciements

Nous souhaitons remercier en premier lieu le **Général Major Chouaki Rachid** directeur des fabrications militaires ainsi que **Mr Amroun Djamel** directeur général de l'EHC / Etablissement d'Habillage et de Couchage. Sans lesquels le présent travail n'aurait pas vu le jour.

Nos vifs remerciements s'adressent également au **Mr Selakh Antar** Directeur Général de l'Office National Des Substances Explosives (ONEX) ainsi qu'au **Mr Belhouchi Abdenacer** directeur du Complexe de production et de vente de Miliana.

Nous remercions le **Mr Saouane Tarzi** DHSI pour nous avoir acceptés au sein de son équipe, ainsi que **Dr Bousbai M'hamed** et **Dr Bentaalla Souad** encadreurs de ce travail. Nous leurs sommes infiniment reconnaissants pour le temps conséquent qu'ils nous ont accordé, leurs qualités pédagogiques et scientifiques, leurs franchise et leurs sympathie. Nous avons beaucoup appris à leurs côtés, Nous leurs adressons notre gratitude pour tout cela, pour leurs attentions de tout instant sur nos travaux, pour leurs conseils avisés et leurs écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de ce mémoire. Leur énergie et leur confiance ont été des éléments moteurs pour nous. Nous avons pris un grand plaisir à travailler avec eux.

Nous avons une pensée particulière à l'endroit du **Mr Maouche Mohamed** ; membre de l'Unité de Recherche et Développement (URD) pour son implication dans le présent projet et pour son précieux apport.

La réalisation de ce mémoire de fin de cycle fut une occasion merveilleuse de rencontrer et d'échanger des idées avec de nombreuses personnes de l'ONEX. Nous ne saurons pas les citer toutes. Nous reconnaissons que chacune a, à des degrés divers, mais avec une égale bienveillance, apporté une contribution positive à ce travail. Nos dettes de reconnaissances sont, à ce point de vue, énormes à leur égard.

Nous tenons à rendre hommage à la défunte **Mlle Bensayah Ghania** chef de service Intervention et Sécurité pour sa présence et tous ses précieux conseils.

Merci à tout le personnel du département MRIE de l'école nationale polytechnique et à leur tête le chef de département le **Pr Benkoussas Bouzid**.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Glossaire

Nomenclature

Résumé

Introduction Générale	18
1 Généralités sur le domaine pyrotechnique	20
1.1 Introduction	21
1.2 Présentation de l'entreprise	21
1.2.1 Présentation du Complexe de production et de vente (cas pratique)	21
1.2.2 Historique et description de l'activité de l'entreprise	21
1.2.3 Situation géographique et climatique	22
1.2.4 Pan de secteur (Environnement de l'entreprise et sites exposés) . .	23
1.3 La chaîne pyrotechnique à usage civile	23
1.3.1 Effets d'une explosion	25
1.3.2 Réglementation Algérienne et Normes internationales :	25
1.3.3 Classe de risque des matières et objets explosibles	27
1.3.4 Explosifs produits et commercialisés par l'ONEX	28
1.4 stockage et transport	30
1.4.1 Transport	30
1.4.2 Stockage	34
1.4.3 Siège potentiel d'explosion ou installation pyrotechnique (PES) . . .	35
1.4.4 Siège exposé (ES)	36

1.5	Retour d'expérience	36
1.5.1	Conséquences	37
1.5.2	Analyse des circonstances et causes des accidents	38
1.6	Problématique :	40
1.7	Conclusion	40
2	Analyse de risque	41
2.1	Introduction	42
2.2	Méthodologie de KINNEY et WIRUTH	42
2.2.1	Objectif	42
2.2.2	Introduction à la méthode de KINNEY et WIRUTH	42
2.2.3	Plan de situation distance entre dépôts et autres installations	43
2.3	Détermination de l'équivalent TNT	45
2.4	Application	47
2.4.1	Détermination du facteur FKp	47
2.4.2	Détermination du facteur FKg	48
2.4.3	Détermination du facteur de fréquence FKe	55
2.4.4	Indice de criticité(C)	56
2.5	Conclusion	58
3	Étude de la résistance des dépôts	59
3.1	Introduction	60
3.2	Propriétés et structure des dépôts	60
3.2.1	Béton armé	60
3.2.2	la Sécurité des structures –Réglementation- (Béton-armé)	63
3.2.3	Cas réel ONEX	66
3.3	Présentation du logiciel	75
3.3.1	ANSYS	75
3.3.2	ANSYS Workbench	75
3.3.3	Dynamique explicite	76
3.3.4	AUTODYN	76
3.4	La simulation de la déformation des dépôts	78
3.4.1	Les étapes de simulation	78
3.4.2	Résultats et discussion	79
3.5	Conclusion	82

4	Modélisation et simulation des effets d'explosion	83
4.1	Introduction	84
4.2	MODELISATION MATHEMATIQUE DE L'EXPLOSION ET IMPACT DE L'EXPLOSION SUR LE MILIEU ENVIRONNANT	84
4.2.1	L'explosion dans l'air	84
4.2.2	Paramètres de l'explosion au moment de détonation - Kingery et Bulmash -	85
4.2.3	Onde de choc dans l'air	88
4.2.4	Impact de l'explosion sur le sol	93
4.3	SIMULATION NUMERIQUE DE LA DETONATION SUPERFICIELLE PAR LA METHODE ANALYTIQUE	97
4.3.1	Caractéristiques de l'explosion au moment de détonation	97
4.3.2	Surpression et température de l'air dans l'onde de choc en fonction de la distance	98
4.3.3	Étude de l'atténuation de l'explosion par les dépôts	99
4.3.4	Vitesse du son dans l'onde de choc	106
4.3.5	Surpression et impulsion de l'onde de choc en fonction du temps	106
4.3.6	Caractérisation des paramètres de l'explosion sur le sol	109
4.3.7	Mouvement sismique du sol	109
4.4	Conclusion	112
	Conclusion générale	113
	Références bibliographiques	114
	ANNEXES	117
	ANNEXE -A- Répartition en groupes de compatibilité et code possibles,de classement des munitions	118
	ANNEXE -B- Arrêté interministériel du 10 aout 1993 portant conditions d'isolement des établissements de production ou de conservation des substances explosives	119
	ANNEXE -C- Conditions et Proposition de type d'empilement.	129

Table des figures

1.1	Image satellite du complexe	23
1.2	Propagation d'onde de détonation	24
1.3	Quelques type de marquages	32
1.4	Exemples des étiquetages	33
1.5	La répartition de nombre d'accident dans chaque secteur	36
1.6	Nombre d'occurrence de la même cause dans la manutention dans les stocks	38
1.7	Nombre d'occurrence de la même cause dans le stockage intermédiaire et temporaire	39
2.1	Dispositif expérimental du test de Trauzl	46
2.2	Évolution du facteur de Kinney FKP en fonction de la fréquence d'occurrence	48
2.3	Évolution du facteur FKg en fonction de nombre de personnes surplace . .	51
2.4	L'évolution de FKe en fonction du E	55
3.1	Une dalle en BA	61
3.2	Comportement de Béton en compression	67
3.3	Comportement de l'Acier en traction	69
3.4	Essai d'arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton[10]	71
3.5	Structure -Forme 1-Igloo à simple baie.	71
3.6	les dimensions de structure à simple baie.	72
3.7	Structure -Forme II-Igloo à double baies.	73
3.8	les dimensions de structure à double baies.	74
3.9	Interface workbench	76
3.10	Explosion de 50 T -Igloo à double baies-.	79
3.11	Explosion de 96 T -Igloo à double baies-.	79
3.12	Explosion de 37 T -Igloo à simple baie-	80
3.13	Explosion de 50 T -Igloo à simple baie-.	80

4.1	Les mécanismes provoquant les dommages et les blessures en fonction du rayon de détonation	85
4.2	Evolution de la surpression dans l'onde de choc avec la distance et le temps.	90
4.3	Evolution de pression avec le temps pour l'onde de choc réfléchie.	92
4.4	Zones de l'explosion souterraine.	93
4.5	Variation de la surpression dans l'onde de choc en fonction de la distance du centre de l'explosion.	98
4.6	Variation de la température de l'air dans l'onde de choc en fonction de la distance du centre l'explosion.	98
4.7	Surpression en fonction de distance -50 000 kg-	101
4.8	Surpression en fonction de distance -96 000 kg-	101
4.9	surpression en fonction de distance -30 000 kg-	101
4.10	Rayon de surpression à l'air libre et et dans le dépôt semi-enterré -30 T-. .	103
4.11	Rayon de surpression à l'air libre et et dans le dépôt semi-enterré -50 T-. .	104
4.12	Rayon de surpression à l'air libre et et dans le dépôt semi-enterré -96 T-. .	105
4.13	Variation de la vitesse du son dans l'air au front de l'onde de choc.	106
a	Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour m=30 T	107
b	Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour m=30 T	107
c	Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour m=50 T	107
d	Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour m=50 T	107
e	Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour m=96 T	107
f	Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour m=96 T	107
4.15	Evolution de la pression l'impulsion spécifique dans l'onde de choc en fonction du temps	107
4.16	Rayon de la zone de démolition en fonction de la masse d'explosif.	109
4.17	Rayon de la zone sismique dangereuse en fonction de la masse de la charge explosive	110
4.18	Déplacement du sol en fonction de la distance du centre de l'explosion. . .	111
4.19	Conditions d'empilement.	129
4.20	Proposition-Structure à double baies.	130
4.21	Proposition-Structure à simple baie.	131

Liste des tableaux

1.1	Réglementation Algérienne et Normes internationales	26
1.2	Répartition en groupes de compatibilité pour stockage en commun	35
2.1	Etat actuel des PES et leurs orientations	44
2.2	équivalent TNT des produits commercialisés par l'ONEX	46
2.3	Grille de Valeur du facteur FK_p	47
2.4	Grille de valeurs du facteur FK_p correspondantes aux fréquences d'occurrences	47
2.5	Grille de valeur du facteur FK_g	49
2.6	zone de danger d'explosion à l'air libre selon la loi algérienne	50
2.7	Grille de valeurs du facteur FK_g correspondantes aux seuils de surpressions et aux zones de dangers selon la loi algérienne	50
2.8	Grille de valeurs du facteur FK_g correspondantes aux nombres de personnes surplace	51
2.9	Grille donnant les distances , les zones et le nombre de personnes présentes pour chaque configuration des dépôts	52
2.10	Etat actuel des PES et leurs orientations	53
2.11	Les résultat de calcul avec l'ITAG pour les dépôts 1.46 -1.55	54
2.12	Les résultats de calcul avec l'ITAG pour les dépôts ND01-ND05 et 1.06-1.05	54
2.13	Grille de valeur du facteur FKE correspondantes aux taux d'exposition	55
2.14	grille de criticité selon Kinney	57
3.1	Caractéristiques de Béton 25 MPa.	68
3.2	Caractéristiques d'Acier BsT 42/50.	70
4.1	Formule polynomiale générale de Kingery et Bulmash	86
4.2	Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les pressions incidentes	86

4.3	Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions incidentes	
	-1-	87
4.4	Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions incidentes	
	-2-	87
4.5	Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les pressions réfléchies .	88
4.6	Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions réfléchies	88
4.7	Coefficient qui caractérise le milieu.	94
4.8	Mouvement du sol en fonction de la puissance du séisme.	96
4.9	Explosion de 30 000 kg.	97
4.10	Explosion de 50 000 kg.	97
4.11	Explosion de 92 000 kg.	97
4.12	La surpression d'une charge nue ou une structure légère [21]	99
4.13	Atténuation de surpression - un igloo couvert par terre -[21]	100
4.14	Atténuation de surpression associée à une explosion dans l'Igloo semi-enterré	100
4.15	la surpression à 43 m associée à une explosion dans Igloo semi-enterré . .	101

Glossaire

Local pyrotechnique : local pouvant contenir des matières et objets explosives.

Enceinte pyrotechnique : la partie d'un établissement, comprenant les dépôts, les ateliers de fabrication, de changement, de conditionnement, d'étude ou d'expérimentation des matières et objets explosibles et leurs magasins de service.

Dépôts de conservation : local, bâtiment, emplacement où le véhicule en stationnement utilisé pour conserver les matières et objets explosibles.

Risque pyrotechnique : risque présent par les matière et objets explosibles lors de leur décomposition fonctionnelle ou accidentelle.

Accident pyrotechnique : toute explosion, combustion ou décomposition de matières ou objets explosibles, ne résultant pas d'un fonctionnement normal de l'installation où elle se produit et susceptible de causer des dommages aux personnes et des dégâts aux biens.

Matière explosible : substance ou mélange de substances solides ou liquides qui est en soi susceptible, par réaction chimique, de dégager des gaz à une température, une pression et une vitesse telles qu'il en résulte des dégâts dans la zone environnante. Les matières pyrotechniques sont incluses dans cette définition même si elles ne dégagent pas de gaz.

Matière pyrotechnique : substance ou un mélange de substances destinées à produire un effet calorifique, lumineux, sonore, gazeux ou fumigène, où une combinaison de ces effets à la suite de réactions chimiques exothermiques auto-entretenues non détonantes.

Objet explosible : objet contenant une ou plusieurs matières explosibles.

Objet pyrotechnique : objet contenant une ou plusieurs matières pyrotechniques.

Matières et objets explosibles instables : on entend ceux qui sont thermiquement instables ou trop sensibles pour les conditions normales de manutention, de manipulation et d'utilisation, et qui nécessitent par conséquent des précautions particulières.

Aire de chargement et déchargement : lieu dédié au transfert des explosifs à partir d'un véhicule pour approvisionner un dépôt ou un magasin ou pour charger un véhicule

en explosifs à partir d'un dépôt ou un magasin.

Catégories de personnes : les individus exposés sont classés en différentes catégories de personnes, telles que :

- Personnes impliquées dans l'activité pyrotechnique (opérateurs pyrotechniciens en contact avec les explosifs) ;
- Personnes non impliquées dans l'activité pyrotechnique (personnel de l'établissement pyrotechnique tel que les administratifs, le concierge, le gardien, etc.) ;
- Grand public ou personnes externes à l'établissement.

Distance minimale de sécurité (Annexe B) : La distance minimale de sécurité est la distance déterministe entre un PES et un ES pour laquelle le risque encouru est jugé acceptable. Les distances de sécurité se mesurent depuis le point le plus proche du PES jusqu'au point le plus proche du site exposé (ES). Elles sont mesurées en ligne droite, sans tenir compte des merlons.

Les effets de souffle, les effets thermiques et les projections ont été pris en compte. Par défaut, pour application des tables de distances, le terme « en ligne droite » signifie « en ligne horizontale ».

Merlon : Une élévation naturelle de terrain ou une élévation artificielle continue destinée à servir d'écran. Il a pour effet d'arrêter les projections (fragments des munitions, des débris de structures, etc.), d'atténuer l'effet de souffle et d'atténuer les flux thermiques et empêcher les risques de transmission d'une détonation à d'autres sièges potentiels d'explosion.

NEQ ou quantité nette d'explosifs : C'est le contenu net total en explosifs d'un même siège potentiel d'explosion excluant les emballages, les enveloppes, etc. Elle est exprimée en kilogramme (kg). Le calcul des distances de sécurité s'effectue à partir de cette quantité nette d'explosifs. Pour le calcul des distances de sécurité vis-à-vis des produits qui sont à l'origine d'une surpression aérienne (surpression de l'onde de souffle), le NEQ est exprimé en quantité équivalente de TNT de la matière explosive (NEQ équivalent TNT).

Chargement mixte : Chargement de colis contenant des objets ou des matières de la classe 1 appartenant à différents groupes de compatibilité de la classe 1 ensemble sur un même véhicule aux fins de leur transport.

Colis : Conditionnement utilisé pour envelopper et maintenir ensemble les marchandises à transporter de façon qu'elles puissent être stockées et transportées.

Emballage en commun : Emballage d'objets ou de matières appartenant à différents

groupes de compatibilité de la classe 1 ensemble dans un même colis aux fins de leur transport.

Équipements d'arrimage : Équipements et matériels utilisés pour assujettir et immobiliser le chargement sur le plateau ou dans les caisses interchangeables d'un camion afin d'empêcher le chargement de tomber du plateau du camion et de glisser.

Marchandises dangereuses : Matières ou objets qui, de par leur nature, leurs caractéristiques ou leur état, peuvent présenter un danger pour la sécurité et l'ordre publics, en particulier pour les personnes du public, les biens publics essentiels, la vie et l'intégrité physique des personnes et des animaux ainsi que l'intégrité d'autres objets.

Nomenclature

c : Vitesse du son.

C_k Coefficient qui dépend de la distance h entre le lieu de détonation et la surface du sol et de la masse de la charge explosive .

ΔP^+ : Pression positive, surpression.

ΔP^- : Pression négative, sous-pression.

D_{UT} : Vitesse de mouvement de l'onde de choc.

I^+ : Impulsion positive de l'onde de choc.

I^- : Impulsion négative de l'onde de choc.

k_r : Coefficient caractéristique du milieu.

L_k : Longueur du bord du cratère .

m_e : Masse de la charge explosive.

q : Masse de la charge explosive .

R : Distance du centre de l'explosion.

R_c : Rayon du cratère .

R_{cr} : Rayon sismique critique.

R_r : Rayon de la zone de démolition .

R_0 : Rayon de la charge explosive.

t^+ : Durée de la phase positive .

t^- : Durée de la phase négative.

V_0 : Volume initial.

ρ : Densité de la charge explosive.

τ : Temps de l'impact de l'onde de choc.

Δl : Valeur du mouvement du sol lors des séismes.

ΔP_r La surpression de l'onde de choc réfléchissante.

Résumé

الملخص

قمنا من خلال العمل بدراسة أمنية معمقة في مجال المتفجرات لبحث سبل رفع طاقات التخزين للمتفجرات ذات الطابع المدني ١.١ لمركب التصنيع التابع للديوان الوطني للمواد المتفجرة.

في السياق الأمني واللوجستي ، وجب علينا أن نأخذ بعين الاعتبار الضوابط التقنية اللازمة لهذا النوع من النشاط وذلك من خلال التقيد الصارم باللوائح القانونية والمعايير العالمية المعمول بها التي تحكم هذا المجال.

لهذا اتبعنا نهج كيني و ويرث المناسب و الأكثر تكيفا مع القانون الجزائري لتخزين المتفجرات والذخيرة التقليدية. بعد ذلك ، بفضل قانون هوبكنسون-كرينز ، قمنا بزيادة الكميات المخزنة مع الأخذ بعين الاعتبار الحد الأدنى من مسافات الأمان بين كل مناطق التخزين. وفي الأخير قمنا بقياس الأضرار الناتجة عن الانفجار وميزات الموجة الصادمة من خلال نمذجة رياضية مكافئة ومحاكاة رقمية بإستعمال ماتلاب و أنسيس

:الكلمات المفتاحية المباني القبانية؛ مكافئ الديناميت، موجة صدمة ؛ النمذجة ؛ المحاكاة ماتلاب و أنسيس.

Abstract

In this work, we conducted an in-depth security study on pyrotechnic repositories to increase the capacity of Class 1.1 explosives in the ONEX production complex.

In a security and logistical context, we must take into account the technical performances necessary for this type of activity and this by rigorously respecting the regulations in force governing this domain.

Then, we increased the stored loads by taking into account the minimum safety distances between each deposit calculated using Hopkinson-Crainz law. Finally, we quantified

the effects generated by an explosion and characterized the resulting shock wave by mathematical modelling and numerical simulations via MATLAB and ANSYS.

Key words : Igloo ; TNT equivalent ; Shock wave ; Modeling ; simulation ; MATLAB and ANSYS .

Résumé

Dans ce travail, nous avons effectué une étude sécuritaire approfondie sur les dépôts pyrotechnique en vue d'augmenter les capacités des stocks d'explosifs classe 1.1 dans le complexe de production de l'ONEX.

Dans un contexte sécuritaire et logistique, nous devons tenir compte des performances techniques nécessaires à ce genre d'activité et cela en respectant rigoureusement la réglementation en vigueur régissant ce domaine.

Pour cela nous avons suivi La démarche de Kinney et Wirth spécialement adapté à au stockage d'explosifs et de munitions conventionnelles. Nous avons ensuite, grâce à la loi de Hopkinson-Crainz, augmenté les charge stockés en tenant compte des distances de sécurités minimale entre chaque dépôt calculées avec cette dernière, nous avons quantifié les effets générés par une explosion et caractérisé l'onde de choc résultante par des modélisations mathématique et des simulations numérique via MATLAB et ANSYS.

Mots-clefs : Igloo ; Équivalent TNT ; Onde de choc ; Modélisation ; simulation MATLAB et ANSYS.

Introduction Générale

La nature des munitions et des matières explosives avec leur potentiel de réaction non prévu et violent exige des analyses de risque approfondies qui soient à même de donner des recommandations et des directives pour la gestion sûre des stocks d'explosifs et de munitions conventionnelles. Cela requiert, par ricochet, une approche basée sur le risque, qui devrait être, à son tour, fondée sur l'ingénierie et la science des matières explosives.

Les décisions de gestion du risque reposent sur des connaissances au même titre que les conséquences. Des connaissances complémentaires peuvent être apportées si la probabilité d'un accident dû à des matières explosives peut être prise en compte. Des formules mathématiques peuvent être utilisées pour aider à la prise de décision et la gestion du risque au cours de la gestion du stockage d'explosifs et de munitions conventionnelles.

Le travail présenté s'inscrit dans deux démarches différentes mais interdépendantes : celle de l'augmentation des stocks d'explosifs et celle de la sécurité de ces derniers. Afin d'y parvenir, ce travail répondra à trois grandes exigences : des exigences sécuritaires, des exigences réglementaires et pour finir des exigences techniques.

Les exigences sécuritaires revêtent une importance toute particulière compte tenu du risque intrinsèque généré par l'activité pyrotechnique. Le choix de la méthode d'analyse de risque est crucial. Dans ce cas de figure, une méthode spécifiquement adaptée aux stockages d'explosifs et de munitions conventionnelles, sera utilisée et de par ses résultats nous jugerons de la criticité des risques générés par ces stocks.

Sur le plan législatif, l'Etat algérien n'a pas été du reste .Plusieurs textes législatifs ont été promulgués afin de réglementer l'activité pyrotechnique, imposant de ce fait un respect rigoureux de toutes les normes exigibles légales en la matière . Ainsi, le stockage d'explosifs et de munitions conventionnelles est réglementé par les deux arrêtés suivants :

- Arrêté interministériel du 10 Août 1993 portant sur les conditions d'isolement des

établissements de production et de conservation des substances explosives.

- Arrêté 275/2007/MDN/A2/S du 18 décembre 2007 portant sur règles de détermination des distances de sécurité.

Quant aux exigences techniques, la caractérisation des effets produits par l'explosion d'un dépôt contenant des explosifs ou des munitions conventionnelles sera modélisée par les équations de Sadvovsky. En outre, le logiciel ANSYS R18.2 sera utilisé pour le calcul de l'onde de surpression ainsi que pour la simulation du phénomène d'explosion.

En ayant répondu aux trois exigences et une fois les nouvelles capacités de stockages affectées pour chaque dépôts seront connues, des recommandations quant à l'aspect logistique seront proposées. Principalement un model type d'empilements des palettes ainsi qu'un model de rangement à l'intérieur des dépôts peuvent être énoncés, et cela dans le but de faciliter la manutention et l'augmentation de la capacité de l'espace de stockage.

Chapitre 1

Généralités sur le domaine pyrotechnique

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous introduirons les bases de l'environnement de l'entreprise (ONEX) dans laquelle nous avons effectué notre stage et nous donnons des définitions exhaustives sur le domaine pyrotechnique de manière générale et sur les explosifs plus spécifiquement ceux de la classe 1.1. Pour des raisons de sécurité nationale nous ne citerons pas le nom du complexe de production et de stockage en question ni le procédé de fabrication.

1.2 Présentation de l'entreprise

1.2.1 Présentation du Complexe de production et de vente (cas pratique)

Issue de la restructuration de la société nationale des industries chimiques ("SNIC") l'office national des substances explosives (ONEX) a été créé par ordonnance N-76 du 20 février 1976 portant création de l'ONEX et rattaché au Ministère de la Défense Nationale.

En 1989, il y a eu transformation de la nature juridique de l'ONEX en E.P.I.C par décret N-89-38 du 28 mars 1989, et son transfert au Ministère de l'industrie et de l'énergie.

En 1991, transformation en EPE.SPA et recapitalisation de 100.000.000 DA, à 800.000.000 DA. En 1995, le complexe étudié est entré en production et en 1982 le complexe a été réceptionné provisoirement. Le siège de l'entreprise se trouve à Bir Mourad Rais au 12 avenue des frères Bouadou à ALGER.

1.2.2 Historique et description de l'activité de l'entreprise

Deux entreprises privées spécialisées dans la fabrication des substances explosives et accessoires, installées respectivement à Ain Defla et Tidjelabin ont été nationalisées en 1974 et rattachées à la société Nationale des industries chimiques (SNIC).

Le développement rapide des entreprises industrielles en Algérie a suscité une demande accrue des besoins en explosifs à caractère civil (mines et carrières). La SNIC entama des négociations avec divers sociétés et en 1975 un marché a été conclu avec la firme FRIZT

WERNER détenteur du savoir faire nécessaire à la réalisation du projet.

Le contrat prévoyait la fourniture, l'assistance et la construction d'un complexe de fabrication d'explosifs à usage civil d'une capacité de production annuelle de 17100 tonnes de différents types d'explosifs et d'accessoires de tir.

Le complexe est de forme rectangulaire d'environ 1300 * 1200 m soit une superficie de 150 Ha dont 46000 m² de surfaces bâties et couvertes. L'ensemble des bâtiments contenus dans le périmètre clôturé sont bien répartis et permettent une extension de l'activité.

1.2.3 Situation géographique et climatique

Le complexe est situé à environ 125 km au sud ouest d'Alger, le complexe se trouve dans une région vallonnée à une altitude moyenne oscillante entre 400 m et 500 m au dessus du niveau de la mer.

Le voisinage immédiat est accidenté et certain pics dont l'altitude varie entre 1000 m et 1500 m sont partiellement enneigés. Le complexe est desservi par l'autoroute est-ouest et par l'intermédiaire de routes secondaires, l'aéroport civil le plus proche est à 95 km.

La température maximale dans la région varie entre 30 C et 34 C en été, pouvant atteindre 35-38 C au mois de Juillet – Aout. En hiver la température peut baisser jusqu'à 5 C entre Janvier – Mars La pluviométrie est en moyenne de 1000 mm par an.

Les vents sont de faibles à modérés, sans aucune prédominance, ils soufflent généralement du Nord Est/Nord Ouest à une vitesse entre 10 et 60 km/h[1].

Le complexe est situé à la limite d'une zone d'activité sismique, cette information a été donnée sans renseignements précis, sachant qu'un tremblement de terre s'est produit en 1980, avec une force de 7.2 sur l'échelle de Richter et dont l'épicentre se trouve à Chlef et qui a été ressenti dans le complexe. Quelques fissures ont été constatés dans des abris de stockage.

1.2.4 Pan de secteur (Environnement de l'entreprise et sites exposés)

Le complexe de production se subdivise en : zone de production Nord ; Zone de production Sud ; champ de tir ; zone de stockage comme illustré sur la figure 1.1 .



FIGURE 1.1: Image satellite du complexe

1.3 La chaîne pyrotechnique à usage civile

Un explosif est défini par un mélange de corps susceptibles lors de leur transformation, de dégager en un temps très court, un grand volume de gaz porté à haute température, ce qui constitue une explosion.

La classification des explosifs est déterminée sur la base du front d'onde de pression créé par l'explosion. La vitesse de ce front d'onde les divise en deux grands groupes d'explosifs :

a-Explosif déflagrant

La déflagration est une combustion explosive se propageant par conductivité thermique en brûlant, une particule de substance explosive chauffe les particules voisines. Une fois la température d'auto-inflammation atteinte, ces particules brûlent à leur tour et chauffent d'autres particules.

Les vitesses de propagation de la déflagration sont subsoniques et la réaction chimique se propage à la vitesse de 10 à 400 m/s. Les vitesses dépendent de nombreux facteurs comme la nature de la substance, le mode d'amorçage, le confinement, les conditions ambiantes, etc.

Les substances explosives solides dont le régime normal de décomposition est la déflagration sont appelées des poudres[3].

b-Explosif détonant

La détonation est une réaction chimique extrêmement rapide, exothermique et auto entretenue. Cette réaction s'accompagne d'un dégagement en un temps très court d'un grand volume de gaz chauds couplés à une onde de choc (discontinuité brusque de pression). C'est cette onde de choc qui assure la propagation de la réaction chimique par effet "points chauds". Les vitesses de propagation sont supersoniques et vont de 4000 m/s à 9000 m/s. Ils varient selon la nature de la substance et les conditions de mise en œuvre.

Une substance explosive dont le régime normal de décomposition est la détonation est appelée : explosif. On dit que l'explosif est brisant lorsque l'effet de l'onde de choc est prépondérant. On parle d'explosif poussant (ou lent), lorsque l'effet de la détente des gaz est prépondérant[3].

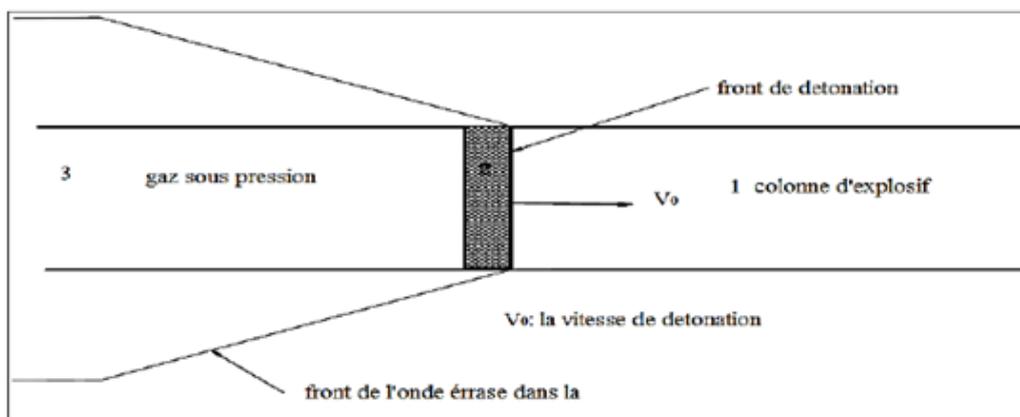


FIGURE 1.2: Propagation d'onde de détonation

1.3.1 Effets d'une explosion

Une certaine quantité de substances explosives vient d'exploser, que se passe-t-il ? Quels sont les effets de l'explosion ou dégâts ? Les effets de l'explosion d'une substance explosive dépendent principalement :

- De la nature du produit
- De la qualité du produit
- Du régime de l'explosion (déflagration, détonation)

Principales nuisances d'une explosion

Effet d'incendie local : la combustion d'une poudre explosiv et son inflammation se traduisent par un violent dégagement de la chaleur accompagné éventuellement d'une déflagration s'il y a confinement.

Effet de destruction locale : Dans le cas de la détonation d'un explosif, l'effet caractéristique est la destruction totale dans un certain rayon avec effondrement au sol au lieu même de l'explosion

Effet de souffle et destruction à distance : Dans le cas d'une détonation d'un explosif, les effets destructeurs se font ressentir à distance par suite de la propagation de l'onde de choc.

L'effet de souffle provoque des dommages sur l'organisme des êtres vivants qui s'y trouvent soumis, et des dégâts aux constructions et matériels qui la subissent.

Effet des éclats : L'une des caractéristiques essentielles d'une détonation est de fragmenter les enveloppes en un grand nombre d'éclats de petites dimensions projetées à une grande vitesse de l'ordre de plusieurs centaines ou milliers de mètres/seconde assimilable à un projectile tiré par une arme et porté à haute température, ce qui explique l'effet incendiaire sur une certaine distance.

1.3.2 Réglementation Algérienne et Normes internationales :

Notre travail se trouve être régis et rigoureusement cadré par une législation assez stricte en matière de stockage d'explosifs et notamment ceux de la classe 1, ainsi que par des normes internationales qui concordent parfaitement avec la législation nationale.

L'abondance des textes et des normes dans ce domaine ne fait que mettre davantage l'accent sur la sensibilité et l'attention dont il fait l'objet .

Les normes et les lois y sont résumées dans le tableau 1.1 :

TABLE 1.1: Réglementation Algérienne et Normes internationales

N-	Loi ou Norme	Intitulé
1	Arrêté interministériel du 10 aout 1993	Condition d'isolement des établissements de production et de conservation des substances explosives
2	Arrêté 275/2007/MDN/A2/S du 18 décembre 2007 (annexe 1)	Classification et règles de stockage, de manutention et de transport des munitions
3	Arrêté 275/2007/MDN/A2/S du 18 décembre 2007 (annexe 2)	Règles de détermination des distances de sécurité
4	Arrêté 275/2007/MDN/A2/S du 18 décembre 2007 (annexe 3)	Conditions et mesures de sécurité pour l'aménagement et l'exploitation des établissements et dépôts de stockage des munitions
5	Décret exécutif n-06-198 du 31 mai 2006	La réglementation applicable aux établissements classés pour la protection de l'environnement
6	Décret exécutif n-07-144 du 19 mai 2007	Fixant la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement
7	NILAM 10.50 du 01/05/2013	Stockage, transport et manipulation des explosifs
8	ISO 80079 :2016	Atmosphères explosives
9	La directive 2012/18/UE du 4 juillet 2012 dite directive Seveso 3	Relative aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses
10	NATO - AASTP-4	Manual on explosives safety risk analysis

1.3.3 Classe de risque des matières et objets explosibles

Les matières (y compris les mélanges et les solutions) et les objets dangereux sont affecté à l'une des neuf classes ci-dessous , selon le risque qu'ils présentent [4].

- Classe 1 : matières et objets explosibles
- Classe 2 : gaz
- Classe 3 : liquides inflammables
- Classe 4 : matières solides inflammables, matières sujettes à inflammation spontanée , matières qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables
- Classe 5 : matières comburantes et peroxydes organiques
- Classe 6 : matières toxiques et matière infectieuses
- Classe 7 : matières radioactives
- Classe 8 : matières corrosives
- Classe 9 : matières et objets dangereux divers, y compris les matières dangereuses pour l'environnement

Les matières et objets explosibles de la classe 1, objet de notre étude et qui ne sont pas classés comme matières ou objets explosibles instables, l'une sont affectés à l'une des six divisions de 1.1 à 1.6 ci-après en fonction du type de risque qu'ils présentent[4] :

1. **Division 1.1** : Matières et objets présentant un risque d'explosion en masse (par explosion en masse, on entend l'explosion pratiquement instantanée de la quasi-totalité de la quantité présente) ;
2. **Division 1.2** : Matières et objets présentant un risque de projection sans danger d'explosion en masse ;
3. **Division 1.3** : Matières et objets présentant un risque d'incendie avec un danger mineur d'effet de souffle ou de projection ou des deux sans danger d'explosion en masse, à savoir :
 - i) Matières et objets dont la combustion produit un rayonnement thermique intense ;
 - ii) Objets qui brûlent les uns après les autres avec des effets mineurs de souffle ou de projection ou des deux ;
4. **Division 1.4** : Matières et objets ne présentant pas de risque notable d'explosion : matières et objets qui ne présentent qu'un danger mineur en cas d'allumage ou d'amorçage. L'effet demeure en grande partie contenu dans l'emballage et ne cause pas normalement de projections de fragments de taille notable ou à une distance

appréciable. Une exposition à un feu extérieur ne doit pas causer l'explosion pratiquement instantanée de la quasi-totalité du contenu d'un colis ;

5. **Division 1.5** : Matières très peu sensibles présentant un risque d'explosion en masse : matières qui présentent un danger d'explosion en masse mais qui sont si peu sensibles que la probabilité d'amorçage ou de passage de la combustion à la détonation est très faible dans les conditions normales ;
6. **Division 1.6** : Objets très peu sensibles ne présentant pas de risque d'explosion en masse : objets qui contiennent des matières détonantes extrêmement peu sensibles et pour lesquelles la probabilité d'amorçage ou de propagation accidentels est négligeable[4].

1.3.4 Explosifs produits et commercialisés par l'ONEX

Matières premières :

1-Azoture de Plomb : $Pb(N_3)_2$, explosif primaire pour détonateurs, cristaux ou aiguilles incolores , agent détonateur très sensible qui est produit par la réaction d'Acide de Sodium sur des sels de plomb.

- **Risques** : explosion, très sensibles aux chocs et à la chaleur, détonne à 350 C.

2-Styphnate de plomb : $C_6H(NO_2)_3O_2Pb$, agent initiateur pour explosifs obtenu en ajoutant une solution de styphnate de magnésium à une solution de sels plombagines.

- **Risques** : risque d'explosion élevé, incendie .

3-Poudre noire : C'est un explosif déflagrant fabriqué en mélangeant du nitrate de potassium, du charbon de bois et du soufre.

- **Risques** : incendie, explosion (sensible à la chaleur).

4-TNT (TriNitroToluene) : $CH_3C_6H_2(NO_2)_3$, sous forme de paillette ou d'aiguille, soluble dans l'alcool et l'éther, produit par nitration du toluène avec un mélange d'acide.

- **Risques** : explosion, incendie .

5-D.N.T (dinitrotoluène) : $C_6H_6(NO_2)_2$, obtenu par une double nitration du toluène.

- **Risques** : explosion, incendie .

6-Penthrite : Tétranitrate de pentaérythritol $C_5H_8N_4O_{12}$, explosifs constitué par un ester nitrique cristallisé très puissant et très sensible.

- **Risques** : explosion, incendie .

7-Poudre d'aluminium : Poudre fine atomisée .

- **Risques** : explosion, incendie .

8-Nitrate d'ammonium : Engrais capable de bruler et d'exploser dans certaines circonstances.

- **Risques** : explosion, incendie .

produits finis

1-Marmanite : Explosif pulvérulent, ces nitrates fiouls sont utilisés principalement pour l'abattage des roches en carrières, mines et chantier de travaux publics, composé essentiellement de Nitrate d'Ammonium et de TNT (trinitrotoluène).

- **Risque** : par le choc, la friction, le feu ou d'autre source d'ignition.

2-Gélanit : Explosif gélatineux, utilisé pour l'abattage des roches en carrières, mines et chantier de travaux publics, composé essentiellement de Nitrate d'Ammonium, nitroglycérine, Dinitrate d'éthylène glycol et de Nitrocellulose.

- **Risques** : explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autre source d'ignition .

3-Anfomil : Explosif pulvérulent, ces nitrates fiouls sont utilisés principalement pour l'abattage des roches en carrières, mines et chantier de travaux publics, composé essentiellement de Nitrate d'Ammonium et de Fioul.

- **Risques** : explosion, la friction, le feu ou d'autre source d'ignition ; émission de gaz nocifs (NOx / CO).

4-Mèche lente : Produit utilisé pour la mise à feu du détonateur pyrotechnique et allumage de la poudre noir, constitué essentiellement de Nitrate de Potassium et de Soufre.

- **Risques** : explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition .

5-Cordeau détonant :Cordeau détonant est un tube en plastique mince et souple rempli de tétranitrate de pentaérythritol (PETN). Avec une vitesse d'explosion du PETN d'environ 8,4 kilomètres par seconde.

- **Risques** : explosion par le feu ou d'autres sources d'ignition .

6-Détonateur :Explosifs d'amorçage, le rôle consiste à produire, au départ d'un courant électrique ou d'une flamme, une onde de choc suffisamment puissante pour provoquer à coup sûr la détonation de la charge explosive.

- **Risques** :explosion par le feu ou courant vagabond ou d'autre source d'ignition .

1.4 stockage et transport

1.4.1 Transport

Cette partie du mémoire contient des recommandations générales et des conseils pratiques sur le transport des explosifs à l'extérieur des installations de stockage ou d'autres établissements (« hors-site ») par route.

En raison de leurs potentiel de risque, les explosifs ne devraient pas être transportés en même temps que des marchandises dangereuses appartenant à d'autres classes (par exemple des matières inflammables ou radioactives, etc.).

Du fait des caractéristiques souvent très différentes des types explosifs, il conviendrait aussi d'éviter certaines combinaisons de munitions ou d'explosifs dans une même expédition pour des raisons de sécurité chaque fois que les circonstances le permettent[2].

Transport externe d'explosif :

Le transport de munitions dans la circulation publique. Il englobe, par exemple, les mouvements de munitions

- Du fournisseur (fabricant ou marchand) à un destinataire final (forces armées ou de sécurité) ;
- D'un dépôt du gouvernement ou du fournisseur à un dépôt militaire ;
- D'un dépôt militaire à un autre dépôt militaire(notamment aux stocks de réserve et aux stocks des troupes de réserve) ;
- D'un dépôt militaire à une ou plusieurs unités/formations ;
- D'un dépôt militaire à une installation de destruction ;

- D'un dépôt militaire à un marchand ou un acheteur (par exemple pour l'élimination des excédents).

Équipage du véhicule

Chaque fois que la situation le permet, l'équipage des véhicules transportant des explosifs devrait se composer d'un conducteur et d'un aide-conducteur. Ceux-ci devraient tous deux posséder les permis de conduire nécessaires pour le véhicule de transport d'explosifs. Avant un transport des explosifs, les conducteurs devraient recevoir des instructions sur les règles applicables à ce transport particulier.

Toute diminution des facultés physiques ou mentales dues, par exemple, à la consommation d'alcool, à la prise de comprimés, à une indisposition, à la fatigue ou à une cause analogue qui peut influencer sur l'aptitude du conducteur à conduire le véhicule, doit être signalée immédiatement au chef de transport[2].

Équipements de sécurité pour le transport des explosifs par des véhicules routiers

Les véhicules destinés au transport d'explosifs par route devraient emporter des équipements conçus spécialement pour le transport, comme cités ci-dessous, de façon que l'équipage du véhicule et/ou le personnel de l'escorte du transport puisse réagir immédiatement et de manière appropriée à un dysfonctionnement technique, à un accident de la circulation ou à un accident impliquant les explosifs :

1. Moteur diesel ;
2. Interrupteurs d'isolation de la batterie et du combustible ;
3. Échappement monté à l'avant avec pare-étincelles ;
4. Deux extincteurs d'incendie ;
5. Des réceptacles verrouillables en acier ou en aluminium doublés de bois montés sur plateau de véhicule.
6. Les panneaux d'avertissement d'explosifs et les feux clignotants rotatifs.

Les équipements à emporter à cette fin lors d'un transport d'explosifs par route devraient être expressément agréés pour leur utilisation prévue par un organisme compétent et qualifié.

Cet agrément devrait se fonder sur un examen spécialisé des différents équipements du point de vue de leur nécessité et de leur aptitude à être utilisés aux fins du transport

de munitions. Les équipements devraient être emportés dans le véhicule de transport ; ils devraient toujours être opérationnels et à portée de la main[2].

Marquage des véhicules transportant des munitions par route

Les véhicules transportant des munitions ou explosifs devraient être clairement identifiables en tant que tels de l'extérieur afin qu'en cas d'incident ou d'accident, les personnes présentes sur les lieux par hasard ou le personnel d'intervention d'urgence (c'est-à-dire la police, les pompiers et le personnel chargé de la neutralisation des explosifs et munitions) soient en mesure d'évaluer correctement la situation sans retard et de prendre les mesures qui s'imposent.



FIGURE 1.3: Quelques type de marquages

L'illustration de droite montre des exemples de marquages des véhicules transportant des explosifs par route au moyen de symboles de mise en garde signalant la présence de marchandises dangereuses ainsi que d'étiquettes de risque indiquant expressément que le véhicule transporte des objets ou des matières de la classe 1.

Ces symboles de mise en garde et étiquettes de risque devraient être constitués d'un matériau antidéflagrant.

Afin d'éviter que le personnel d'intervention d'urgence ne prenne des mesures inopportunes, il faudrait enlever ces marquages ou les recouvrir complètement lorsque le véhicule n'est pas chargé de munitions[2].

Fiches d'information en cas d'accident et fiches de sécurité supplémentaires

Les fiches d'information en cas d'accident sont des instructions écrites destinées à l'équipage du véhicule et au personnel d'escorte sur la conduite appropriée à tenir en cas d'accident. Les mesures à prendre peuvent différer suivant le type d'explosifs transportées ; il conviendrait donc de publier différentes fiches d'information en cas d'accident pour les

différentes divisions de risque des explosifs.

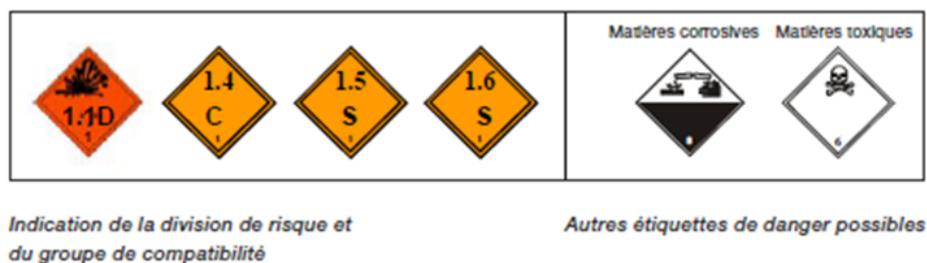


FIGURE 1.4: Exemples des étiquetages

Si les explosifs transportés contiennent une ou plusieurs « autres substances dangereuses » en plus de l'explosif proprement dit, il faudrait publier des fiches de sécurité supplémentaires distinctes pour ces autres substances dangereuses. Il faudrait emporter les fiches d'information en cas d'accident et les fiches de sécurité supplémentaires afin de les avoir à portée de la main dans la cabine du véhicule de transport des explosifs. Afin d'éviter que le personnel d'intervention d'urgence ne prenne des mesures inopportunes en cas d'incident ou d'accident, il conviendrait de n'emporter dans le véhicule que les fiches d'information en cas d'accident et les fiches de sécurité supplémentaires qui sont applicables au transport d'explosif considéré.

Exécution du transport par route

Dans le cadre de leurs responsabilités et quelle que soit la quantité de munitions ou explosifs qui va être transportée, les personnes intervenant dans l'opération de transport doivent prendre les précautions qui, suivant la nature et l'ampleur des dangers prévisibles, sont nécessaires pour prévenir des dommages et, en cas d'accident, pour faire de telle sorte que les dommages soient plus limités que possible.

Les véhicules de transport devraient être conduits très prudemment et de manière préventive dans la circulation. En particulier, le mode et la vitesse de conduite devraient être conformes au code de la route local et adaptés à l'état de la route et aux conditions météorologiques.

Il faudrait observer les temps de conduite et de repos requis. Il faudrait en outre envisager d'ordonner des limites de vitesse particulières et/ou des intervalles minimums à respecter entre les véhicules lorsqu'ils circulent en convoi.

Les explosifs devraient être transportés sans arrêts superflus. Lors d'un arrêt programmé, il faudrait respecter les distances minimales suivantes :

- 300 m de zones bâties habitées ou de foules .
- 50 m entre les véhicules chargés de marchandises dangereuses.

Les véhicules chargés ne doivent pas être garés et laissés sans surveillance et il faut contourner les zones bâties lorsqu'il existe une rocade. Durant le voyage, personne ne devrait se trouver sur le plateau de chargement.

Si un véhicule en panne qui est chargé de munitions ne peut pas être réparé sur place, il faut, si possible, le remorquer jusqu'au site le plus proche où le chargement pourra être transbordé sans obstruer la circulation. Ce site devrait se trouver à 300 m au moins de zones bâties habitées ou de foules. Si un remorquage n'est pas possible, les munitions doivent être transbordées sur place[2].

1.4.2 Stockage

Les munitions et les explosifs sont répartis en groupes de compatibilité : A à H, J, K, L, et S. Pour identifier les types de matières et objets explosibles considérés comme compatibles (stockage en commun possible), on les classe dans l'un des douze groupes de compatibilité résumés dans l'annexe 1 avec répartition des divisions de risques respectives a chacune .

Remarque : Parmi les groupes sus cités, les catégories produites et stockées et commercialisées par l'ONEX font parties des groupes A , B , C et D .

Il convient de noter qu'en raison des risques différents associés au stockage et au transport de matières et objets explosibles Classe 1 Le tableau ci-après est basé sur les règles de combinaison pour le stockage et de ce fait les articles de différents groupes de compatibilité peuvent être stockés en commun de la manière suivante[4] :

TABLE 1.2: Répartition en groupes de compatibilité pour stockage en commun

Compatibilité de group	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	S
A	X											
B		X		X ^{1]}	X ^{1]}	X ^{1]}						X
C			X ^{5]}	X ^{5]}	X	^{2]}	^{4]}					X
D		X ^{1]}	X ^{5]}	X ^{5]}	X	^{2]}	^{4]}					X
E		X ^{1]}	X	X	X	^{2]}	^{4]}					X
F		X ^{1]}	^{2]}	^{2]}	^{2]}	X	^{4]}					X
G			^{4]}	^{4]}	^{4]}	^{4]}	X					X
H								X				X
J									X			X
K										X		
L											^{3]}	
S		X	X	X	X	X	X	X	X			X

X = Stockage en commun permis

1. Les fusées de groupe de compatibilité B peuvent être stockées avec les articles sur lesquels elles doivent être montées, mais la NEQ doit impérativement être cumulée et traitée comme faisant partie du groupe de compatibilité F.
2. Le stockage dans un même bâtiment est autorisé s'il existe un dispositif de séparation efficace permettant d'éviter toute propagation.
3. Les articles du groupe de compatibilité L doivent toujours impérativement être stockés séparément de tout autre article, qu'il s'agisse d'un article d'un autre groupe de compatibilité ou d'un article de type différent du groupe de compatibilité L.
4. La combinaison d'articles du groupe de compatibilité G avec des articles d'autres groupes de compatibilité est laissée à l'appréciation de l'autorité nationale compétente.
5. Les combinaisons sont autorisées sous réserve que les matières satisfassent aux conditions des épreuves ONU de la série 3. Le stockage des matières des groupes de compatibilité C, D ou G ne vérifiant pas les conditions des épreuves ONU de la série 3 doit faire l'objet d'attention particulière de la part de l'autorité nationale compétente.

NEQ = Contenu total en explosifs

1.4.3 Siège potentiel d'explosion ou installation pyrotechnique (PES)

Tout emplacement où les produits explosifs sont présents (exemples : dépôt ou magasin, ateliers pyrotechniques où les produits explosifs sont préparés, analysés, recon-

ditionnés, transformés, assemblés, etc., aire de chargement et de déchargement, aire de stationnement, lieu de destruction sur site des explosifs inutilisables, etc.)[4].

1.4.4 Siège exposé (ES)

Tout emplacement, au sein ou à l'extérieur de l'établissement, occupé ou pas par des personnes, susceptible d'être exposé aux effets d'une explosion se produisant dans un PES. Un dépôt, un atelier pyrotechnique, un bâtiment occupé (par exemple : cantine) et un emplacement de travail non pyrotechnique (par exemple : bureaux administratifs) situés sur le site pyrotechnique, une voie publique de circulation, une habitation sont des exemples de sièges exposés. tous ces types sont résumés en annexe 2 [4].

1.5 Retour d'expérience

Cette synthèse est établie à partir d'un échantillon de 152 accidents relatifs aux activités de stockages de produits explosifs (incluant les munitions) recensés dans la base ARIA. Elle se concentre sur les activités de Stockages pyrotechniques (dont stockages intermédiaires et temporaires) et la Manutention dans le stockage de ces derniers.

Parmi les 152 accidents, 119 concernent les stockages intermédiaires et temporaires et 33 accidents concerne la Manutention dans le stockage. Et ils sont répartis comme suit :

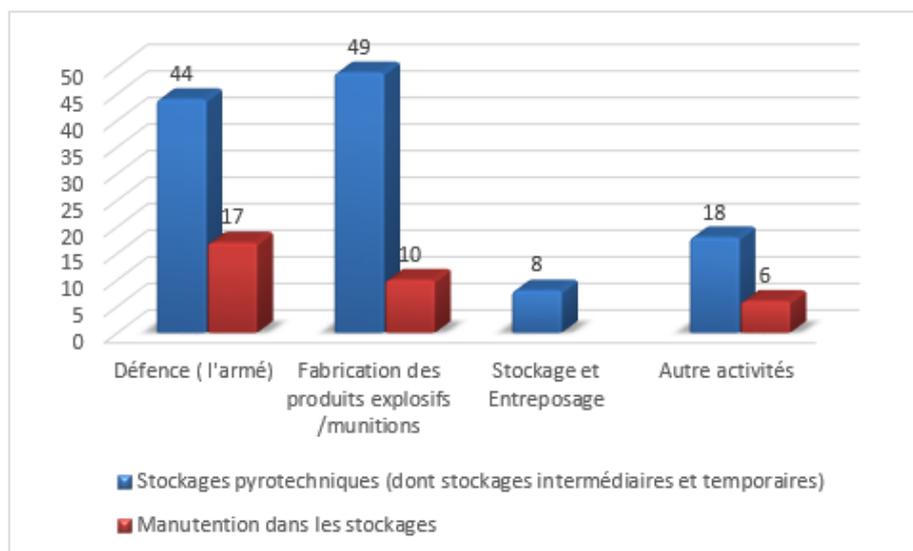


FIGURE 1.5: La répartition de nombre d'accident dans chaque secteur

Sur les 152 accidents, 62 cas liés au stockage et manutention des munitions et missiles, 28 cas correspondent à l'entreposage et le stockage des feux d'artifice ou artifice de divertissement, 9 cas aux cordons détonants et le reste compositions pyrotechniques (poudre noire, poudre propulsive et poudre à canon et produits chimiques de base).

1.5.1 Conséquences

Les accidents dans les stockages regroupent 15.9 % d'incendies (incluant les prises en feu) pour 40.9 % d'explosions, 22.72 % de chutes ou projections d'équipement et 8.33 % sans événement pyrotechnique

Près de 12.12 % des accidents sont maîtrisés au moins de 7 heures après l'accident .

La direction a limité les dégâts le plutôt possible grâce aux POI et aux efforts des différents groupes d'intervention, les conséquences matérielles des accidents sont généralement limitées au site de par leur implantation (éloignement d'autres bâtiments et par rapport aux tiers).

Les 8.33 % des accidents qui sont sans conséquence (pas d'événement pyrotechnique) sont tous des accidents liés au manutention dans les stockages, et qui correspond est peu ou prou aux incidents de levage et maladresse des opérateurs.

Economique

Les effets de souffle et les effets thermiques sont parfois importants et sortent des limites du site : maisons de tiers détruites (ARIA 35873), propagation des feux (ARIA 41744), effondrement (ARIA 41881)...etc

Les dégâts matériels se chiffrent dans certains cas en millions d'euros (ARIA 3098 - 14/02/1991 - PAYS-BAS – CULEMBORG plus de 25 M , ARIA 4922 - 16/10/1991 - ALLEMAGNE – GÖLLHEIM 2.77 M , ARIA 18408 - 01/08/2000 - JAPON – TAKETOYO plus de 35 M , et ARIA 28480 - 03/11/2004 - DANEMARK – KOLDING plus de 100 M) l'estimation globale de l'argent dépensé s'élève au 177.645 M varié entre compensation des dégâts pour les habitants , l'état , matériel et installations

Humaines

Plus de 1172 victimes, résultat des drames et sinistres étudiés dans le domaine pyrotechnique (ARIA 32959 - 18/04/2007 - 57 - SAINT-JURE ; ARIA 2891 - 29/10/1991 - RUSSIE – VOZDVJENKI ; ARIA 7173 - 16/07/1995 - BRESIL – BOQUEIRO ; et reste

le plus désastreux (ARIA 41903 - 04/03/2012 - CONGO-BRAZZAVILLE).

Les conséquences humaines sont recensées dans plus de 80 % des cas, et elles ciblent systématiquement les équipes d'intervention, les habitants et les employés. Ces derniers sont directement exposés aux risques et payent un lourd tribut, en cas d'évènement important. Des blessures sont à déplorer dans 90 % des accidents analysés (plus de 5452 blessés).

La phase de préparation de la matière ou de l'objet en vue de sa destruction est souvent la plus sensible, les opérateurs étant à proximité voire à leur contact direct. Ainsi, 18 des cas sur 152 ont eu lieu pendant des étapes de préparation de destruction.

1.5.2 Analyse des circonstances et causes des accidents

Comme pour beaucoup de phases nécessitant l'intervention du personnel, le facteur organisationnel ou humain est fréquemment identifié en tant que cause directe ou indirecte des accidents répertoriés (70 % des causes), seul ou associé à une défaillance matérielle/mécanique (choc, frottement, électricité statique : ARIA 7079, 35708...).

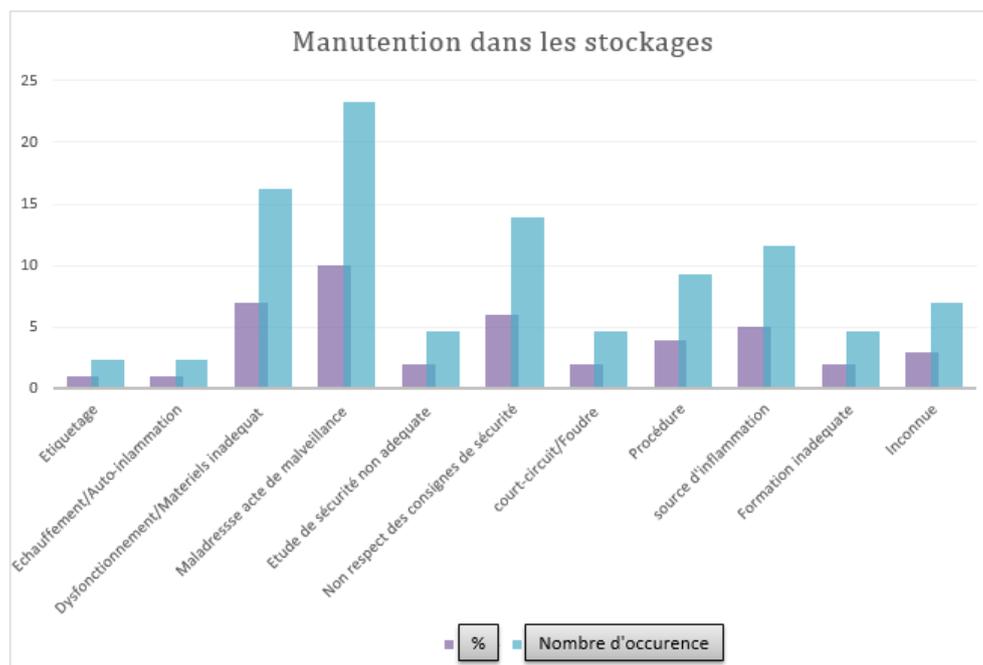


FIGURE 1.6: Nombre d'occurrence de la même cause dans la manutention dans les stocks

Des interventions inappropriées sont notamment mis en cause dans les accidents survenant pendant les phases de préparation et d'élimination des déchets issus des opérations

de destruction.

- Mauvaises manipulations (choc, chute) conduisant à mettre à nu l'explosif pendant le démontage précédent la destruction (ARIA 36417) ou conduisant au fonctionnement intempestif des objets pyrotechniques (ARIA 28352, 8886).
- Maladresse ou acte de malveillance (involontaires) pendant des opérations de transfert/regroupement ou destruction (ARIA 36881, 7079, 22506).

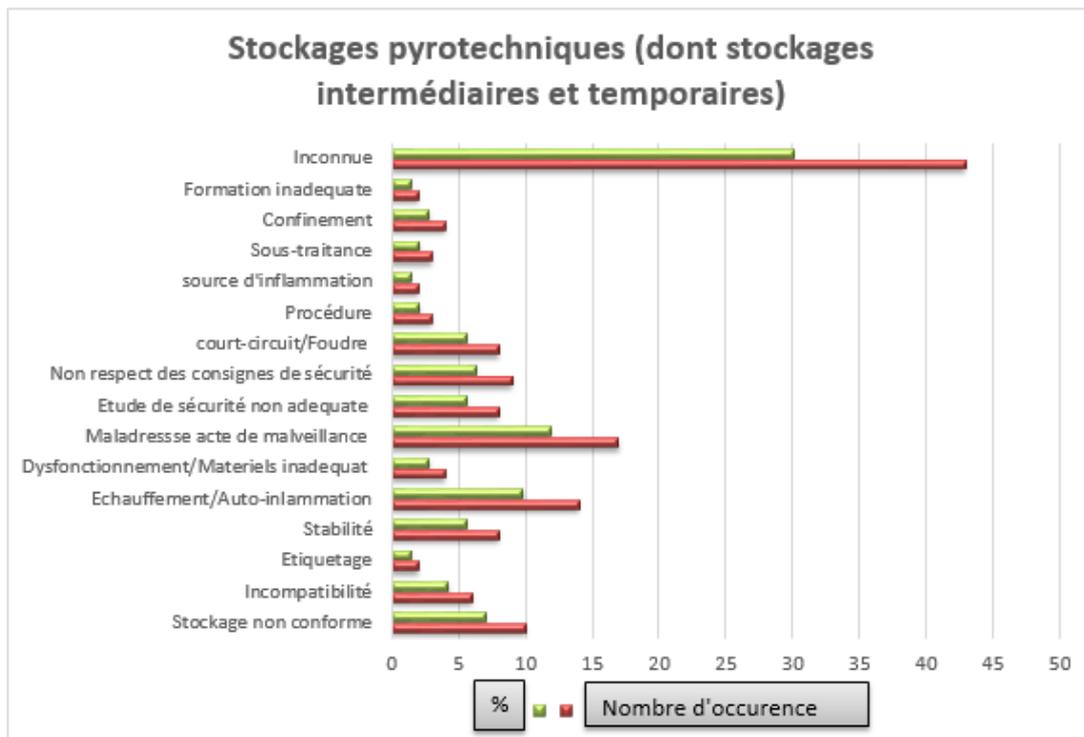


FIGURE 1.7: Nombre d'occurrence de la même cause dans le stockage intermédiaire et temporaire

- Transgressions de consignes (volontaires) pendant le remplissage/chargement des équipements de destruction (ARIA 8886 : dépassement des quantités autorisées lors du remplissage des fourneaux de destruction, 36387 : dépassement des quantités de cartouches autorisées introduites dans les marmite de grillage, 35898 : dépassement des quantités autorisées en brûlage, 30732 : espacement entre tas insuffisant par rapport aux consignes).
- Il s'agit notamment de contrôles insuffisants (ARIA 36528, 35906) brûlage de caisses échauffement et auto-inflammation .
- Problème d'étiquetage, confinement, stabilité, incompatibilité et non-conformité des entrepôts.

- Etude de sécurité non adéquate.
- Dans 36 % des cas les causes ne sont pas encore rendues publiques.

1.6 Problématique :

Les stocks représentent un enjeu important qui impacte de façon directe et indirecte les ratios clés de performance d'une entreprise industrielle. Celle qui est l'objet de notre étude n'en fait pas exception.

L'enjeu de ce travail est d'optimiser les capacités de stockage des dépôts de matières explosives de la classe 1.1 tout en gardant le rayon minimum de sécurité requis entre le dépôt et les infrastructures environnantes et ce conformément aux textes législatifs en vigueur et cela en se basant sur des modèles mathématiques, puis les adaptant en modèle 3D usant de différents logiciels de simulation pour illustrer les effets et l'efficacité des barrières de protections qui seront mise en place ultérieurement.

1.7 Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons essayé de donner une vue d'ensemble sur l'environnement des matières explosives et de leurs stockage, et nous avons su mettre en avant le problème au quel fait face l'entreprise au niveau de la capacité de leurs stock.

Chapitre 2

Analyse de risque

2.1 Introduction

Dans ce présent chapitre nous allons étudier les conséquences des effets de surpressions engendrés par l'explosion des dépôts de stockage d'explosifs de classe 1.1, pour cela la METHODE DE KINNEY et Wiruth – METHODE D'EVALUATION DU RISQUE - EFFETS DE SURPRESSION est plus qu'idoine pour notre étude. Nous noterons aussi que nous nous concentrerons exclusivement sur les effets de surpressions.

2.2 Méthodologie de KINNEY et WIRUTH

2.2.1 Objectif

Cette méthode a pour objectif d'évaluer les risques auxquels sont soumis les N personnes à leur poste de travail (poste cible ou récepteur) situé dans le PES (Siege Potentiel d'Explosion) étudié. Ils sont soumis aux risques engendrés par leur propre activité pyrotechnique et aux risques des activités pyrotechniques voisines exécutées dans le même PES.

2.2.2 Introduction à la méthode de KINNEY et WIRUTH

La méthode de Kinney est une approche probabiliste qui propose une méthodologie pour évaluer les risques auxquels est soumis un travailleur lorsqu'il exécute son travail. Elle conduit à affecter au risque étudié une valeur chiffrée dénommée indice de criticité du risque (C). L'indice de criticité du risque (C) est le produit de trois facteurs de risque qui sont : FK_P , FK_G et FK_E [2].

$$C = FK_P * FK_G * FK_E \quad (2.1)$$

FK_P :facteur chiffré associé à la fréquence² d'occurrence d'un évènement redouté (P) ;.

FK_G :facteur chiffré associé à la gravité ou à la conséquence des effets de cet évènement(G).

FK_E : facteur chiffré associé à la fréquence d'exposition à l'évènement redouté (E) ;

Kinney propose des échelles de cotation pour chacun des facteurs FKP, FKE, FKG et pour l'indice de criticité de risque C obtenu.

Selon la valeur de l'indice de criticité du risque obtenue, le risque est qualifié de faible, important, élevée, etc. et des consignes pour traiter le risque évalué sont proposés.

La validité du risque évalué est donc en fonction de la fiabilité de l'estimation des facteurs FKP, FKG et FKE.

2.2.3 Plan de situation distance entre dépôts et autres installations

Au niveau de l'entreprise objet de notre étude nous avons trouvé des dépôts de stockage de 50000 kg et 30000 kg dans le tableau ci-dessous peuvent être observés les distances entre chaque dépôts adjacent et aussi les distance entre les dépôts et les premières installations de l'entreprise ainsi que de l'agglomération la plus proche, ainsi que les différentes configuration (orientation) de ces derniers conformément à l'Arrêté interministériel du 10 aout 1993 relatif aux Condition d'isolement des établissements de production et de conservation des substances explosives.

TABLE 2.1: Etat actuel des PES et leurs orientations

CONFIDENTIEL

2.3 Détermination de l'équivalent TNT

Le présent mode opératoire décrit une méthode permettant de déterminer les équivalents TNT d'un explosif, à partir des effets de puissance ou brisance (essai de TRAUZL ou coefficient d'utilisation pratique C.U.P) engendrée par sa détonation.

Ce mode opératoire a pour but principal de déterminer les équivalents TNT utilisés pour le calcul des zones d'effets dans le cadre des études de sécurité pyrotechnique et a été utilisé vu de la non disponibilité des équivalents TNT des produits finis fabriqués à l'ONEX .

Équivalent TNT :

Rapport entre la masse de TNT qui génère les mêmes effets et la masse d'explosif testée

$$Eq_{TNT} = \frac{M_{TNT}}{M_{Explosif\ testé}} \quad (2.2)$$

Test de Trauzl

Le test de Trauzl ou test du bloc de plomb de Trauzl est un test de comparaison empirique pour évaluer la puissance ou brisance de matières explosives. Il consiste à mesurer l'expansion d'un bloc de plomb à la suite de l'explosion d'un échantillon de 10 g à l'intérieur de celui-ci.

L'indicateur a été développé en 1885 par Isidor Trauzl (1840-1929,Arad, Roumanie).Le bloc de plomb, de 200 mm de diamètre et 200 mm de hauteur, dispose d'un alésage de 125 mm de profondeur et 25 mm de diamètre dans lequel on place 10 g de l'explosif à tester, la cavité étant bouchée par du sable. L'échantillon est mis à feu électriquement. Après la détonation, l'augmentation du volume de la cavité est mesurée avec de l'eau. Le résultat, donné en cm^3 , est appelé le « **Nombre de Trauzl** » de l'explosif.

Remarque : Le test Trauzl n'est pas adapté pour certains explosifs modernes de grande puissance car ils provoquent des fissures ou des ruptures dans le bloc de plomb.



FIGURE 2.1: Dispositif expérimental du test de Trauzl

Le tableau 2.2 ci-dessous résume parfaitement l'équivalent TNT des produits commercialisés par l'entreprise. Après le calcul des capacités de stockage en équivalent TNT relative à chaque dépôt nous pouvons interpoler vers leurs équivalents en produits fini tel que la Marmanit, Gélanit, etc

TABLE 2.2: équivalent TNT des produits commercialisés par l'ONEX

Gamme d'explosifs		Densité	Vitesse de détonation (m/s)	Essai au bloc de plomb (TRAUZL) 10g/cm ³	Coefficient d'utilisation pratique (C.U.P) par rapport Acide picrique	Equivalent TNT à base de TRAUZL
GELANIT	I	1.40	6300	400	1.33	1.33
	II	1.45	6000	360	1.27	1.20
MARMANIT	I	0.95	4000	405	1.28	1.35
	II	0.98	4100	370	1.27	1.23
	III	0.95	3800	360	1.18	1.20
TNT		/		300	/	1
ANFOMIL			4500		1.15	0.8

2.4 Application

2.4.1 Détermination du facteur FKp

Kinney propose une échelle de cotation du facteur FK_p (facteur chiffré associé à la fréquence d'occurrence d'un évènement redouté (P)) allant de 0,1 à 10 lorsque l'on passe d'un événement virtuellement impossible à un événement fort probable ou pouvant être attendu (Tab 2.3) [2]..

TABLE 2.3: Grille de Valeur du facteur FKp

Fréquence d'occurrence qualitative (P)	Facteur chiffré associé (FK_p)
Fort Possible/pouvant être attendu	10
Possible/Peut se produire	6
Inhabituel mais possible	3
Peu probable/possible mais seulement à la limite	1
Concevable mais très improbable	0,5
Pratiquement impossible	0,2
Virtuellement impossible	0,1

La correspondance entre les fréquences d'occurrence quantitative seuil (P) et les facteurs FKp seuil de Kinney est représentée dans le tableau 2.4 ci-dessous :

TABLE 2.4: Grille de valeurs du facteur FKp correspondantes aux fréquences d'occurrences

Fréquence qualitative selon l'échelle de Kenny	Virtuellement impossible	Pratiquement impossible	Concevable mais très invraisemblable	Peu probable	Inhabituel mais possible	Possible	Fort probable
Facteur seuil Chiffré selon l'échelle de Kenny (FKP)	0.1	0.2	0.5	1	3	6	10
Fréquence quantitative seuil associée (P) (par opération et par an)	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.5

En application de l'Arrêté interministériel du 10 aout 1993 relatif aux Conditions d'isolement des établissements de production et de conservation des substances explosives, l'article 9 énumère les degrés de probabilité d'accident pyrotechnique P1,P2,P3,P4

et P5, concernant l'activité de stockage d'explosifs emballés et admis au transport, la probabilité d'occurrence est cotée a P1 qui est de $1/100000 = 10^{-5}$ [4]. .

En superposant la valeur de $P1 = 1/100\ 000$ nous trouvons la valeur de FK_p selon la méthode KINNEY est de :

$$FK_p = 0.2$$

Une évolution continue du facteur de Kinney FK_p en fonction de la fréquence d'occurrence de l'évènement redoutée par opération et par an peut être modélisée, et de ce fait appliquée pour toute probabilité , par l'équation suivante [2]. :

$$FK_p = 13.754 * p^{0.3648} \quad (2.3)$$

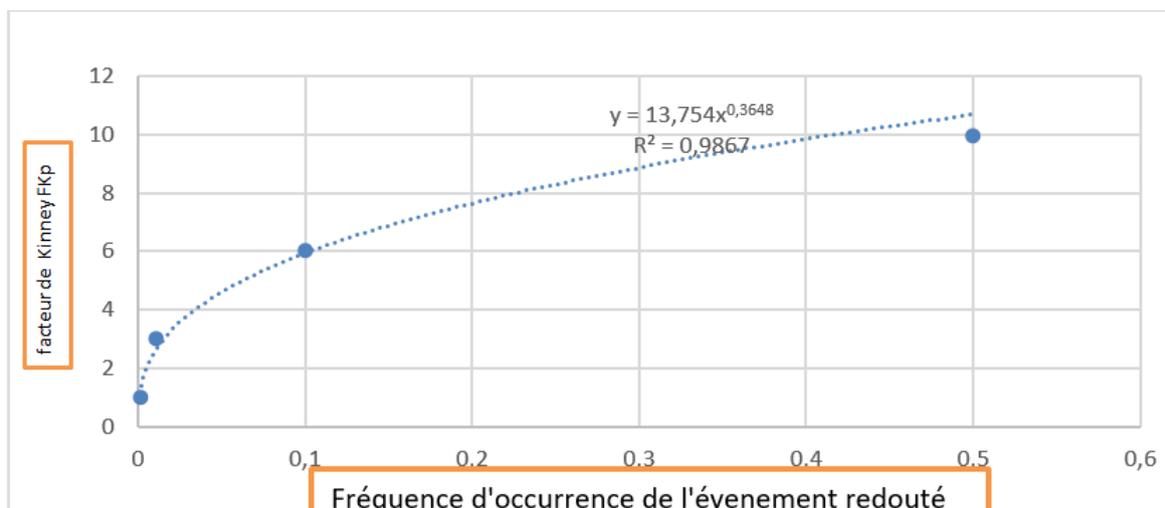


FIGURE 2.2: Évolution du facteur de Kinney FK_p en fonction de la fréquence d'occurrence

2.4.2 Détermination du facteur FK_g

Le calcul de la gravité ou des conséquences indésirables peut être directement déduit d'une évaluation des effets physiques d'un évènement impliquant les explosifs.

Les effets physiques générés par une réaction explosive sont :

- Le souffle (effet de surpression) ;
- la chaleur (effet thermique) ;
- les projections (effet de projection).

Nous noterons que dans notre étude nous nous concentrerons exclusivement sur l'effet de souffle (effet de surpression) Selon Kinney la grille du facteur FK_g est donnée dans le tableau 2.5 suivant :

TABLE 2.5: Grille de valeur du facteur FK_g

Gravité qualitative des effets	FK _g
Cas limite (accident mineur nécessitant premiers soins)	1
Important (incapacité de travail)	3
Grave (lésions graves)	7
Très grave (un cas mortel)	15
Désastre (quelque cas mortels)	40
Catastrophe (nombreux cas mortels)	100

L'Arrêté interministériel du 10 aout 1993 relatif aux Condition d'isolement des établissements de production et de conservation des substances explosives dans son article 3 a prévu un découpage en fonction de la quantité des explosifs de classe 1.1 en zone de danger. Nous dénombrons cinq zones : Z1,Z2,Z3,Z4 et Z5 elles sont définit dans le tableau ci-dessous .

Dans sa forme générale l'équation est :

$$D = DQ \cdot Q^{1/3} \quad (2.4)$$

Où Q est la quantité d'explosifs (équivalent TNT en kg), D la distance en mètre et le facteur QD (distance réduite) est exprimé en $m/kg^{1/3}$ et égale à $D/(Q^{1/3})$.

Avec :

- D.Q : Distance R (m) a la charge Q (kg)
- R_{50t} : Rayon pour les Dépôts 50T (m)
- R_{30t} : Rayon pour les Dépôts 30T (m)

TABLE 2.6: zone de danger d'explosion à l'air libre selon la loi algérienne

Zone	Distance R (m) a la charge Q (kg)	Rayon pour les Dépôts 50T (m)	Rayon pour les Dépôts 30T (m)	Dommages prévisibles aux personnes	Dégâts prévisibles aux biens
Z1	$0 \leq R1 \leq 5Q^{1/3}$	184.2	155.4	Blessures mortelles dans plus de 50% des cas	Dégâts très graves
Z2	$0 \leq R2 \leq 8Q^{1/3}$	294.7	248.7	Blessures graves pouvant être mortelles	Dégâts important
Z3	$0 \leq R3 \leq 15Q^{1/3}$	552.6	466.08	Blessures	Dégâts moyen et légers
Z4	$0 \leq R4 \leq 22Q^{1/3}$	810.48	683.54	Possibilités de blessures	Dégâts légers
Z5	$0 \leq R5 \leq 44Q^{1/3}$	1620.96	1367.08	Très faible possibilité de blessures légères	Dégâts très légers

Selon la même dite méthode le lien entre la gravité qualitative de Kinney et la surpression seuil engendrée par l'explosion est étroitement lié et est résumé dans le tableau 2.7 ci-dessous, qui donne également la correspondance des seuils de surpression avec le facteur QD dit facteur de distance réduite :

TABLE 2.7: Grille de valeurs du facteur FKg correspondantes aux seuils de surpressions et aux zones de dangers selon la loi algérienne

Gravité qualitative de Kenny	Cas limite (incident mineur nécessitant premiers soins ou entraînant des dommages matériels de 750 € = 105.000 DA)	Important (incapacité de travail ou dommage matériels de 7500 € = 1.050.000 DA)	Grave (lésions ou dommages de 75000 € = 10.500.000DA)	Grave (un cas mortel ou dommages de 750000 € = 105.000.000DA)	Désastre (quelque cas mortels ou dommages de 7500000 € = 1.050.000.000DA)
Seuil de surpression (mbar)	20	50	140	200	≥ 700
Facteur QD seuil correspondant ($m/kg^{1/3}$)	44	22	15	8	≤ 5
Zone de danger (selon l'Arrêté interministériel du 10 aout 1993)	Z5	Z4	Z3	Z2	Z1
FKg	1	3	7	15	40-100

Selon le tableau 1 donnant les distances respectives entre chaque dépôt et un autre adjacent ou même avec les premières installations de l'usine et la première agglomération nous prendrons les distances minimales entre toutes les configurations présentes.

Nous remarquons que pour le cas de la zone 1 correspondante au facteur FKg allant de 40-100 pour le déterminer nous devons prendre en considération un nouveau facteur qui est celui du nombre de personnes présentes sur place.

Ce constat nous a permis d'admettre que les facteurs de Kinney de 40 et de 100 pourraient être associés à des situations désastreuses où respectivement 10 et 100 personnes sont exposées. Cette hypothèse est résumée dans le tableau ci-dessous.

TABLE 2.8: Grille de valeurs du facteur FKg correspondantes aux nombres de personnes surplace

Nombre de personnes exposées	Facteur de Kinney chiffré de désastre
1	40
30	60
50	75
75	90
100	100

Pour connaître le facteur de Kinney quantitatif correspondant au nombre de personnes exposées, autre que ceux cités ci-dessus, à une situation désastreuse, une modélisation de l'évolution du facteur de Kinney relatif à la gravité (désastre) due à la surpression en fonction du nombre de personnes exposées à la situation dangereuse est réalisée.

La Figure 2.2 montre l'évolution de paramétré de kinney en fonction de nombre de travailleurs exposés

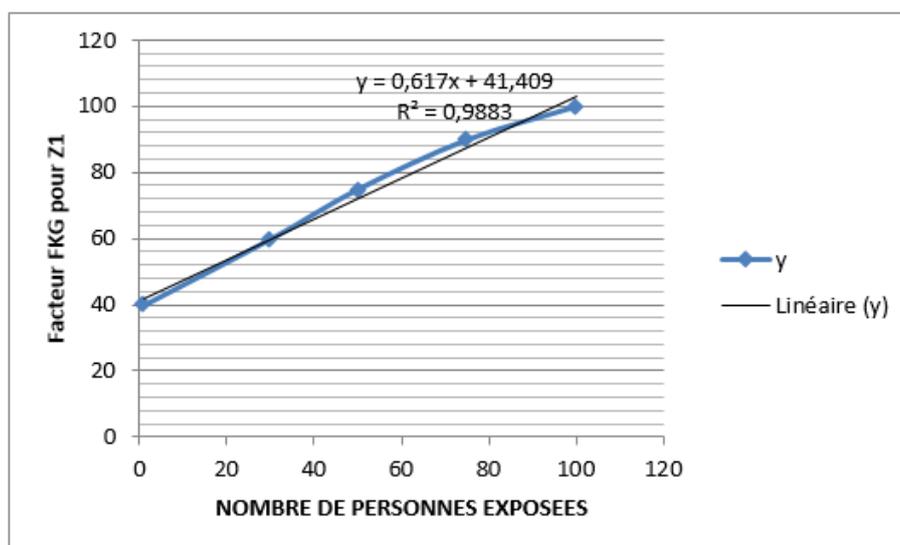


FIGURE 2.3: Évolution du facteur FKg en fonction de nombre de personnes surplace

$$FK_{Gdésastre} = 0,617N + 41,40 \quad (2.5)$$

Nous distinguons la disposition des personnes au sein de l'entreprise comme suit, en prenant garde à donner les Zones de dangers correspondantes à chacune :

TABLE 2.9: Grille donnant les distances , les zones et le nombre de personnes présentes pour chaque configuration des dépôts

Configuration	Zone de Danger	Nombre de Personnes	Distance moyenne
Dépôt/Dépôt	Z1	10	45m
Dépôts/Installations de production	Z1	200	250m
Dépôt/Agglomération	Z5	100000	1300m

En application, nous trouverons que le facteur FK_G correspondant au voisinage des dépôts (soit la zone Z1) pour un nombre de 6 personnes présentes est donné par :

$$FK_{GDésastre} = 0,617N + 41,04 \quad (2.6)$$

Pour $N=6$ on aura

$$FK_G = 44,742$$

En observation de l'Etat actuel des rayons de sécurités, nous remarquons la possibilité d'augmentation de la Charge NEQ (en équivalent TNT) d'explosifs, le tableau 2.10 ci-dessous donne la charge NEQ supplémentaire nécessaire pour atteindre le seuil critique :

$$D3 = 0.5Q^{1/3}; D4 = 0.8Q^{1/3}; D5 = 1.1Q^{1/3}; D13 = 5.5Q^{1/3}$$

la tableau résumant les résultats de calcul des capacités de stocks en utilisant les nouvelles abaques -Annexe B- montrent les modèles de calcul pour chaque type de dépôts et pour toutes configurations d'expositions

TABLE 2.10: Etat actuel des PES et leurs orientations

CONFIDENTIEL

Pour confirmer les résultats notés au tableau ci-dessus nous appliquerons la directive technique internationale des nation unis pour le développement d'Instructions techniques pour la gestion du stockage des munitions conventionnelles, plus connues sous le terme anglophone de « **International Ammunition Technical Guidelines (IATG)** », cette directive est également présente sur le site web officiel des Nation Unis : www.un.org.

TABLE 2.11: Les résultat de calcul avec l'ITAG pour les dépôts 1.46 -1.55

QUANTITY DISTANCES (METRES)											
ES → PES ↓											
	1.47	1.48	1.49	1.50	1.51	1.52	1.53	1.54	1.55		
	48	48	46	47	47	57	48	47	120		
NET EXPLOSIVE QUANTITY (IN UNITS OR DECIMAL FRACTIONS OF 1000 KILOGRAMS)											
HD 1.1	83.09	216.00	190.11	202.78	202.78	139.14	216.00	202.78	250.00		
HD 1.21	No Limit	No Limit									
HD 1.22	No Limit	No Limit									
HD 1.31	25m	25m									
HD 1.32	No Limit	No Limit									

TABLE 2.12: Les résultats de calcul avec l'ITAG pour les dépôts ND01-ND05 et 1.06-1.05

QUANTITY DISTANCES (METRES)						
ES → PES ↓						
	ND 02	ND 03	ND 04	ND 05	1.06	
	55	63	115	57	43	
NET EXPLOSIVE QUANTITY (IN UNITS OR DECIMAL FRACTIONS OF 1000 KILOGRAMS)						
HD 1.1	250.00	250.00	250.00	250.00	155.29	
HD 1.21	No Limit					
HD 1.22	No Limit					
HD 1.31	25m	25m	25m	25m	25m	
HD 1.32	No Limit					

2.4.3 Détermination du facteur de fréquence FKE

Une échelle telle que décrite ci-dessous peut être utilisée pour faire la correspondance entre le taux d'exposition E et les facteurs chiffrés associés à l'exposition selon l'échelle de Kinney (FKE).

TABLE 2.13: Grille de valeur du facteur FKE correspondantes aux taux d'exposition

Fréquence d'exposition qualitative selon l'échelle de Kenny	Très rare	Rare	Exceptionnelle ou inhabituelle	Occasionnelle	Fréquente	Permanente ou continue
Fréquence d'exposition quantitative selon l'échelle de Kenny (FKE)	0,5	1	2	3	6	10
Taux d'exposition E (valeur statistique indicative)	0.1%	1%	5%	10%	50%	100%

Une évolution continue du facteur de Kinney associé à l'exposition (FKE) en fonction du taux d'exposition E est représentée sur le graphique correspondant à l'équation ci-dessous :

$$FK_E = 0,9585 * e^{0,4906} \quad (2.7)$$

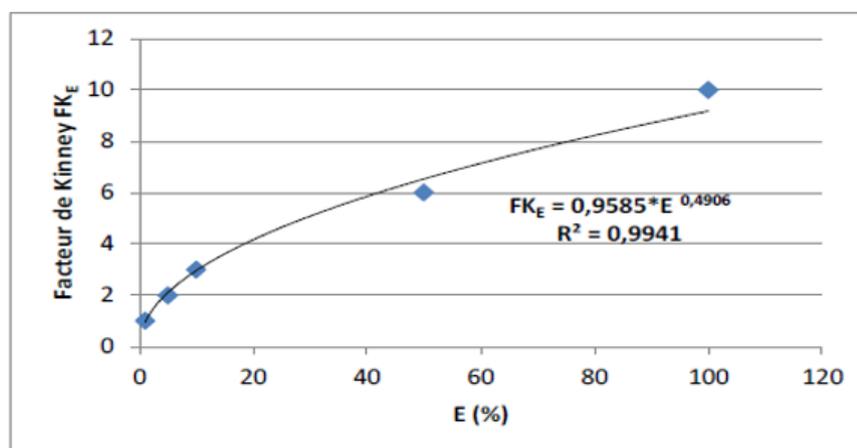


FIGURE 2.4: L'évolution de FK_E en fonction du E

Sachant que dans notre cas et vu à la cadence de production de l'entreprise, les employés sont présents près des dépôts de stockage de façon quasi-permanente et cela durant toutes les heures de service. De ce fait et par analogie avec le tableau 2.10 ci-dessus, le facteur FKe correspondant au taux d'exposition permanente de 100% est de :

$$FKe = 10$$

2.4.4 Indice de criticité(C)

L'indice de criticité ou le risque ($C = FKP * FKG * FKE$) est calculé pour un effet donné (effet de souffle ou thermique), pour une opération pyrotechnique donnée et à une distance donnée de la source.

Les effets de projections ne sont pas pris en compte dans cette méthode. L'exploitant s'assure donc que les travailleurs d'un PES sont à l'abri des effets de projections engendrés par les activités exécutées dans le PES.

Chaque indice de criticité calculé sera, selon son évaluation et sa comparaison à une échelle de critères de risque, à l'origine de la nature et de l'urgence des actions de prévention à mettre en place (traitement du risque).

Pour notre cas spécifique, nous obtenons par multiplications des trois facteurs le résultats ci-dessous :

$$C = 0,2 * 47,742 * 6 = 53,6904$$

Une échelle de critères de risque telle que décrite ci-dessous peut être utilisée pour évaluer le risque pour le personnel à son poste de travail pyrotechnique.

selon la grille de criticité (C) donnée par KINNEY ci-dessous , nous remarquons que nous sommes dans le cas de risque Acceptable, ce qui justifie de manière directe notre volonté à augmenter les capacité, de stockage de ces dépôts tout en essayant de maîtriser les risques générés par ces derniers.

TABLE 2.14: grille de criticité selon Kinney

Risque ou indice de criticité de risque individuel ou collectif	Critères d'acceptabilité pour les travailleurs pyrotechniciens
$C \leq 20$	Risque limité
$20 < C \leq 70$	Acceptable
$70 < C \leq 160$	ALARP
$160 < C \leq 320$	Inacceptable 1
$320 < C$	Inacceptable 2

Risque Acceptable : Aucune mesure de sécurité n'est requise pour réduire le risque

Zone ALARP : L'objectif primordial en matière de gestion des risques consiste à les réduire à leurs niveaux les plus bas réalisables tout au long de la durée de vie des installations. Les niveaux les plus bas réalisables sont définis par le principe ALARP (As Low as Reasonably Practicable ou «aussi bas qu'il est raisonnablement possible de faire»). Le principe est largement utilisé et reconnu par les autorités concernées dans le domaine de la manutention des matières dangereuses.

Risque Inacceptable : Risque non justifié peu importe le contexte

(1) Des efforts doivent être consentis pour réduire le risque. Des mesures de réduction des risques doivent être prise et mises en œuvre dans une période de temps définie.

(2) Le travail ne doit pas être entrepris ni continuer tant que le risque n'a pas été réduit. S'il n'est pas possible de réduire le risque, le travail doit être interdit.

Commentaires Pour notre cas d'étude nous remarquons que le risque se situe dans la zone Acceptable avec une criticité $C = 57.6$, ce résultat est tout a fait raisonnable en prenant considération du type d'industrie dont il est question, et aussi les dispositions légales et organisationnel qui régissent rigoureusement cette activité. Nous illustrons ultérieurement les zones de danger pour chaque dépôt présent avec leurs charges initiales puis avec les nouvelles charges affectées, conditionné par la loi et sans sortir de la valeur

de FKg affecté, effectuée sur ces derniers.

2.5 Conclusion

En conclusion de l'analyse sus faite, et par le biais de la méthode de kinney, adaptée à la réglementation algérienne, les quantités critiques de charge d'explosifs de classe 1.1, légalement possibles d'être stockés sont définit , nous tacherons dans le prochain chapitre de confirmer physiquement et par le biais d'une modélisation mathématique et d'une simulation numérique la véracité de la loi et sa concrète faisabilité.

Chapitre 3

Étude de la résistance des dépôts

3.1 Introduction

Dans cette étape nous allons simuler et modéliser l'explosion en masse des explosifs de classe 1.1 (de l'ordre de 50 à 100 Tonnes) en milieu clos, de volume V. et étudier la résistance de la structure en cas d'explosion afin de justifier l'augmentation des stocks et répondre aux exigences réglementaires .

La première partie de ce chapitre nous permettrait de spécifier et caractériser les propriétés de la structure en passant par des généralités sur le béton armé, le béton, l'acier et l'adhérence béton / acier .

La seconde étape sera consacrée à la simulation par le logiciel ANSYS de la déformation engendrée par la détonation de la charge explosive.

3.2 Propriétés et structure des dépôts

L'étude de la résistance de la structure passe par l'obtention des connaissances nécessaires de béton armé et le comportement de l'interface béton / acier . donc cette partie a pour but d'analyser les propriétés de la structure afin d'en faire une synthèse complète en s'appuyant sur les résultats des recherches sur les ouvrages liées au domaine et justifier les modèles de résolutions numérique utilisés pour étudier l'impact réel sur les dépôts .

3.2.1 Béton armé

L'utilisation des voiles en béton armé pour la construction des structures dans les régions sismiques et les industries à haut risque devient de plus en plus fréquente. La raison est que les voiles, outre leur rôle porteur vis-à-vis des charges verticales, sont particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales.

Généralités : (beton-armé)

Le Béton armé est un élément mélangé par plusieurs matériaux. Il est constitué par la réunion de deux matériaux que nous supposons simple ; c'est le béton et l'acier, disposés d'une façon à utiliser d'une manière économique la résistance de chacun d'eux.

Le béton de ciment présente des résistances à la compression assez élevées, de l'ordre

de 25 à 40MPa, mais sa résistance à la traction est faible, de l'ordre de 1/10 de sa résistance en compression. De plus, le béton de ciment a un comportement fragile.

L'acier présente une très bonne résistance à la traction (et aussi à la compression pour des élancements faibles), de l'ordre de 500MPa, mais si aucun traitement n'est réalisé, il subit les effets de la corrosion. De plus, son comportement est ductile, avec des déformations très importantes avant rupture[5].

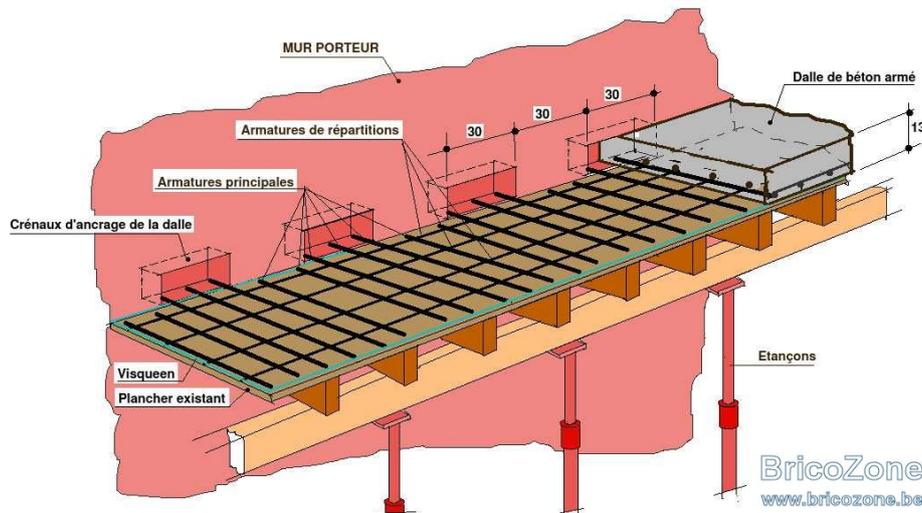


FIGURE 3.1: Une dalle en BA

Pour pallier à la faible résistance du béton en traction et à sa fragilité, on lui associe des armatures en acier : c'est le béton armé.

Avantages et inconvénients du béton armé

Les avantages

- (a) **L'intérêt économique** : Le béton est le moins coûteux des matériaux, résistant à la compression et susceptible d'être associé à d'autres éléments. On dit que l'acier est actuellement le seul matériau utilisé dans la fabrication des armatures parce que sa résistance est supérieure.
- (b) **La souplesse d'utilisation** : Le béton étant mis en place (dans des moules : coffrage) à l'état pâteux ; il est possible de réaliser des constructions aux formes les plus variées et les armatures peuvent être facilement liées. Les assemblages entre différents éléments en béton se réalisent par simple contact.

- (c) **Economie d'entretien** : Les constructions en béton armé ne nécessitent aucun entretien particulier tandis que les constructions métalliques ont besoins d'être peintes régulièrement.
- (d) **Résistance au feu** : Les constructions en béton armé se comportent beaucoup mieux en cas d'incendie que les constructions métalliques ou en bois. Le béton, grâce à sa mauvaise conductibilité thermique retarde les effets de la chaleur sur les armatures, il est possible de remettre en service la construction après les réparations superficielles. Ce qui est impossible pour les constructions métalliques. Cette propriété a permis d'utiliser le béton armé dans certaines parties des fours.
- (e) **Résistance aux efforts accidentels** : Le béton armé, en raison de son poids important, est moins sensible aux variations de surcharges que d'autres modes de constructions.
- (f) **Durabilité** : Le béton armé résiste bien à l'action de l'eau et de l'air. La seule condition à observer est la protection des armatures.

Les inconvénients

- (a) **Le poids** : Les ouvrages en B.A sont plus lourds que les autres modes de construction.
- (b) **Exécution** : Pour exécuter un ouvrage en béton armé, il faut :
 - Préparation de coffrage qui demande beaucoup de temps et un travail de charpente important. Ce coffrage doit rester en place jusqu'à ce que le béton atteint une résistance suffisante.
 - le placement des armatures
 - Pendant et après les mises en place du béton, il faut prendre des précautions pour le protéger contre le gel et l'évaporation de l'eau.
 - Le contrôle de la qualité du matériau perfectionné lors du gâchage.
- (c) **Brutalité des accidents** : Les accidents qui surviennent d'un ouvrage en béton armé sont en général soudains ou brutaux. En général, ces accidents sont dus à des erreurs de calculs ou de réalisations.
- (d) **Difficulté de modification d'un ouvrage déjà réalisé** : Il est difficile de modifier un élément déjà réalisé.

3.2.2 la Sécurité des structures –Réglementation- (Béton-armé)

La sécurité est définie comme l'absence de risque, et dans le domaine de construction ; cela implique la stabilité et la durabilité et l'aptitude à l'emploi. La sécurité absolue n'existe pas ; il faut accepter une probabilité négligeable d'accident.

Le dimensionnement des ouvrages et la vérification de la sécurité ne peuvent pas se faire de manière empirique. Ils sont basés sur des règles de calculs bien précises.

Règlements classiques - coefficient de sécurité : (C.C.B.A)

Ces règlements utilisent la méthode des contraintes admissibles qui consiste à vérifier les contraintes calculées par la R.D.M en tout point d'une structure sous une contrainte admissible obtenue en divisant la contrainte de ruine du matériau par un coefficient de sécurité fixé à l'avance [5].

$$\sigma < \sigma_{adm} = \frac{\sigma_r}{k} \quad (3.1)$$

Théorie probabiliste de la sécurité

Les ingénieurs ont défini la sécurité par un seuil de probabilité ; un ouvrage sera acceptable si la probabilité de ruine reste inférieure à une probabilité fixée à l'avance. Cette valeur varie en fonction de la durée de vie de la construction, du risque et du coût. Cette méthode a de multiples difficultés [5].

- (1) On ne peut pas définir la probabilité de ruine et son évolution dans le temps.
- (2) On ne peut pas recenser tous les facteurs aléatoires d'une incertitude.

Théorie semi -probabiliste - Etats limites : (B.A.E.L) 83-91

Cette nouvelle théorie consiste à [6] :

- (1) Définir les phénomènes que l'on veut éviter (l'état limite), ces phénomènes sont :
 - (a) Ouverture des fissures soit par :
 - Compression successive dans le béton.
 - Traction successive dans l'acier.
 - (b) Déformation importante dans l'ensemble.
- (2) Estimer la gravité des risques liés à ces phénomènes (on distingue les états limites ultimes et les états limites de services).

- (3) Dimensionner les éléments de la construction de telle manière que la probabilité d'atteindre l'un de ces phénomènes reste faible.

Etat limite ultime (E.L.U) Il correspond à la valeur maximale de la capacité portante de la construction et dont le déplacement entraîne la ruine de la construction [6].

Exemple :

a- Etat limite ultime d'équilibre statique de l'ouvrage : C'est la perte de la stabilité d'une partie ou de l'ensemble de la construction (le renversement).

b- Etat limite ultime de résistance de l'un des matériaux de construction : C'est la perte de résistance du béton ou de l'acier.

Etat limite de service (E.L.S) Il constitue des limites au-delà desquelles les conditions normales d'exploitation ne sont plus satisfaites sans qu'il y ait ruine [6].

Exemple :

a- Etat limite de service de compression de béton : Cette limitation a pour but d'empêcher la formation des fissures.

b- Etat limite de service d'ouverture des fissures : Il consiste à assurer que les armatures soient convenablement disposées dans la section et les contraintes ne dépassent pas la valeur limite.

c- Etat limite de service de déformation : Il consiste à vérifier que les déformations soient inférieures à des déformations limites.

Règlementations Algériennes : (C.B.A.93)-(R.P.A.2003)

C'est les règlements techniques algériens qui viennent se substituer à la pratique admise du B.A.E.L (Béton Armé aux Etats Limites); en donnant des recommandations spéciales pour l'Algérie dans le domaine para-sismique R.P.A (Règlement Para-sismique Algérien)[5].

Actions et sollicitations

Les actions On appelle actions, les forces et les charges appliquées aux déformations imposées. On distingue trois types d'actions [5] :

- (a) **Actions permanentes (G) :** Ce sont des actions continues dont l'intensité est constante ou très peu variable dans le temps. Exemple : le poids propre.

- (b) **Actions variables (Q) (d'exploitations)** : Ce sont des actions dans l'intensité varie fréquemment et d'une façon importante dans le temps. La durée d'application est très faible par rapport aux durées de vie de constructions. Les valeurs de ces charges sont fixées par le règlement, en fonction des conditions d'exploitation de la construction.
- (c) **Actions accidentelles (F_A)** : Ce sont des actions provenant de phénomènes se produisant rarement par une faible durée d'application. Exemple : Vent, séisme...

Les sollicitations Ce sont les efforts normaux, tranchants, les moments fléchissant et de torsions qui sont calculés à partir des actions en utilisant les procédés de la RDM [5].

Les combinaisons d'actions Pour déterminer les sollicitations, on utilise les combinaisons d'actions proposées [6] :

- (a) G_{min} actions permanentes favorables .
- (b) G_{max} actions permanentes défavorables .
- (c) Q_1 actions variables de base .
- (d) Q_i actions variables d'accompagnement .

Etats limites ultimes : (E.L.U)

$$1,35.G_{max} + G_{min} + \gamma_{Q_1} + \Sigma 1,3.\gamma_{Q_i}.Q_i \quad (3.2)$$

γ_{Q_1} : Coefficient multiplicateur = 1,5 dans le cas général.

Généralement la combinaison s'écrit : $1,35.G_{max} + 1,5.Q$

Lorsque nous introduisons les actions accidentelles, elle s'écrit :

$$G_{max} + G_{min} + \Sigma \gamma_{Q_i}.Q_i + F_A \quad (3.3)$$

Avec F_A : Action accidentelle.

Etats limites de services : (E.L.S)

$$G_{max} + G_{min} + Q_1 + \Sigma \gamma_{Q_i}.Q_i \quad (3.4)$$

γ_{Q_1} : Coefficient multiplicateur.

Généralement la combinaison s'écrit : $G + Q$

3.2.3 Cas réel ONEX

S'appuyant sur la documentation du constructeur allemand daté de 1975 et des ouvrages disponibles, nous avons mis au point ce travail afin de définir les différents constituants de la structure et illustrer les notions de base de calculs de ces matériaux sous contraintes généralisées (compression, traction, flexion simple), en tenant compte des règles de conceptions et de calculs idoines.

Comportement du Béton

Le béton est un matériau qui a la particularité d'être hétérogène à plusieurs échelles. Il est constitué de gravillons et de grains de sable noyés dans une pâte de ciment. Le béton est caractérisé par sa faible résistance en traction, d'où la nécessité d'armatures afin de réduire les risques de fissuration [7].

Un béton est défini par un certain nombre de critères et sera caractérisé par des propriétés dont la résistance n'est qu'un des aspects. Le mot "performance" englobe des caractéristiques diverses :

- Densité, Porosité, Maniabilité .
- Perméabilité ou résistance à la pénétration de l'eau .
- Résistance aux agents agressifs extérieurs (chimiques notamment) .
- Tenue au feu .
- Développement accéléré de la résistance et Déformabilité
- Teneur en air (air entraîné et occlus)
- Résistance à la compression (qui n'est que l'une d'entre elles).

Caractéristiques mécaniques Le béton a un comportement mécanique très complexe englobant un comportement fortement linéaire sous un état de contraintes multiaxiales, une fissuration progressive induite par des contraintes ou des déformations[8].

Dans notre cas, on va s'intéresser au comportement du béton tant dans la compression que dans la traction.

Essai de compression (R_c) Le béton présente une résistance relative à la compression. Les résistances obtenues dépendent de la composition. En général, les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées, appelées 16 * 32, de forme cylindrique, de

hauteur 32 cm et de diamètre 16 cm (Aire de 200 cm²) pendant 28 jours.[9]

La courbe contrainte-déformation d'un essai de compression est montrée dans la figure 3.2 :

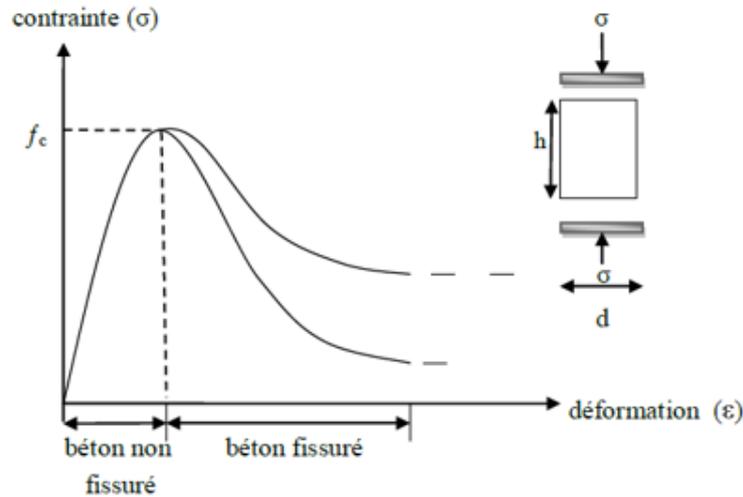


FIGURE 3.2: Comportement de Béton en compression

Essais de traction (R_t) Il est beaucoup plus difficile de faire des essais en traction.

On distingue :

- Les essais de traction directe avec des éprouvettes collées .
- Les essais de traction indirecte tels que l'essai Brésilien ou l'essai en flexion quatre points.

On retiendra que la résistance à la traction du béton est beaucoup plus faible que celle à la compression [9]

$$R_t = \frac{R_c}{10} \quad (3.5)$$

Les caractéristiques de béton 25 MPa introduites dans logiciel ANSYS pour la modélisation sont résumées dans le tableau 3.1 ci-dessous :

TABLE 3.1: Caractéristiques de Béton 25 MPa.

Masse volumique	2350 Kg/m ³
le module de Young	28900 MPa
Coefficient de poisson	0.285
Module de compressibilité	19267 MPa
Module de cisaillement	11560 MPa
Le coefficient de dilatation thermique	7.10^{-6}
Résistance à la compression	25 MPa
Résistance à la traction	2,1 MPa
la déformation maximale à la rupture	2.10^{-3}

Comportement de l'acier

L'acier est un matériau homogène et isotrope, il peut être sollicité de manière identique dans toutes les directions en compression et en traction.

Homogène : Les cellules qui le composent sont de même nature et répartis de façon uniforme.

Isotrope : Les caractéristiques physiques et mécaniques de l'acier sont les mêmes dans toutes les directions, de sorte qu'il se déforme élastiquement ou plastiquement, et à la limite, se rompt, toujours dans les mêmes conditions quelle que soit l'orientation de la microstructure[7].

Caractéristiques mécaniques L'acier est un alliage de fer et carbone. On distingue des aciers doux, des aciers mi-durs et des aciers durs.

Acier doux — carbone 0,15 - 0,25 % .

Acier mi dur et dur — carbone 0,25 - 0,45 %

Comportement en traction La propriété mécanique mise en avant pour l'acier est sa résistance à la traction. Elle est liée à la propriété de ductilité du matériau, qui peut subir une grande déformation avant de se rompre.

Lorsque l'acier est soumis à un effort de traction, il passe par trois états successifs : le domaine élastique, le domaine plastique et enfin la rupture. Ces trois états sont déterminés à travers une courbe dite de traction.

Dans le domaine élastique, l'expression de la contrainte en fonction de l'allongement sera :

$$\sigma = E.\varepsilon \quad (3.6)$$

avec : E le module de young

ε : la déformation.

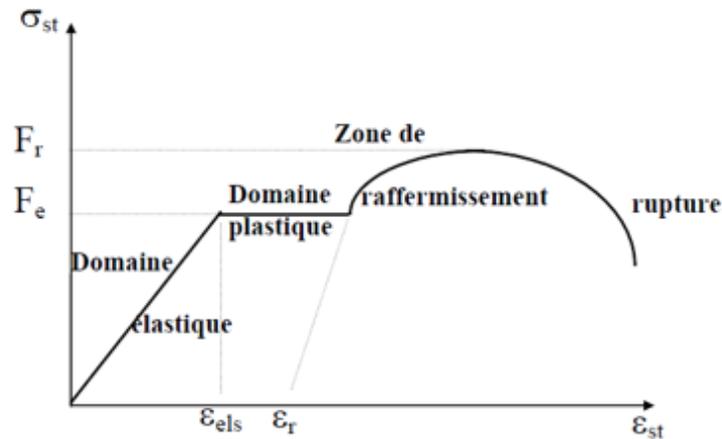


FIGURE 3.3: Comportement de l'Acier en traction

La contrainte correspondante à la limite de proportionnalité entre contrainte et déformation est appelée limite élastique ou limite d'élasticité. Elle est notée par F_e (Figure 3.3). Dans la zone de raffermissement la contrainte atteint un maximum, et on l'appelle contrainte de rupture et elle sera notée par F_r [5].

Comportement en compression Le comportement en compression de l'acier est symétrique du comportement en traction. L'acier se raccourcit quand il est comprimé sous l'effet d'une charge.

L'acier utilisé dans la construction du béton armé à l'ONEX est défini par une norme Allemande DIN 1045 1055 avec une référence BsT 42/50 .

On utilise ce type d'aciers dont la limite d'élasticité est très grande et à Haute Adhérence (HA) afin de réduire les sections d'armatures.

Les caractéristiques de BsT 42/50 introduites dans le logiciel ANSYS sont indiquées dans le tableau 3.2 ci-dessous

TABLE 3.2: Caractéristiques d'Acier BsT 42/50.

Masse volumique	7860 Kg/m ³
le module de Young	203000 MPa
Coefficient de poisson	0.285
Module de compressibilité	157360 MPa
Module de cisaillement	78988 MPa
Le coefficient de dilatation thermique	11.10^{-6}
Résistance à la compression	480 MPa
Résistance à la traction	500 MPa
la déformation maximale à la rupture	0,12

Association béton/acier

L'association béton /acier est efficace pour les raisons suivantes :

- Un assemblage judicieux de matériaux aux caractéristiques complémentaires .
- L'acier s'adhère au béton, ce qui permet la transmission des efforts d'un matériau à l'autre.
- Il n'y a pas de réaction chimique entre l'acier et le béton et en plus le béton protège l'acier de la corrosion.
- Le coefficient de dilatation des deux matériaux est pratiquement le même.

L'adhérence L'adhérence est un phénomène de liaison tangentielle à l'interface acier-béton. Cette surface de contact a pour rôle de permettre le transfert des efforts entre le béton et l'acier.

La transmission à lieu le long de la surface latérale des barres grâce au phénomène d'adhérence.

L'adhérence désigne l'action des forces de liaisons qui s'opposent au glissement des barres suivant l'axe par rapport au béton qui l'entoure (Figure 3.4)[5].

Si on exerce un effort d'arrachement suivant l'axe de la barre, on peut avoir trois modes de rupture.

Dans les constructions du béton armé, les efforts sont appliqués au béton et non pas aux aciers. Ceux-ci seront sollicités grâce à leurs liaisons avec le béton.

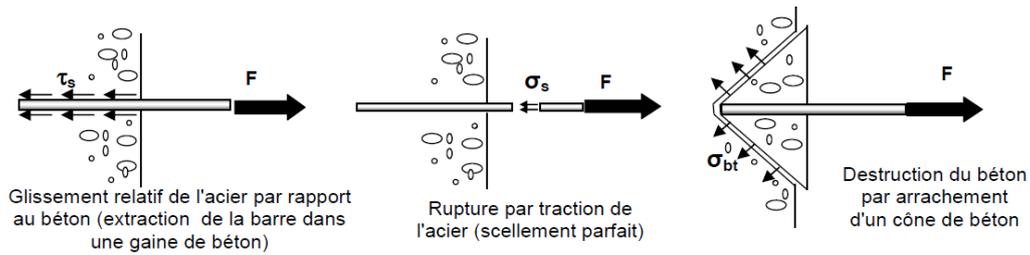


FIGURE 3.4: Essai d'arrachement d'une barre scellée dans un massif en béton[10]

On parvient rarement dans une structure à une rupture par compression de l'acier, parce qu'entre temps on a lieu à des phénomènes de flambement et de voilement qui provoquent la ruine de la structure avant qu'une sollicitation égale à la résistance à la compression ne soit atteinte [8].

Notre structure est caractérisée par un poids volumique de 2500 Kg/m³ et un coefficient de dilatation thermique de l'ordre de 10.10⁻⁶

Présentation des Structures

La zone de stockage, objet de notre étude (Voir chapitre I -Figure 2), comprend au total 17 dépôts sous deux formes :

Structure I 2 dépôts dont la capacité des stocks est de 30 T.

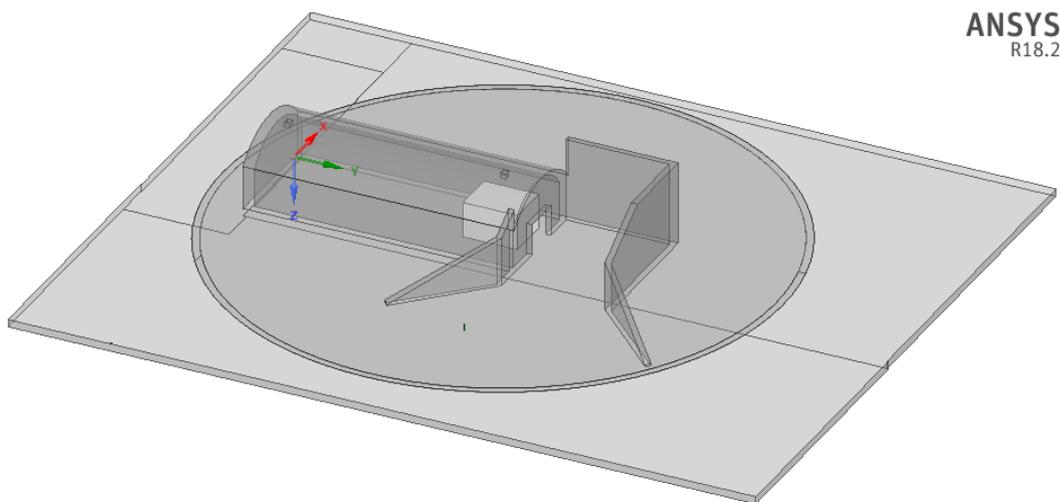


FIGURE 3.5: Structure -Forme 1-Igloo à simple baie.

Les dimensions internes sont mentionnées sur la Figure 3.6 ci-après-

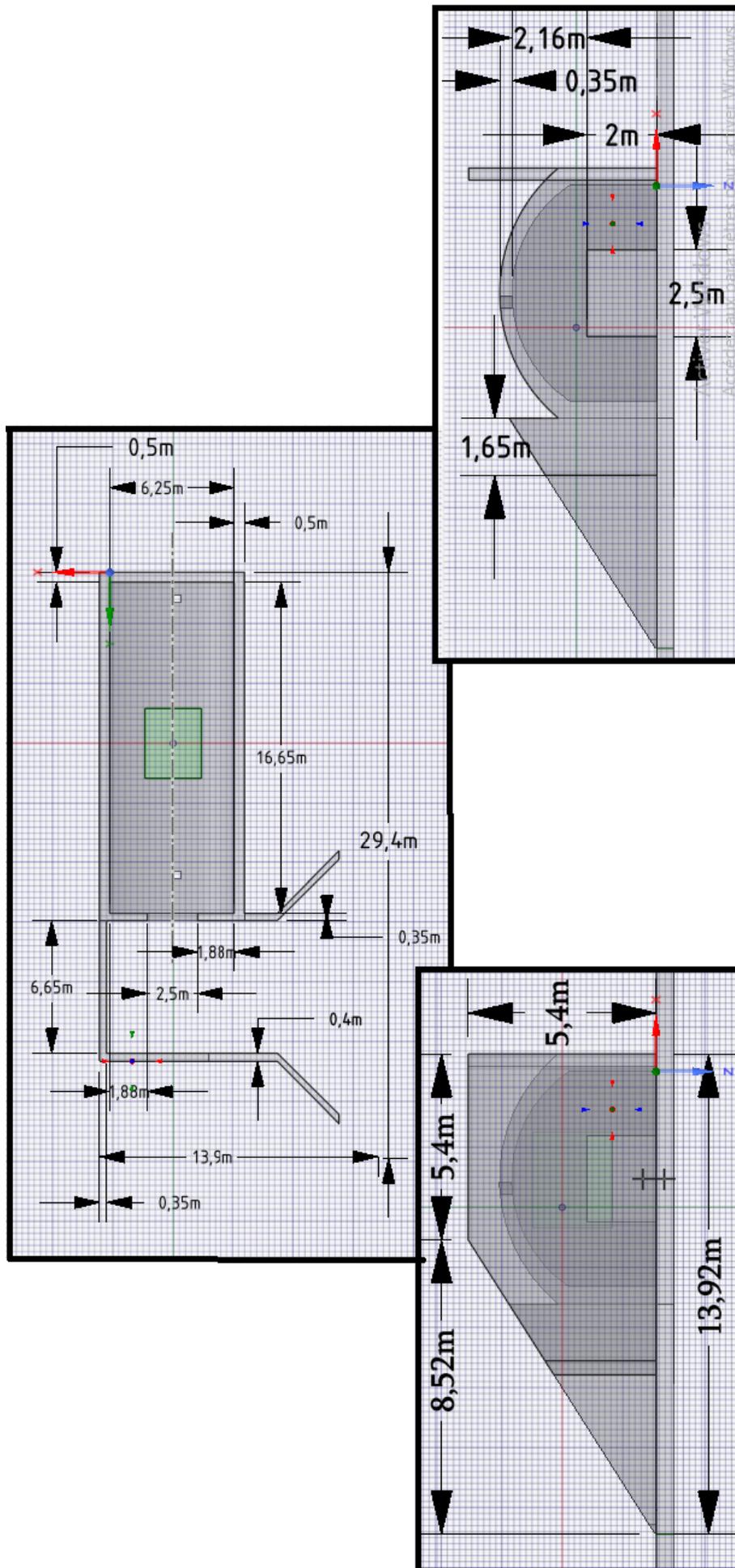


FIGURE 3.6: les dimensions de structure à simple baie.

C'est un Igloo à baie simple d'une structure portique en BA qui possède une couverture en terre sur le toit, contre les murs de côté et le mur arrière. L'accès se fait par une porte glissante en acier suspendue par le haut, et une porte en acier pour le personnel

La structure est conçue de façon dynamique pour résister à une surpression extérieure de 7 bars, et aux projections à grande vitesse en tant que site exposé à une explosion provenant d'un SPE à proximité.

Structure II 15 dépôts dont la capacité des stocks est de 50 T.

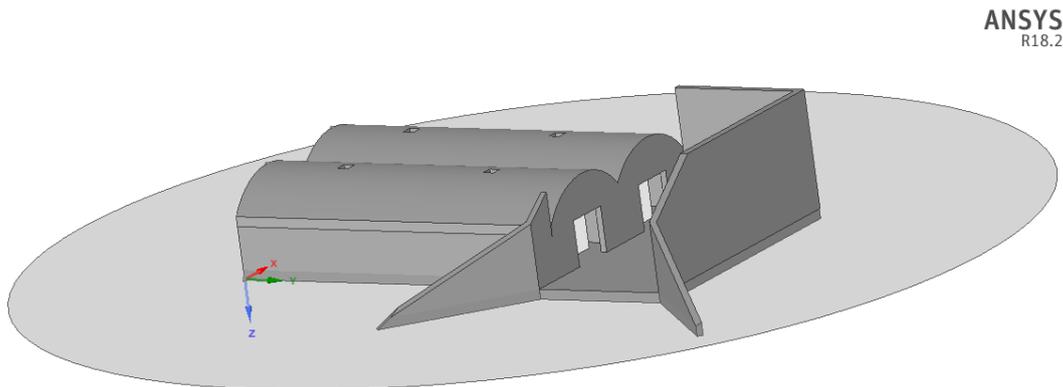


FIGURE 3.7: Structure -Forme II-Igloo à double baies.

C'est un Igloo à double baies de même d'une structure BA, à part que la dalle de toiture est soutenue au milieu par une poutre BA longitudinal. La conception architecturale est prévue pour résister à une surpression extérieure de 7 bars, et aux projections à grande vitesse en tant que site exposé d'une explosion provenant d'un SPE à proximité.

- Les dépôts (Structure I et II) sont munis d'une construction au Béton Armé (Béton 25 MPa et armatures en Acier 500 MPa). Ils ont reçu un recouvrement de terre de 1 m.
- Comme matériaux de recouvrement, on a un still sableux argileux avec $\gamma = 2MP/m^3$.
- Le remblaiement de terre considéré en coupe transversale est fait de façon uniforme sur les deux côtés.
- Les voutes sont confectionnées en béton mousse $\gamma = 1.4MP/m^3$ sans armature d'acier pour orienter l'effet de souffle en cas d'explosion vers le haut.

Les dimensions du dépôt à double baies sont mentionnées sur la Figure 3.8 ci –après

3.3 Présentation du logiciel

Les logiciels de calcul standard ont une difficulté dans la modélisation du comportement des structures en béton armé. En effet, sous l'action de l'onde de souffle, il y a des phénomènes complexes qui se produisent : la dégradation des propriétés des matériaux et de l'interface béton/acier. De plus, le comportement du béton, qui est, à la fois, élastique et plastique, n'est jamais facile à simuler. Toutes ces caractéristiques provoquent une grande difficulté dans la simulation.

Les études des événements tels que l'explosion et la déformation sont souvent difficiles ou coûteuses à étudier expérimentalement. La simulation fournit un aperçu et une compréhension détaillée de la physique fondamentale qui s'y déroule et donne aux ingénieurs l'occasion d'apporter les changements nécessaires.

Pour pouvoir résoudre ces difficultés, ANSYS a été choisie parce qu'il dispose d'un outil numérique et une méthodologie d'analyse performante permettant de simuler le comportement des dépôts vis-à-vis l'explosion des grandes quantités de d'équivalent TNT.

3.3.1 ANSYS

ANSYS est mondialement le plus grand fournisseur en logiciels de simulation et couvre, par ses caractéristiques multi-physiques, pratiquement toutes les disciplines, à savoir le calcul structurel et thermique, le calcul d'écoulement (CFD) et le calcul électromagnétique. Dans l'industrie, la recherche et l'éducation ANSYS est parmi les solutions les plus utilisées pour la simulation numérique [11].



Le logiciel ANSYS permet la modélisation des structures, produits, composants ou systèmes et étudie leurs comportements et leurs réponses physiques telles que les contraintes, la déformation, l'effet de souffle et du champ électromagnétique [11].

3.3.2 ANSYS Workbench

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle. Elle est particulièrement adaptée au traitement des géométries complexes (nombreux corps

de pièces) et aux problèmes de calcul non linéaires [12].

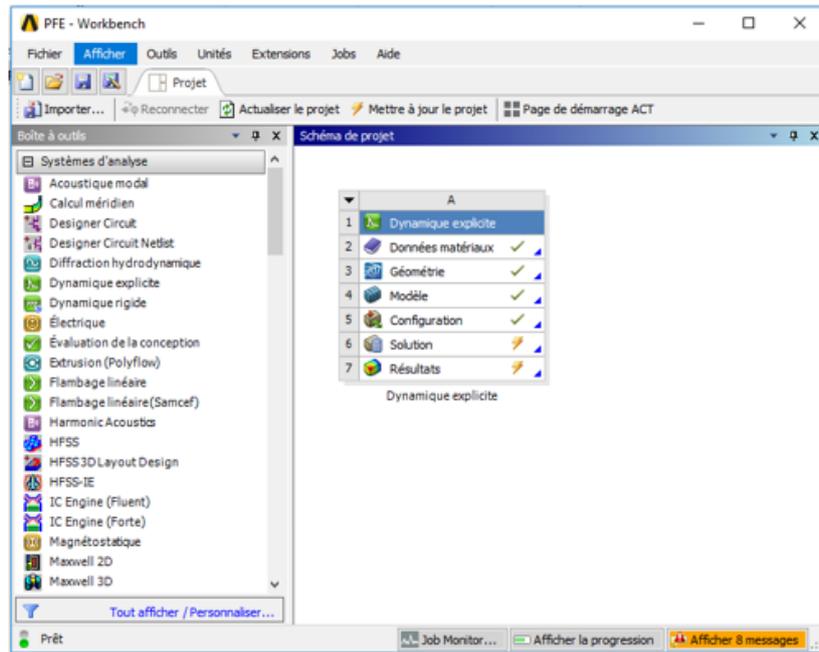


FIGURE 3.9: Interface workbench .

Dans cet environnement, nous allons travailler essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées avant de lancer la résolution.

3.3.3 Dynamique explicite

"Implicite" et "Explicite" désignent deux types de méthodes d'intégration temporelle utilisées pour effectuer des simulations dynamiques [11].

L'intégration temporelle explicite est plus précise et plus efficace pour les simulations impliquant : Propagation d'onde de choc, déformations et pression importantes, comportement non linéaire du matériau, et contact complexe [11].

3.3.4 AUTODYN

Le logiciel ANSYS AUTODYN est un outil d'analyse explicite avancé pour la modélisation de projets complexes dynamiques non linéaires sur une courte période .

Le solveur AUTODYN est entièrement intégré dans la plate-forme ANSYS Workbench

avec une interface graphique intuitive et facile à utiliser. Ce logiciel est idéal pour la résolution :

- Charges de souffle sur les structures.
- Caractéristiques des matériaux soumis à des charges hautement dynamiques.
- Effets des armes et réaction de la cible.
- Impacts et pénétration à grande vitesse.
- Déformation structurelle importante.
- Fragmentation.

Modélisation des matériaux et Méthode de résolution –AUTODYN-

Le logiciel ANSYS AUTODYN offre de multiples méthodes de solution :

- (1) **Lagrange** : utilisé typiquement pour modéliser les solides et les structures. Avec cet algorithme, le maillage se déforme avec le matériau, ce qui a l'avantage de fournir une bonne rapidité de calcul et une bonne définition des interfaces entre les matériaux. Cependant, des problèmes existent, notamment « l'enchevêtrement » du maillage qui se produit pendant les calculs [13].
- (2) **Euler** : utilisé pour modéliser les fluides (gaz et liquide), les larges déformations des solides et les problèmes multi-matériaux. Le solveur Euler utilise un maillage fixe dans l'espace à travers lequel se déplacent les écoulements. Ce qui représente des calculs numériques plus longs dans le temps et plus coûteux. Cependant il est mieux adapté pour modéliser des fortes déformations et de plus grands écoulements. L'algorithme d'Euler-FCT (Flux-Corrected Transport) optimise le solveur Euler afin de résoudre des problèmes soumis à des écoulements fortement incompressibles ou à de fortes discontinuités. C'est une méthode monotone non-linéaire, qui permet d'intégrer les équations, dont le but est de limiter la diffusion numérique [13].

Après avoir vu les principaux solveurs, il est nécessaire de présenter les principales équations utilisées pour modéliser les matériaux (solides et fluides).

Premièrement, l'air modélisant le milieu environnant est décrit par l'équation d'état des gaz parfaits suivante :

$$P = \frac{nRT}{v} \quad (3.7)$$

Avec P la pression (Pa), n le nombre de moles (mol), V le volume (m³), la constante universelle des gaz parfaits ($8,3145 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$), T la température (K).

Dans notre travail, l'explosif TNT est décrit par l'équation d'état de Johns, Wilkins et Lee qui est la forme d'équation la plus rencontrée en ce qui concerne les produits de détonation :

$$P = A.\left[1 - \frac{w}{R_1.v}\right].e^{-R_1v} + B.\left[1 - \frac{w}{R_2.v}\right].e^{-R_2v} + \frac{w.E.v_0}{v^2} \quad (3.8)$$

où v est le volume spécifique, E (J.kg^{-1}) l'énergie interne spécifique des produits de détonation, $v_0 = 1/\rho_0$ et A , B , R_1 , R_2 , w sont des constantes ajustables.

Pour l'explosif TNT, on a $A = 3,7377 * 10^8 \text{ kPa}$; $B = 3,7471 * 10^6 \text{ kPa}$;

$R_1 = 4,15$; $R_2 = 0,90$; $w = 0,35$

Et $\rho_0 = 1,63 \text{ g/cm}^3$. Ici v est exprimé en cm^3 / g et P en Pa.

Le comportement structurel d'un matériau est régi par des conditions physiques regroupées sous formes d'équations fondamentales décrivant ce comportement dynamique. Ces équations sont les suivantes [13] :

- Conservation de la masse .
- Conservation de l'énergie.
- Conservation de la quantité de mouvement.

3.4 La simulation de la déformation des dépôts

Autodyn permet de simuler la propagation d'une onde de choc et la déformation consécutives à la détonation d'une charge solide de TNT, en milieu clos, à proximité des merlons.

3.4.1 Les étapes de simulation

Pour simuler la déformation, nous allons passer par ces étapes suivantes :

- Sélectionner les matériaux à utiliser dans la bibliothèque de données d'ingénierie native d'ANSYS Workbench.
- Choisir la méthode de résolution (Lagrange/Euler).
- Générer la géométrie dans le logiciel ANSYS-SpaceClaim .
- Créer un maillage avec des tailles d'éléments raisonnablement uniformes qui convient parfaitement à une analyse explicite.

- Créer et Ajuster les spécifications de contact charge/Surface avec l'outil d'interaction du corps.
- Définir les points de détonations .

3.4.2 Résultats et discussion

La réponse totale non linéaire de charge-déformation est montrée sur les Figures 3.10 à 3.14 .

Les figures 3.10 et 3.11 présentent les résultats obtenus suite aux explosions $M_{min} = 50000kg$ et $M_{max} = 96000kg$ dans un Igloo à double compartiments,chaque compartiment contient 1/2 de la charge totale .

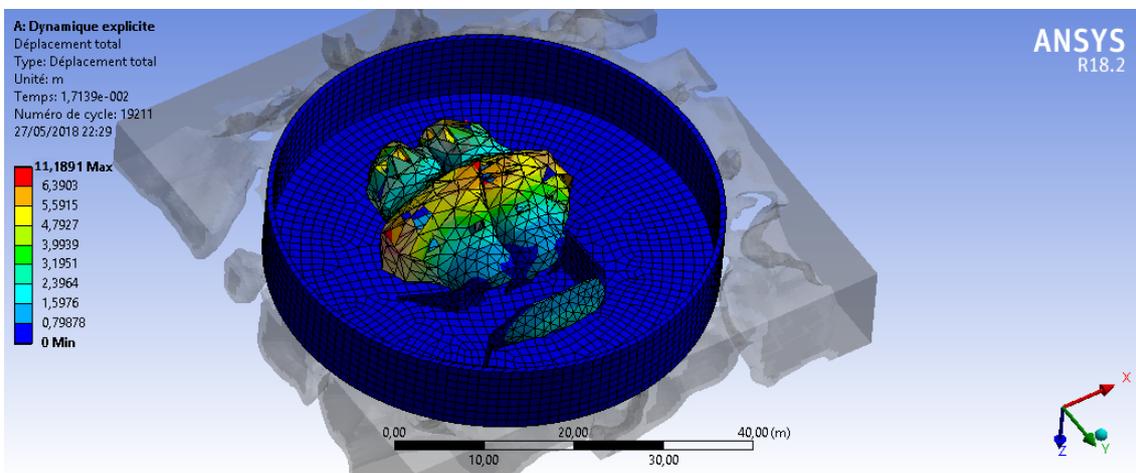


FIGURE 3.10: Explosion de 50 T -Igloo à double baies-.

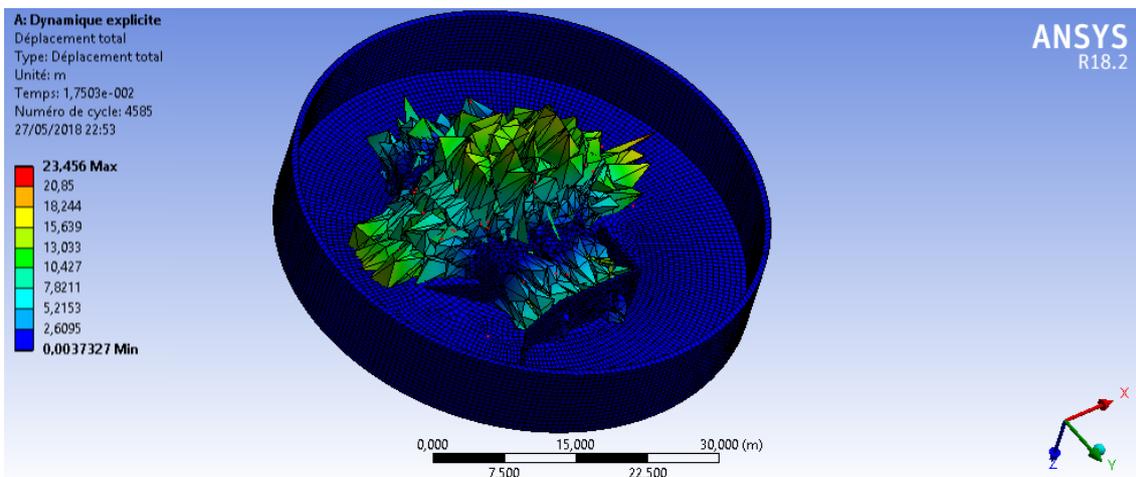


FIGURE 3.11: Explosion de 96 T -Igloo à double baies-.

Les Figures 3.12 et 3.13 présentent les résultats consécutives de la détonation des différentes masses $Charge_{min} = 50000kg$ et $Charge_{max} = 96000kg$ dans un Igloo à un seul compartiment.

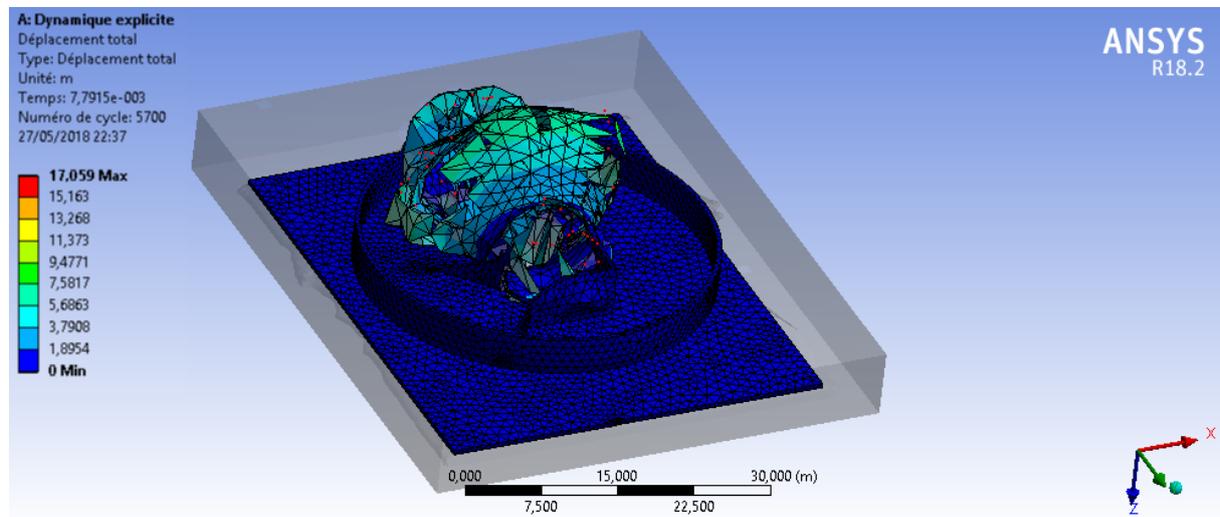


FIGURE 3.12: Explosion de 37 T -Igloo à simple baie-

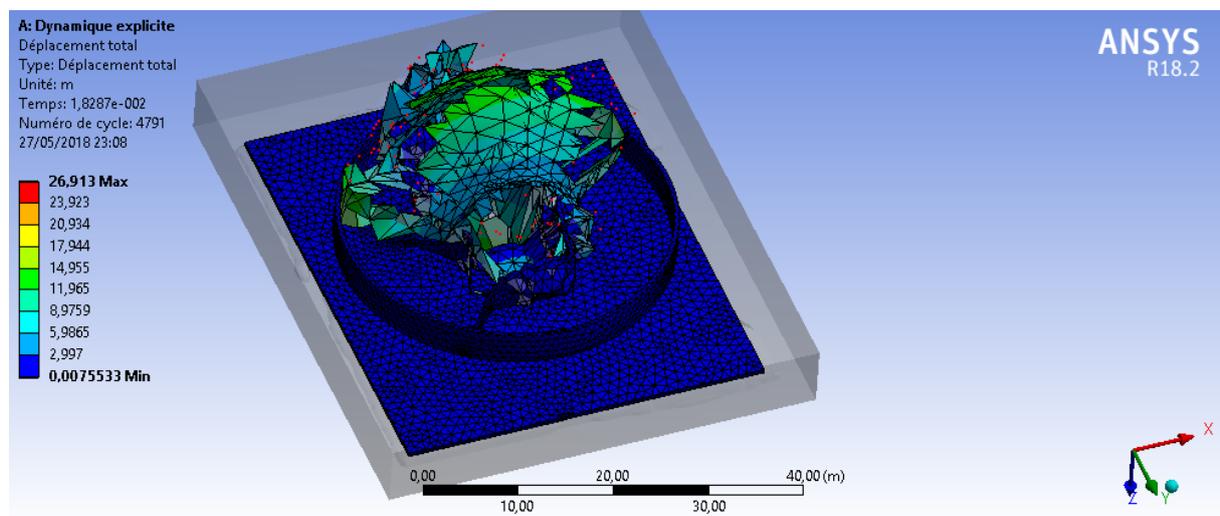


FIGURE 3.13: Explosion de 50 T -Igloo à simple baie-.

Interprétation

- La simulation de la déformation est faite sur une structure en béton 250 MPa sans tenir en compte du recouvrement de terre .
- Les points de détonation sont situés au centre des différentes charges
- Pour un **Igloo à double baies** : la répartition spatiale de déformation montre que

les fragments peuvent atteindre 11 m pour une explosion de 50 T et 23 m pour une détonation de 96 T de charge explosive.

- Pour un **Igloo à simple baie** : la répartition spatiale de déformation indique que les fragments peuvent atteindre 17 m pour une explosion de 37 T et 26 m pour une détonation de 52 T de charge explosive.

De ces résultats, on peut constater que le dommage subi par la structure à simple baie pour des charge de 52 T (26 m) et 37 T est plus conséquent que celui résultant des explosions de 96 T (23 m) et 50 T dans l'igloo à double baies.

Cette différence est due à la répartition des charges dans les deux compartiments pour les igloos à double baies, c.à.d les fragments issues d'une explosion de 50 T dans ce dernier résultent de deux explosions de 25 T (deux points de détonation).

les deux structures contribuent à une baisse significative de la pression totale mais engendrent l'apparition des pics de surpressions réfléchies qui participent grandement à la destruction des dépôts .

Cela met en évidence l'importance du confinement que provoque la présence des voutes confectionnées en béton mousse sans armature d'acier pour orienter l'effet de souffle vers le haut.

Il est intéressant de noter que juste avant l'effondrement, des fissures (fissures de compression) apparaissent sur les structures, celles-ci sont dues à la rupture par écrasement dans le béton .

La contrainte maximale appliquée au moment de détonation est de l'ordre de $10^9 Pa$, ce qui est largement plus grand par rapport à la limite d'élasticité de béton et qu'elle entraîne la destruction des dépôts qui ne peuvent plus supporter de charges additionnelles .

les installations et les dépôts situés à une distance supérieur 26 m ne seront pas dans la portée des fragments et il n'existera pas un effet domino qui entrainera leurs endommagement et/ou destruction .

3.5 Conclusion

Cette étude nous a permis d'identifier les constituants de la structure (Béton/Acie) et analyser leur comportements vis à vis les différentes charges explosives .

Les simulations numériques de la déformation par le logiciel ANSYS ont permis de façon significative d'étudier la zone de portée des fragments issues de l'explosion et montrer l'importance de présence des chemins de détente et d'orientation des effets de souffles qui permettent de réduire les efforts mécaniques par la structure et contribuent à l'atténuation de la surpression.

Enfin,ce chapitre nous a montré la résistance des dépôts dans les cas les plus défavorables et confirmé les résultats obtenus dans le chapitre précédents pour les distance de séparation et de sécurité.

Chapitre 4

Modélisation et simulation des effets d'explosion

4.1 Introduction

Divers effets physiques se produisent lors d'une explosion et le but du stockage des matières explosives est d'atténuer les effets d'une explosion au cas où elle se produirait. Pour ce faire plusieurs moyens, on énumère : imposer des distances minimales de sécurité (DMS) correctes en fonction de la quantité de matières explosives stockées ; s'assurer du respect des règles sur le mélange de Groupes de Compatibilité (GC) et s'assurer de l'adéquation de la conception du bâtiment de stockage.

La première partie de ce chapitre nous permettrait de modéliser les phénomènes engendrés par la détonation de la charge explosive qui se traduisent, bien entendu, par une variation couplée des champs de pression et de température.

La seconde étape sera réservée à la simulation numérique par MATLAB pour confirmer les résultats obtenus par ANSYS d'une part et faire apparaître les rayons des seuils de suppression d'autre part.

4.2 MODELISATION MATHÉMATIQUE DE L'EXPLOSION ET IMPACT DE L'EXPLOSION SUR LE MILIEU ENVIRONNANT

4.2.1 L'explosion dans l'air

Lors de la détonation de la charge explosive dans un environnement aérien illimité (Fig. 2,3), les produits de détonation, après un certain temps de propagation, atteignent le volume v infinie, qui correspond à la pression de produits de détonation qui tend elle-même vers la pression atmosphérique.

Dans ces conditions, les produits de détonation s'élargissent jusqu'à atteindre un volume qui est de 700 à 1800 fois supérieur au volume de la charge explosive -Figure 4.1-. Dans le cas d'un rayon de charge explosive cylindrique, le rayon R_1 est 30 à 40 fois plus grand que le rayon R_0 [14].

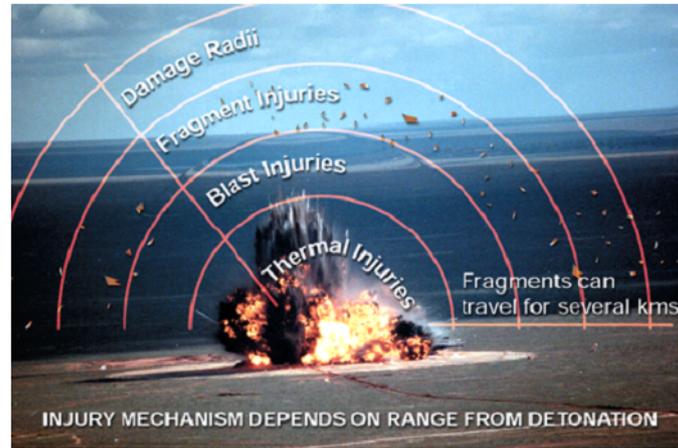


FIGURE 4.1: Les mécanismes provoquant les dommages et les blessures en fonction du rayon de détonation

4.2.2 Paramètres de l'explosion au moment de détonation -Kingery et Bulmash-

Charles Kingery et Gerald Bulmash ont conçu des équations largement admises comme des prédictions techniques en vue de déterminer les paramètres de l'explosion au moment de détonation des grandes quantités allant jusqu'à 400 000 kg .

Les équations sont listées dans des tableaux, dans lesquelles les fonctions présentent les paramètres de souffle opposés à une distance en mètre, pour une charge de TNT de 1 kg créant une explosion aérienne hémisphérique libre, sont montrées en ce qui concerne ce qui suit [15].

- La pression incidente
- L'impulsion incidente
- La pression réfléchie
- L'impulsion réfléchie

Les valeurs numériques des constantes « C » et « K » sont celles pour une charge explosive de 1 kg en équivalent TNT. Les prédictions pour d'autres matières explosives nécessiteront que l'équivalence TNT soit estimée en priorité [15].

TABLE 4.1: Formule polynomiale générale de Kingery et Bulmash

$Y = C_0 + C_1U + C_2U + C_3U + \dots C_nU$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p style="text-align: center;">C0, 1, 2 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">U = K0 + K1T</p> <p style="text-align: center;">K0, 1 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

La pression incidente

L'équation illustrée dans le Tableau 4.1 possède une plage d'application comprise entre 0.05 et 40 m [15].

TABLE 4.2: Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les pressions incidentes

$U = -0.214362789151 + 1.350342499993T$ <p style="text-align: center;">Substituer alors U en ce qui suit :</p> $Y = 2.611368669 + 1.69012801396U + 0.00804973591951U^2$ $+ 0.336743114941U^3 - 0.00516226351334U^4 + 0.08092286196U^5$ $- 0.00478507266747U^6 + 0.00793030472242U^7 + 0.000784469735U^8$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p style="text-align: center;">C0, 1, 2 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">U = K0 + K1T</p> <p style="text-align: center;">K0, 1 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

Impulsion incidente

L'équation suivante n'est uniquement applicable à une zone de terrain de 0.0531 m, autrement dit, la zone immédiatement proche de la charge explosive [15].

TABLE 4.3: Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions incidentes
-1-

$U = -0.234723921354 + 3.24299066475T$ <p>Substituer alors U en ce qui suit :</p> $Y = 2.38830516757 \sim 0.443749377691U + 0.168825414684U^2$ $+ 0.348138030308U^3 - 0.010435192824U^4$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p>C0, 1, 2 etc. = Constante</p> $U = K0 + K1T$ <p>K0, 1 etc. = Constante</p> <p>T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

L'équation suivante est applicable à des zones dans lesquelles l'onde de souffle provenant de l'explosion se déplace (de 0.792 à 40 m)[15].

TABLE 4.4: Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions incidentes
-2-

$U = -1.75305660315 + 0.30629231803T$ <p>Substituer alors U en ce qui suit :</p> $Y = 1.55197227115 \sim 0.40463292088U - 0.0142721946082U^2$ $+ 0.00912366316617U^3 - 0.0006750681404U^4 \sim 0.00800863718901U^5$ $- 0.006750681404U^6 + 0.00152044783382U^7 - 0.0007470265899U^8$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p>C0, 1, 2 etc. = Constante</p> $U = K0 + K1T$ <p>K0, 1 etc. = Constante</p> <p>T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

Pression réfléchie

L'équation suivante a une plage d'application comprise entre 0.05 et 40 m [15].

TABLE 4.5: Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les pressions réfléchies

$U = -0.214362789151 + 1.350342499993T$ <p style="text-align: center;">Substituer alors U en ce qui suit :</p> $Y = 3.22958031387 \cdot 2.21400538997U + 0.035119031446U^2$ $+ 0.657599992109U^3 + 0.0141818951887U^4 + 0.243076636231U^5$ $- 0.0158699803158U^6 + 0.0492741184234U^7 + 0.00227639644004U^8$ $- 0.0007470265899U^9$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p style="text-align: center;">C0, 1, 2 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">U = K0 + K1T</p> <p style="text-align: center;">K0, 1 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

Impulsion réfléchie

L'équation suivante a une plage d'application comprise entre 0.05 et 40 m [15].

TABLE 4.6: Formule polynomiale de Kingery et Bulmash pour les impulsions réfléchies

$U = 0.204004553231 + 1.37882996018T$ <p style="text-align: center;">Substituer alors U en ce qui suit :</p> $Y = 2.5587560396 \cdot 0.90311888609U + 0.101771877942U^2$ $+ 0.0242139751146U^3$
<p>Y = Logarithme commun du paramètre de l'effet de souffle (métrique) (Pression ou impulsion)</p> <p style="text-align: center;">C0, 1, 2 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">U = K0 + K1T</p> <p style="text-align: center;">K0, 1 etc. = Constante</p> <p style="text-align: center;">T = Logarithme commun de la distance (m)</p>

4.2.3 Onde de choc dans l'air

Après la détonation, les produits gazeux commencent à se propager rapidement, en refoulant l'air environnant, ce qui cause l'apparition et la propagation de l'onde de choc. A une distance de 10 à 12 diamètres de chargement, l'expansion du gaz s'arrête. La seule manière de transmettre l'énergie d'explosion se fait par l'intermédiaire de l'onde de choc [16].

Dans des conditions idéales, une onde de choc se propage par l'air radialement à partir du point de détonation où la vitesse est supérieure à la vitesse du son.

L'énergie du front de l'onde de choc est uniformément répartie sur la surface sphérique dont le rayon augmente avec la vitesse de l'onde de choc.

L'effet destructeur se manifeste sur de plus grandes distances pour les bâtiments aux grandes surfaces, car dans leur cas, même une faible surpression de l'onde de choc provoque l'apparition de grandes forces [16].

La surpression a un facteur très important de l'effet destructeur qui est la durée de cette dernière, c'est-à-dire l'impulsion destructrice totale (surface sous la courbe de pression).

Surpression et Température au front de l'onde de choc

La caractéristique la plus importante de l'onde de choc est la surpression dans le front d'onde de choc, dont la valeur dépend du type de la masse explosive et la distance de l'explosion. Sur la base des nombreuses données expérimentales, Sadovsky a donné la formule empirique suivante (4.1) pour le calcul de la surpression au front de l'onde de choc aérienne [17] :

$$\Delta p = k_1 \frac{Q^{1/3}}{r} + k_2 \frac{Q^{2/3}}{r^2} + k_3 \frac{Q}{r^3} \quad (4.1)$$

Où : Q - masse de la charge explosive (kg), r- distance du centre de l'explosion (m), k_1, k_2, k_3 sont les coefficients empiriques qui dépendent du type de la charge explosive.

Pour le TNT et des explosifs de puissance moyenne, dans le cas d'une explosion de la charge qui est entourée par de l'air, les coefficients empiriques sont : $k_1 = 0,84; k_2 = 2,7; k_3 = 7$. Si une explosion se produit sur la surface, une onde de choc se propage dans l'air sous la forme d'un hémisphère (deux fois moins de place pour l'expansion des produits de détonation) et la surpression deux fois plus loin que l'explosion dans l'air. Dans ce cas, les coefficients ont les valeurs suivantes : $k_1 = 1,1; k_2 = 4,3; k_3 = 14$. *Sur la base de l'expression ci-dessus* [17]

La théorie et les expériences montrent que dans l'air, après l'onde de compression, vient l'onde de dilution. Dans une onde de compression, les valeurs de pression, de densité

et de température de l'air sont plus élevées que la même valeur dans l'air qui n'a pas encore été touché par une onde de choc. Dans une onde de dilution, ces valeurs sont inférieures à la valeur dans une atmosphère non perturbée. L'effet de l'explosion à grandes distances est obtenu grâce au mouvement de l'onde de compression, et de l'onde de dilution [18].

la théorie des ondes de souffle montre que la Température en front d'onde de choc ondes peut être exprimés en fonction de la surpression avec T en K, la surpression ΔP en bar)[17]

$$T = 288. \frac{(1 + \Delta P)(7 + \Delta P)}{(7 + 6.\Delta P)} \quad (4.2)$$

Temps de l'effet et impulsion de l'onde de choc

Sur la courbe de la variation de la pression dans l'onde de choc, on peut observer une zone d'augmentation de pression ou une phase positive (+) et une zone de sous-pression ou une phase négative (-) (Figure 4.2). La dimension spatiale de la zone de surpression est appelée longueur de l'onde de choc. Elle est beaucoup plus petite que la longueur de la zone de sous-pression. La durée de la phase positive est appelée la période (duré) de l'onde de choc[17].

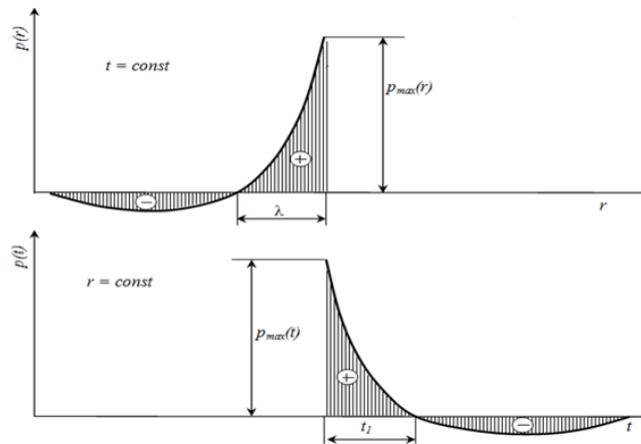


FIGURE 4.2: Evolution de la surpression dans l'onde de choc avec la distance et le temps.

L'expression (4.3) a été déterminée afin de calculer le temps de l'effet de l'onde de choc τ , obtenu en quelques secondes [17] :

$$\tau = 0,0015 \sqrt[6]{q} \sqrt{r} \quad (4.3)$$

Où : q- masse de la charge explosive (kg), r- distance du lieu de l'explosion en (m).

Avec une certaine approximation il peut être considéré que [17] :

$$\tau = \frac{r}{2c} \sqrt[6]{\frac{q}{r^3}} \quad (4.4)$$

Où c - vitesse du son.

La valeur r/c est approximativement égale au temps de l'arrivée de l'onde de choc à partir du lieu de l'explosion jusqu'au point observé dans l'espace [17].

le temps approximatif de l'effet de la surpression représente la moitié du temps nécessaire à l'onde de choc pour parcourir le trajet à partir du lieu de l'explosion jusqu'au point donné [17].

La valeur de surpression à un moment t après le passage du front de l'onde de choc $p(t)$ peut être déterminé par la relation (4.5) [17] :

$$p(t) = \Delta p \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.5)$$

La valeur d'impulsion de l'onde de choc peut être calculer par le biais de la relation de la pression en fonction du temps (4.6) déterminée expérimentalement (surface sous la courbe $p(t)dt$ (Figure 4.2) ou peut être calculée si la valeur de l'onde de choc de surpression Δp en fonction du temps t [17] :

$$I = \int p(t)dt \quad (4.6)$$

Les objets construits différemment opposent des résistances différentes par rapport à l'impulsion de l'effet destructeur. La pratique a montré que les objets solides et légers exigent une grande surpression, mais pas une grande impulsion, soit une surpression de courte durée tandis que des structures lourdes, mais relativement plus faibles (murs) nécessitent pour la démolition une grande impulsion (durée de surpression plus longue) et une surpression qui n'est pas particulièrement grande [18].

Vitesse de l'onde de choc

Plus que la pression négative est grande dans le front d'onde de choc, plus sa vitesse dépasse la vitesse du son. Sur la base de la théorie hydrodynamique, l'expression suivante (4.7) a été déterminée pour le calcul de la vitesse de l'onde de choc [19] :

$$D_{UT} = c \sqrt{1 + 0.83 \frac{\Delta p}{p_0}} \quad (4.7)$$

Où : c - vitesse du son dans l'air (m/s), p_0 - pression atmosphérique. La vitesse du son dépend de la température et peut s'exprimer de la manière suivante [19] :

$$c = 20.1 \sqrt{T} \quad (4.8)$$

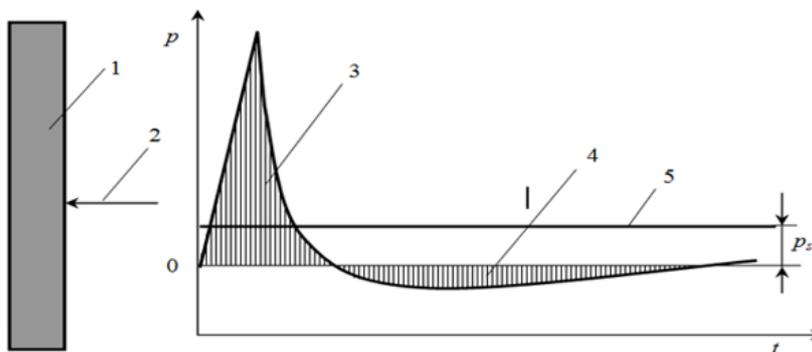
Où : T – température (K). La vitesse de l'onde de choc diminue continuellement et approche progressivement à la vitesse du son.

Réflexion de l'onde de choc

Très souvent, l'onde de choc aérienne peut rencontrer divers obstacles. Dans le cas où l'obstacle est suffisamment solide, une réflexion de l'onde de choc et une augmentation de la pression devient nécessaire. Pour ce faire, dans le cas d'une onde faible dans laquelle Δp est inférieur à p_0 , la pression augmente environ deux fois, et avec des ondes de choc plus fortes, la surpression dans les ondes réfléchies peuvent augmenter plus d'une fois[20]. La valeur de la surpression au front de l'onde de choc peut être calculée en utilisant l'expression (5.9) [19] :

$$\Delta p_R = \Delta p \left(2 + \frac{6}{1 + 7 \frac{p_0}{\Delta p}} \right) \quad (4.9)$$

La réflexion de l'onde de choc est accompagnée d'une phase de pression négative qui dure beaucoup plus longtemps que la phase de surpression (Figure 4.3). Les phases positive et négative de l'onde de choc réfléchi ont un effet fortement destructeur. Par conséquent, l'impulsion totale de la pression de l'onde de choc est égale à la somme des impulsions des phases positive et négative de choc, qui peut être identifié avec l'impulsion de la pression statique équivalente (p_s).



1- obstacle ; 2- sens du mouvement de l'onde de choc ; 3- phase de surpression ; 4- phase de sous-pression ; 5- pression statique équivalente.

FIGURE 4.3: Evolution de pression avec le temps pour l'onde de choc réfléchi.

Les phases positive et négative de l'onde de choc réfléchi ont un effet fortement destructeur. Ainsi, l'impulsion totale de la pression de l'onde de choc est égale à la somme des impulsions des phases positive et négative.

4.2.4 Impact de l'explosion sur le sol

La détonation d'un explosif dans le sol est caractérisée par la formation d'une onde de choc qui comprime les particules du terrain environnant et se propage radialement dans le sol.

Les zones de destruction de sol

A une courte distance du centre de l'explosion, un déplacement partiel des particules de sol ou un effondrement surviennent. Trois zones caractéristiques pourraient être distinguées suite à une explosion (Figure 4.4) [18] : A - zone de compression, B - et la zone de démolition C - zone de décombres.

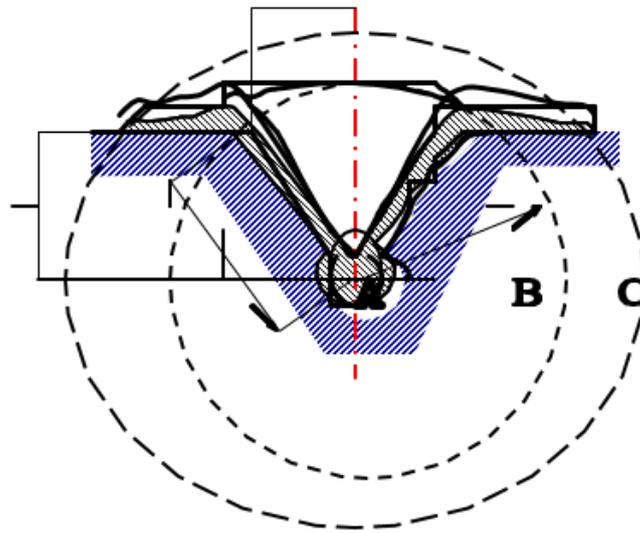


FIGURE 4.4: Zones de l'explosion souterraine.

Dans la zone de compression, les produits gazeux de la détonation ont la plus forte élasticité et l'environnement dans cette zone est brisé et les particules sont refoulées en dehors de la zone. La zone de compression comprend un petit volume immédiatement autour de la charge qu'il a explosée et de ce fait, elle n'a pas de signification pratique particulière. La zone de destruction est caractérisée par la rupture du lien entre les particules de l'environnement, tandis que dans la zone de décombres l'onde de choc provoque seulement un mouvement ondulatoire. [18].

D'un point de vue pratique, la plus importante est la zone de démolition dont le rayon peut être approximativement défini par la formule suivante :

$$R_r = K_r(m_e)^{1/3} \quad (4.10)$$

Où : kr – coefficient qui caractérise le milieu (Tableau 4.7), m_e – masse de la charge explosive.

TABLE 4.7: Coefficient qui caractérise le milieu.

-	milieu	kr
1	Terre meuble	1,40
2	Terre en friche	1,07
3	Sable	1,00–1,04
5	Argile avec sable	0,96
6	Calcaire et grès	0,92

La zone de décombres n'a pas d'effet pratique dans la démolition des fortifications défensives en raison de leur grande endurance. Cette zone joue un rôle important dans la destruction des installations urbaines avec l'utilisation de projectiles destructeurs de gros calibre. Lors de l'explosion du missile dans le sol, après une certaine percée, l'effet destructeur se manifeste par une éjection du matériau du sol en direction de la moins résistante [18].

L'évaluation quantitative de l'effet destructeur est faite sur la base des dimensions du cratère. Il existe plusieurs méthodes de calcul des dimensions du cratère. La méthode présentée ci-dessous (4.11) est une approche pratique, acceptable du point de vue de l'ingénierie [18].

Il faut dire que l'ensemble de ces méthodes de calcul est basé sur des observations enregistrées dans de nombreuses études expérimentales .

La distance L_k du centre de l'explosion jusqu'au bord du cratère peut être calculé à l'aide de la formule (4.11) [20] :

$$L_k = C_k \left(\frac{m_e}{K} \right)^{1/3} \quad (4.11)$$

Où : C_k – coefficient qui dépend de la distance h du lieu de la détonation de la surface du sol et de la masse de la charge explosive, m_e – masse de la charge explosive, K – coefficient qui dépend de la nature du sol [20].

$$C_k = \left(\frac{1}{h} \right) \left(\frac{m_e}{K} \right)^{1/3} \quad (4.12)$$

Le rapport L_k/h détermine le caractère du cratère, ainsi :

- Pour $Lk/h > 1,25$ cratère formé dans lequel reste une petite partie de l'environnement détruit ;
- Pour $Lk/h < 1,1$ cratère est rempli et l'environnement ravagé (du cratère à l'intérieur) ;
- Pour $Lk/h < 1,0$, on obtient donc. camouflage - produits gazeux de la détonation de l'engin n'a pas réussi à jeter un environnement dévasté et pour créer un cratère sur la surface.

Mouvement sismique

Lors de l'explosion des grandes charges d'explosifs et suite à la propagation de l'onde de choc à une distance relativement grande du site de l'explosion, des mouvements sismiques plus ou moins importants se produisent (tremblements de terre) qui peuvent causer des dommages à divers bâtiments et installations industrielles environnantes. [20].

Ce type d'action est appelée une explosion de l'effet sismique. La connaissance des effets de l'explosion de l'action sismique est de grande importance du point de vue pratique [20].

Les effets de l'action sismique dépendent principalement de la nature de l'environnement dans lequel l'onde de choc se manifeste et des caractéristiques du sol sur lequel les autorités ont construit ces bâtiments et ces installations.

Dans le cas où la quantité de la charge explosive est de l'ordre de centaines de tonnes, le rayon des zones sismiques dangereuses (R) peut être calculé en utilisant l'expression empirique suivante [20] :

$$R = 116q^{3/8} \quad (4.13)$$

Dans l'expression (5.13) taille q en tonnes, et R est en mètres. Le déplacement de l'environnement en cas de telles explosions Δl , à une distance l du centre de l'explosion, est calculé en utilisant l'expression (5.14) :

$$\Delta l = 34 \frac{q^{3/4}}{l^2} \quad (4.14)$$

La valeur Δl calculée (en mètres) est évaluée en comparaison avec les valeurs des mouvements du sol lors des séismes, indiqués dans le Tableau 5.8 selon les normes internationales.

TABLE 4.8: Mouvement du sol en fonction de la puissance du séisme.

Puissance, niveau	Séisme	Dl (m)
1	Imperceptible	-
2	Très faible	-
3	Faible	-
4	Modéré	< 0,05
5	Assez puissant	0,05-0,10
6	Puissant	0,11-0,20
7	Très puissant	0,21-0,40
8	Dévastateur	0,41-0,80
9	Fortement dévastateur	0,81-1,60
10	Destructeur	1,61-3,20
11	Catastrophique	> 3,2
12	Totalement catastrophique	» 3,2

Il faut prendre en considération que lors des explosions, seules des impulsions intensives sont obtenues, et qu'il n'y a pas de vibrations aux fréquences différentes [20].

4.3 SIMULATION NUMERIQUE DE LA DETONATION SUPERFICIELLE PAR LA METHODE ANALYTIQUE

La simulation numérique de la détonation superficielle et le calcul des paramètres de l'effet de souffle sur le milieu environnant ont été faites sur la base des modèles physiques présentées dans la première partie de ce chapitre en utilisant le Logiciel Matlab.

4.3.1 Caractéristiques de l'explosion au moment de détonation

L'application utilisée est disponible en accès libre sur le site internet d'IATG - International Ammunition Technical Guidelines- le résultats illustrés ci-dessous (Tableau 4.9 4.10 4.11) sont calculés à une distance de 2 m c.à.d proche de la charge et près du moment de détonation

TABLE 4.9: Explosion de 30 000 kg.

La Quantité de TNT mise en jeu		30 000 kg	
La pression incidente (kPa)	29408.22	L'impulsion incidente (kPa-ms)	26036.23
La pression réfléchié(kPa)	345179.01	L'impulsion réfléchié(kPa-ms)	731957.39
Temps d'arrivée de l'onde (ms)	0.65	Vélocité au front du choc (m/s)	5156.31

TABLE 4.10: Explosion de 50 000 kg.

La Quantité de TNT mise en jeu		50 000 kg	
La pression incidente (kPa)	35364.04	L'impulsion incidente (kPa-ms)	43724.15
La pression réfléchié(kPa)	423049.16	L'impulsion réfléchié(kPa-ms)	1205804.09
Temps d'arrivée de l'onde (ms)	0.63	Vélocité au front du choc (m/s)	5627.94

TABLE 4.11: Explosion de 92 000 kg.

La Quantité de TNT mise en jeu		92 000 kg	
La pression incidente (kPa)	43284.77	L'impulsion incidente (kPa-ms)	80874.46
La pression réfléchié(kPa)	531878.14	L'impulsion réfléchié(kPa-ms)	2217511.88
Temps d'arrivée de l'onde (ms)	0.62	Vélocité au front du choc (m/s)	6221.32

Lors de la réflexion d'une onde de choc puissante contre un obstacle immobile massif, la pression et l'impulsion peuvent monter jusqu'à 10 fois les valeurs incidentes provoquant donc un effet fortement destructeur.

4.3.2 Surpression et température de l'air dans l'onde de choc en fonction de la distance

Il est intéressant de bien différencier les termes « onde de souffle » et « onde de choc ». En effet, le premier désigne l'onde de choc aérienne consécutive à la détonation d'une charge explosive et cette dénomination est due au vent fort qui accompagne l'onde et qui est ressenti par un observateur immobile lorsque l'onde passe. Le terme « onde de choc » décrit de façon plus générale une onde de pression avec un front raide.

Pour une onde de choc radiale, la variation de surpression et de température dans l'air en fonction de la distance est représenté aux Figures 4.5 et 4.6. Les masses de charge explosive qui détonaient en surface du sol sont $m_1 = 30000\text{kg}$, $m_2 = 50000\text{kg}$, $m_3 = 70000\text{kg}$, $m_4 = 96000\text{kg}$.

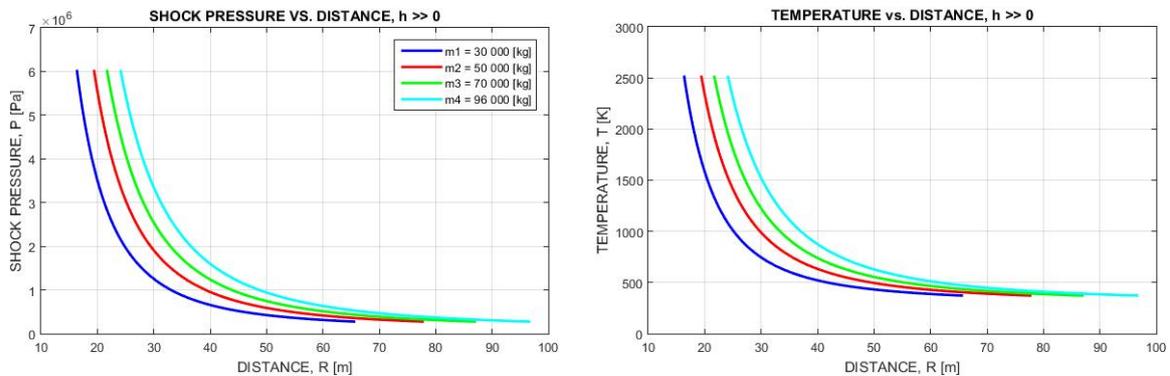


FIGURE 4.5: Variation de la surpression dans l'onde de choc en fonction de la distance du centre de l'explosion. FIGURE 4.6: Variation de la température de l'air dans l'onde de choc en fonction de la distance du centre l'explosion.

Interprétation :

Concernant la courbe de la surpression dans l'onde de choc, on remarque que cette variation présente des valeurs maximales de l'ordre de 10^9 Pa pour les différentes charges qui descendent progressivement jusqu'à ce qu'elles atteignent P_0 (la pression atmosphérique) à une distance de 65 m pour 30000 kg, 78 m pour 50000 kg, 87 m pour 70000 kg et 96 m

pour 96000 kg .

D'autre part, la courbe de variation de température a une allure descendante d'une valeur maximale >2500 K qui diminue progressivement vers la température ambiante à des distances supérieures à 100 m . C'est évident que pour une même distance, la température présente des valeurs différents pour chaque charges qui diminue en fonction de la quantité d'explosif mis en jeu -500 K pour 30000 kg, 620 k pour 50000 kg, 750 k pour 70000 kg et 880 k pour 96000 kg -.

4.3.3 Étude de l'atténuation de l'explosion par les dépôts

Le Directive Technique Internationale sur les Munitions -DTIM 05.20- portant sur Types de bâtiments pour les installations de matières explosives et -DTIM 01.80- (Formulae for ammunition management) proposent des modèles de calculs se basant sur des expériences afin d'étudier les effets de surpression attendus à une distance échelonnée donnée pour **une structure légère ou une charge nue** et **Les structures couvertes de terre qui correspondent aux igloos** Les modèles des distances minimales sont illustrés dans les tableaux -4.12- et -4.13- :

TABLE 4.12: La surpression d'une charge nue ou une structure légère [21]

Quantité kg / Distance m	Surpression Prévues (kPa)
$22.2Q^{1/3}$	5
$14.8Q^{1/3}$	9
$8Q^{1/3}$	21
$3.4Q^{1/3}$	80
$2.4Q^{1/3}$	180

Pour la surpression due à l'explosion d'une charge nue ,les résultats expérimentales et le modèle de **Sadovsky** convergent vers les même valeurs .

Ainsi, nous avons déterminé les valeurs qui correspondent à l'atténuation de surpression dans le dépôts et les comparer avec celles d'une explosion à l'air libre .

TABLE 4.13: Atténuation de surpression - un igloo couvert par terre -[21]

Quantité kg / Distance m	Surpression Prévues (kPa)
$19Q^{1/3}$	5
$14Q^{1/3}$	8
$11Q^{1/3}$	9
$6Q^{1/3}$	21

Dans ce travail nous étudions dans un premier temps les effets de l'explosion de l'équivalent de la charge du dépôt à simple et à double compartiments avant augmentation de la charge soit à 50 000 kg et 30 000 kg puis après l'augmentation de la charge à 96 000 kg et 50 000 kg .

Remarque : Les formules prennent en considération un igloo couvert par terre quelque soit sa forme à simple ou double baies .

TABLE 4.14: Atténuation de surpression associée à une explosion dans l'Igloo semi-enterré

Quantité kg /Distance m	Surpression Prévues (kPa)	30 000 kg	50 000 kg	96 000 kg
$19Q^{1/3}$	5	590.37 m	699.9 m	857.72 m
$14Q^{1/3}$	8	435.01 m	515.7	632.01 m
$11Q^{1/3}$	9	341.79 m	405.24 m	496.57 m
$6Q^{1/3}$	21	186.43 m	221.04 m	270.86 m

Pour estimer la valeur de surpression qui correspond à la plus petite distance mesurée -43 m-(chapitre II-Distances de sécurité), nous avons déterminé la courbe de tendance qui régit ce système à 3 variables (Distance, Quantité, surpression) en fixant la charge à chaque fois .

Les résultats sont illustrés dans les Figures -4.7-, -4.8- et -4.9- .

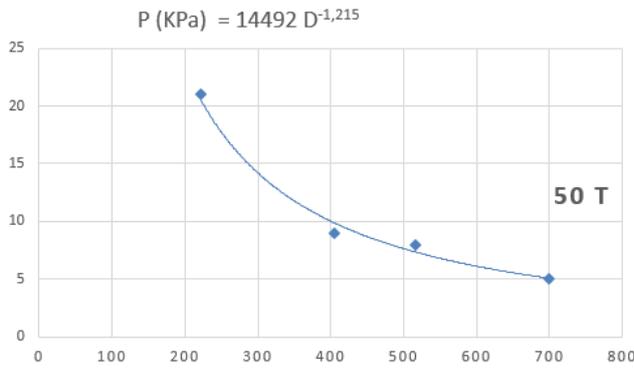


FIGURE 4.7: Surpression en fonction de distance -50 000 kg-

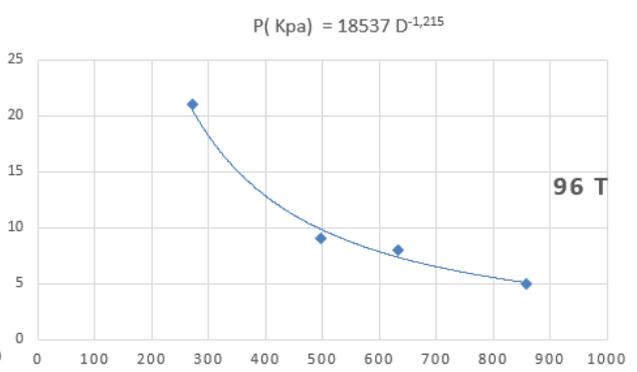


FIGURE 4.8: Surpression en fonction de distance -96 000 kg-

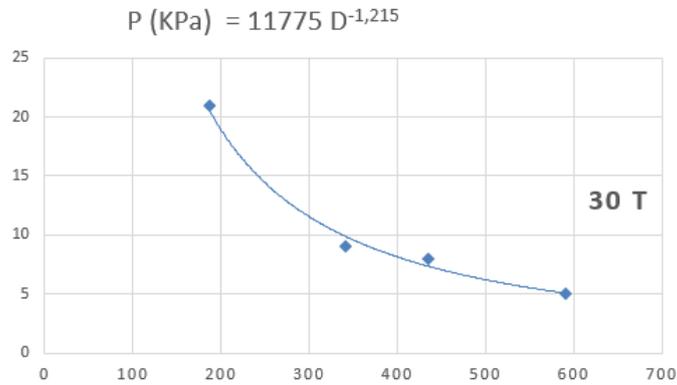


FIGURE 4.9: surpression en fonction de distance -30 000 kg-.

Les valeurs de surpression issus des explosions des différentes charges à une distance de 43 m sont présentées dans le Tableau 4.15 :

TABLE 4.15: la surpression à 43 m associée à une explosion dans Igloo semi-enterré

Quantité kg	L'équation de la courbe	Surpression Prévues à 43 m (bar)
30000	$P(KPa) = 11775D^{-1.215}$	1.2198
50000	$P(KPa) = 14492D^{-1.215}$	1.5012
96000	$P(KPa) = 18537D^{-1.215}$	1.92327

Interprétation Les structures couvertes de terre atténuent la surpression et assurent souvent une protection virtuelle complète contre une onde de choc incidente allant jusqu'à 7 bar alors que la valeur maximale de surpression qui correspond à une explosion en masse de 96 T est de 1.92 bar. Ce qui autorise l'augmentation des stocks tout en évitant l'effet domino .

Les résultats de simulation des explosions à l'air libre et dans les igloos donnant les rayons de surpression sont représentés dans les Figures -4.10-, -4.11- et -4.12- .

Ces représentations nous permettent d'avoir une idée sur la capacité d'atténuation des effets par les igloos. En prenant à titre d'exemple, pour une explosion de 96 000 kg, la valeur de surpression 2 kPa qui correspond à la limite pour les bâtiments vulnérables, peut atteindre un rayon de 2004 m à l'air libre , tandis que si cette explosion aura lieu dans un igloo, le rayon est de 857 m.



FIGURE 4.10: Rayon de surpression à l'air libre et dans le dépôt semi-enterré -30 T-.



FIGURE 4.11: Rayon de surpression à l'air libre et dans le dépôt semi-enterré -50 T-.



FIGURE 4.12: Rayon de surpression à l'air libre et dans le dépôt semi-enterré -96 T-.

4.3.4 Vitesse du son dans l'onde de choc

La variation de la vitesse du son au front de l'onde de choc est représenté dans la Figure 4.13 :

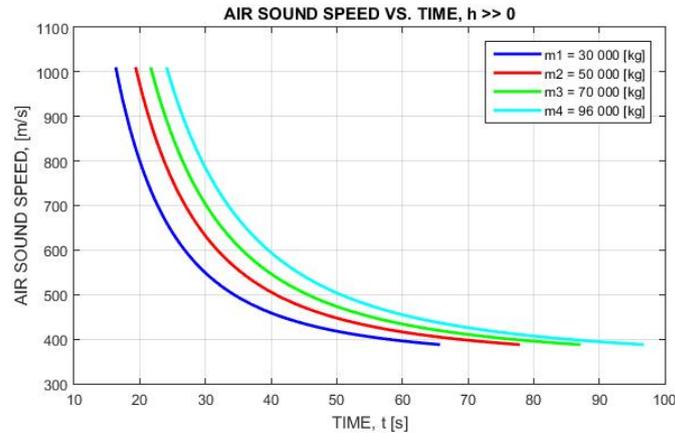


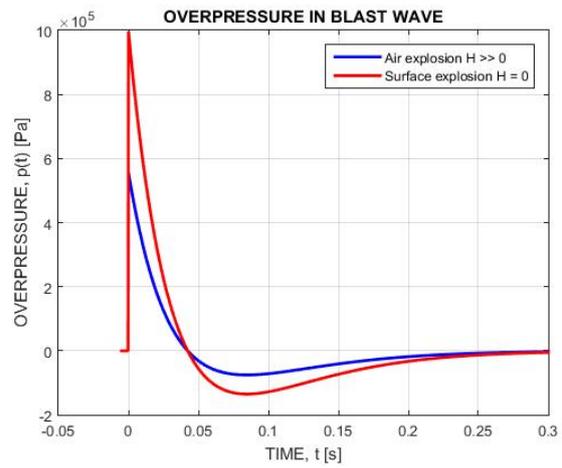
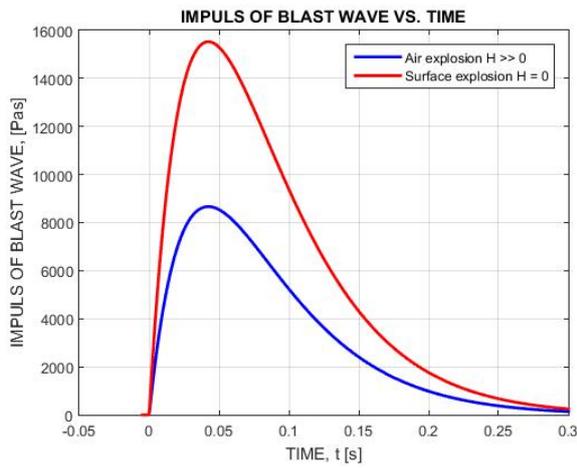
FIGURE 4.13: Variation de la vitesse du son dans l'air au front de l'onde de choc.

Selon les diagrammes, à une distance de $R=10\text{m}$ la vitesse de son dans l'air a une valeur de 1000 m/s pour une charge de 30 T et des valeurs supérieures à 1400 m/s pour les autres quantités de $50, 70, 96\text{ T}$. En s'éloignant du centre de l'explosion la vitesse diminue et atteint une vitesse de $c = 390\text{ m/s}$ à une distance $> 100\text{ m}$, cette vitesse continue sa diminution jusqu'à ($c_0 = 347.05\text{ m/s}$) qui correspond à la vitesse du son dans l'air à 25 C .

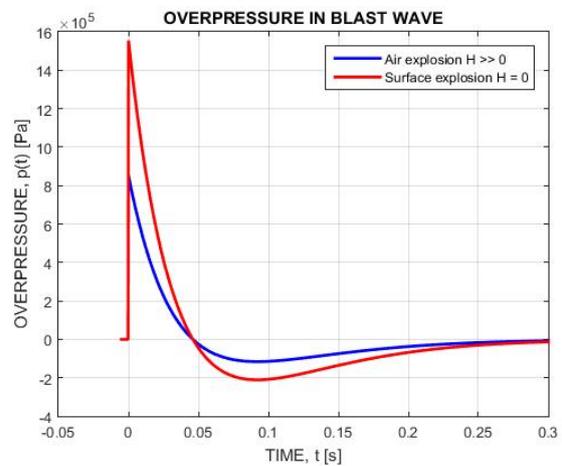
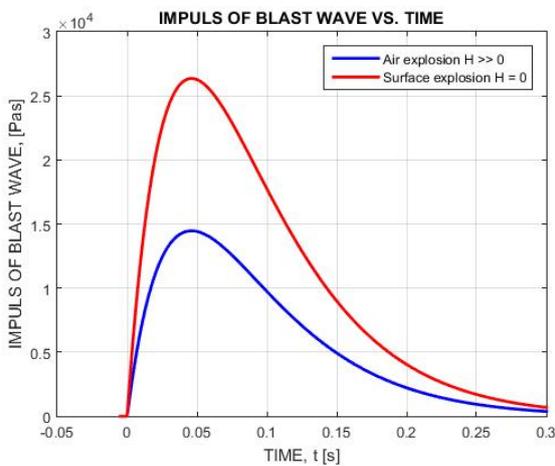
4.3.5 Surpression et impulsion de l'onde de choc en fonction du temps

L'évolution de la surpression et l'impulsion de l'onde de choc dans l'air pour une explosion superficielle sur terre ($H = 0$) et au-dessus du sol ($H \gg 0$) est illustrée dans les diagrammes en parallèle-Figure 4.14-. Cette étude a été faite pour les charges suivantes $30, 50, 96\text{ T}$.

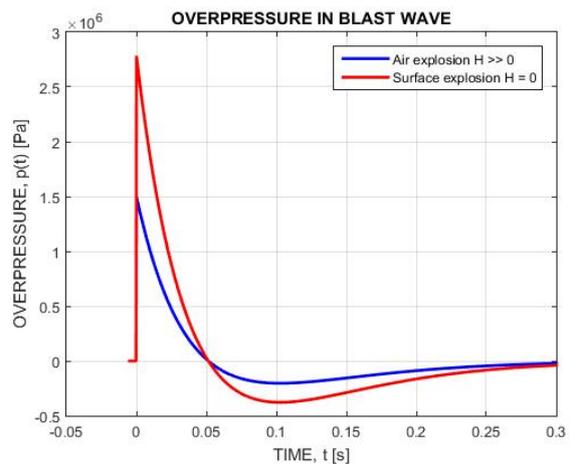
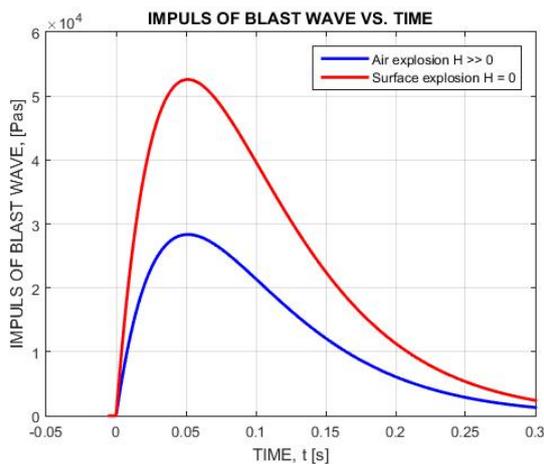
L'onde de choc est un phénomène difficile à étudier par ce qu'il dépend de 4 paramètres la masse, la distance, la pression et le temps. Afin d'avoir une idée sur la variation de pression au cours du temps, il faut simplifier le système en fixant deux variables -la distance et la Masse-. Pour cela on a choisi une cible située à 40 m du centre de l'explosion pour chaque charge.



Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour $m=30 T$ Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour $m=30 T$



Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour $m=50 T$ Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour $m=50 T$



Evolution de l'impulsion spécifique en fonction du temps pour $m=96 T$ Evolution de la surpression dans l'onde de choc en fonction du temps pour $m=96 T$

FIGURE 4.15: Evolution de la pression l'impulsion spécifique dans l'onde de choc en fonction du temps

Interprétation

- L'analyse des diagrammes de la surpression et de l'impulsion pour chaque masse montre que, selon les équations de Sadowski l'évolution de ces derniers à la distance observée sur la surface du sol est plus grande de celle générée dans la détonation de l'OC dans l'air **presque deux fois**.
- L'onde de choc parvient aux cibles (située à 40 m) à l'instant t_0 produisant une montée soudaine en pression jusqu'à des valeurs maximales pour chaque masse (30 T-> 5.5 bar ;50 T-> 8.3 bar ;96 T-> 15 bar) représentant la surpression positive $\Delta P+$.
La pression diminue ensuite jusqu'à un instant $t_0 + t^+$ et représente la détente des gaz choqués. La durée entre les instants t_0 et $t_0 + t^+$ est appelée durée de phase positive $t+$ et la surface sous la courbe d'impulsion positive $I+$.
- L'effet destructeur de la phase positive est reconnu par le rejet des restes des objets détruits dans le sens de l'explosion
- Au-delà de l'instant $t_0 + t^+$ la pression des gaz choqués est inférieure à la pression ambiante, créant ainsi une dépression. La pression continue de diminuer jusqu'à des valeurs minimales $\Delta P-$ puis remonte progressivement jusqu'à atteindre la pression ambiante à l'instant $t_0 + t^+ + t^-$ qui représente le retour à l'équilibre thermodynamique. De même que pour la phase positive, l'aire située entre la courbe de pression et l'abscisse représente l'impulsion négative $\Delta P-$.
- A des distances plus grandes, l'effet de la phase négative se manifeste, et se caractérise par le rejet de bâtiments détruits vers le centre de l'explosion.
- l'impulsion spécifique est la somme de l'impulsion positive et négative.
- Le temps de l'effet de la phase positive de pression est une caractéristique pratique importante de l'onde de choc, car elle a un impact crucial sur les conséquences de l'effet destructeur.
- En augmentant la masse de la charge de 30 à 96 T ,on remarque le prolongement des deux phases et une évolution lente de la surpression (chute $\Delta P+$ et croissance de $\Delta P-$), ce qui, en fin de compte, affecte l'augmentation de l'impulsion spécifique.
- Le temps de la phase positive qui correspond à la charge minimale 30 T est de 0.035 s tandis que pour 90 T est de 0.055 s .L'impulsion spécifique est associée à la fin de la phase positive .
- l'impulsion spécifique associée à la fin de la phase positive pour les deux charges 30 et 96 T sont respectivement 8500 et 29000 Pa.S.

4.3.6 Caractérisation des paramètres de l'explosion sur le sol

La caractérisation des paramètres de l'explosion sur le sol et les effets de l'onde de choc sur un terrain comprend le calcul de type et la taille du cratère résultant ainsi que le mouvement sismique associé. Le calcul a été effectué pour les différentes charges allant de 10 à 100 T.

Rayon de la zone de démolition

La variation de rayon de la zone de démolition R_r en fonction de la quantité d'explosifs est représentée dans la Figure 4.15 ci-dessous :

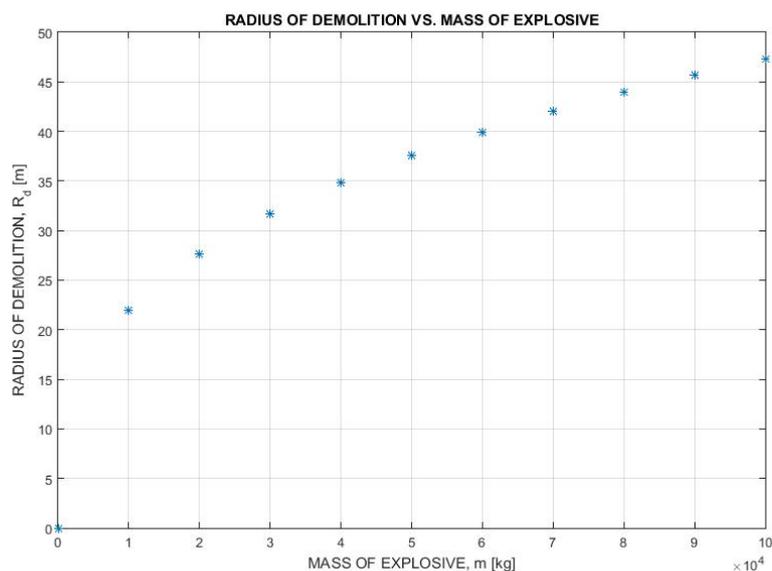


FIGURE 4.16: Rayon de la zone de démolition en fonction de la masse d'explosif.

Il est clair que la valeur de R_r augmente avec l'augmentation de la masse des explosifs. La détonation en masse d'une charge $m_1 = 30$ T entraînera un rayon de destruction dans le sable de $R_r = 32.31$ m et pour la charge la plus grande $m = 96$ T, nous aurons un rayon de $R_r = 47.4$ m.

4.3.7 Mouvement sismique du sol

Les effets sismiques importants se manifestent à des distances relativement grandes du centre de l'explosion à cause des quantités mise en jeu. Une telle analyse est nécessaire dans le cas où le voisinage de marchandises stockées est sensible au choc il en est de même pour les différents réseaux de canalisations .

Rayon de la zone sismique dangereuse en fonction de la masse de la charge explosive

Les variations de rayon de la zone sismique R_c en fonction de la masse de la charge explosive et en fonction de la distance sont illustrés sur la Figure 4.16 suivante :

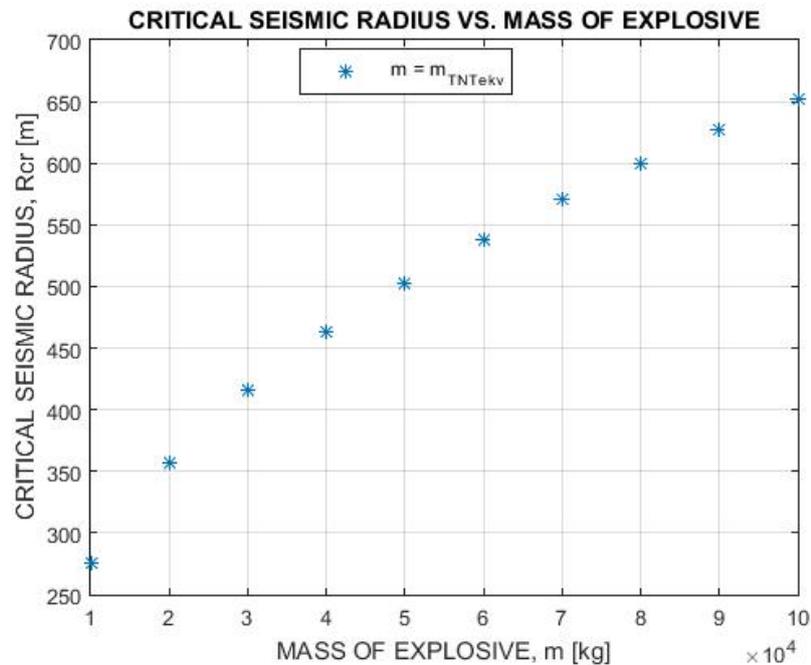


FIGURE 4.17: Rayon de la zone sismique dangereuse en fonction de la masse de la charge explosive

Nous remarquons que le rayon de la zone dangereuse sismique augmente avec l'augmentation de la charge explosive. pour une masse de $m= 30000$ kg, le rayon critique est $R_{cr} = 415.31$ m et pour $m=96000$ kg la valeur est $R_{cr} = 642.23$ m.

Mouvement du sol en fonction de la distance du centre de l'explosion

Le déplacement du sol Δl due à la propagation de l'onde de choc en fonction de la distance du centre d'explosion R est illustrée sur la Figure 4.17 ci-dessous :

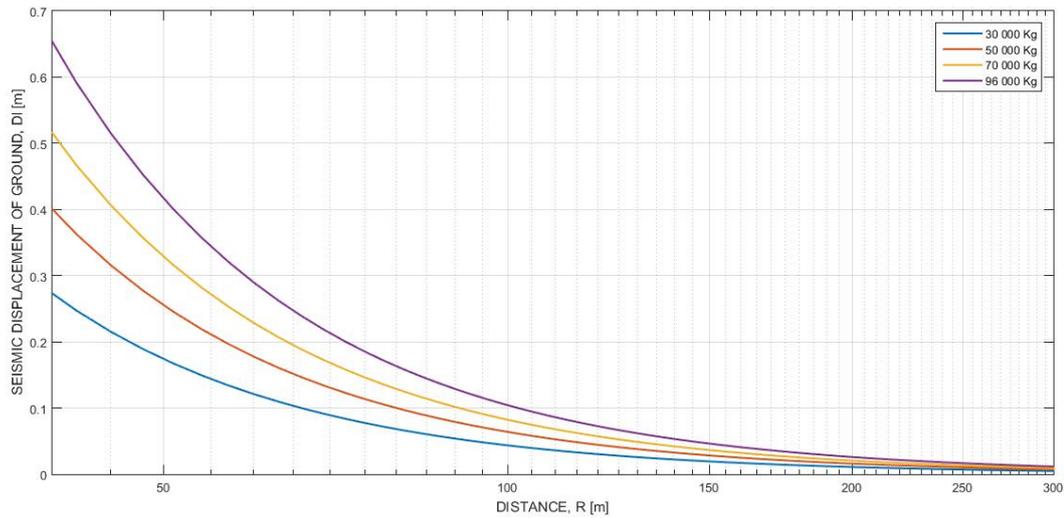


FIGURE 4.18: Déplacement du sol en fonction de la distance du centre de l'explosion.

Le déplacement du sol à une distance donnée augmente proportionnellement avec les charges explosives. Pour $m = 30000$ kg à une distance de 50 m, le mouvement de sol a une valeur $\Delta l = 0,17$ m qui correspond à un séisme puissant (-6- sur l'échelle de Richter) peut causer des dommages significatifs à des édifices mal conçus dans des zones restreintes. Et Pour $m = 96000$ kg à une distance de 50 m, le mouvement de sol a une valeur $\Delta l = 0,41$ m qui correspond à un séisme dévastateur (-8- sur l'échelle de Richter), peut causer des dommages très sévères et majeurs sur tous les édifices.

En s'éloignant du centre de l'explosion, on constate une décroissance de Δl du sol. Cette dernière est due à la diminution de l'intensité des ondes (impulsion) et à l'accélération des particules du sol.

Pour $m = 96000$ kg et $\Delta l = 0.01$ à 100 m .

- À 100 m du centre de l'explosion $\Delta l = 0.1$ qui correspond à un séisme de puissance 5 - Assez puissant .
- À 300 m du centre de l'explosion $\Delta l = 0.01$ qui correspond à un séisme de puissance < 0.05 Modéré.

Ce rayon critique et le mouvement de sol nous permettent de connaître le comportement prévisible des sites proches (Les dépôts) ou lointains (Les installations) sous l'effet des séismes résultants des explosions .

4.4 Conclusion

Cette étude nous a permis de modéliser mathématiquement et simuler numériquement l'onde de souffle et les phénomènes induits par la détonation d'une charge explosive à l'air libre et dans les igloos.

Les résultats numériques obtenus ont été décrits et analysés afin de permettre une étude sécuritaire et valider l'approche méthodologique pour l'augmentation des capacités de stockage des dépôts et la détermination des zones de séparation .

Les simulations numériques ont permis de façon significative l'identification des pics de surpressions (incidentes et réfléchies) ainsi que de mieux comprendre la propagation des ondes de choc au sein même de la structure puis à l'extérieur de celle-ci. Ces résultats ont montré aussi l'existence des zones critiques de démolition de sol et de mouvement sismique .

Enfin, cette partie d'analyse a permis de caractériser et comprendre le comportement de l'onde de choc pour pouvoir le maîtriser.

Conclusion générale

A l'issue de ce travail, en vue de résoudre la problématique portant sur l'augmentation des capacités de stockage de dépôts d'explosifs de classe 1.1, nous avons répondu à trois aspects : sécuritaire, légal et technique.

S'agissant de l'aspect sécuritaire, l'analyse de risque selon la méthode de Kinney et Wiruth nous a conforté dans l'hypothèse de la possibilité de l'augmentation des capacités des dépôts et cela en ayant trouvé une criticité relativement acceptable quant au risque généré par les explosifs stockés au sein des dépôts objets de notre étude.

Quant à la réglementation algérienne, après quelques adaptations de la méthode de Kinney et Wiruth, elle se trouve être tout à fait adaptable aux normes internationales en ce qui concerne des effets de surpression causés par l'explosion, toutefois on lui reproche de ne pas avoir suffisamment cerné les effets radiatifs générés.

Dans ce travail, grâce notamment au Logiciel ANSYS, nous avons pu simuler et modéliser le phénomène étudié et ainsi caractériser de façon très descriptive les effets produits par l'explosion de dépôt et avoir une échelle de grandeur qui se trouve être en parfaite adéquation avec les résultats du modèle empirique de Sadowski calculé par le logiciel Matlab. Grâce aux résultats obtenus, nous avons pu déterminer différents rayons de sécurité (Rayon de destruction d'infrastructure, Rayon des effets létaux et Rayon de blessures légères).

Dans le même élan, nous avons déterminé les capacités effectives des différents dépôts en équivalent TNT, et nous avons proposé une manière d'entreposage des explosifs sur palettes standardisées, mais encore, nous avons donné une configuration d'empilement (Annexe C) uniforme, permettant d'augmenter les stocks des dépôts, tout en respectant les dispositions contenues dans la réglementation en vigueur.

En outre, durant notre étude, nous avons pu détecter certaines lacunes qui portent principalement sur le vieillissement des dépôts. Pour y remédier, il serait souhaitable d'effectuer une étude sur la mémoire du béton ainsi que les conséquences des différents séismes qui se sont produits aux abords du complexe notamment celui d'EL ASNAM -Chlef- survenu en octobre 1980.

Bibliographie

- [1] *Rapport vérial - 1984,*
- [2] *Guide des meilleurs pratiques concernant le transport des munitions -2006,*
- [3] *Guide pour rédiger une étude de sécurité relative à la fabrication et au stockage d'explosifs -2016,*
- [4] *Arrêté interministériel du 10 Août 1993 portant sur les conditions d'isolement des établissements de production et de conservation des substances explosives ,*
- [5] *Support du cours -Béton Armé I TEC185- 2007, MR BARAKA ABDELHAK..*
- [6] *Cours de Béton Armé-Suivant les Règles BAEL 91 Et modifications 99 -2009, PASCAL LEGRAND ; J.M.TCHOUANI NANA,*
- [7] *Etude Numérique (3-D) et Evaluation de l'Intégrité Structurale des Éléments en Béton Armé sous l'action des charges monotones -2011, M.BOUCHELIL LYNDA.*
- [8] *Cisaillement dynamique de murs en béton armé. Modèles simplifiés 2D et 3D,2000, PANAGIOTIS KOTRONIS.*
- [9] *Cours de Béton Armé IUP GCI3 -UJF-Grenoble I-., OLIVIER GAGLIARDINI.*
- [10] *Détermination de ferrailage complet d'une poutre en flexion simple (à l'état limite ultime)., -UJF-GRENOBLE I-.*
- [11] *-ANSYS- Dynamique Explicit.2010, GIANGACOMO LAZZERINI.*
- [12] *ANSYS WORKBENCH Users Guide, 2017., [HTTPS ://WWW.ANSYS.COM/..](https://www.ansys.com/)*
- [13] *ANSYS Theory Reference release 5.6, 1998., BASRA, G., GIBSON, H. AND KIRWAN, B..*
- [14] *Detonation in condensed explosives, The Clarendon Press, Oxford, 1952., TAYLOR J.*
- [15] *Formules pour la gestion des munitions ITIM 01.80 INTERNATIONAL AMMUNITION TECHNICAL GUIDELINES ,2011, BADNU.*
- [16] *Processus explosifs, Belgrade, 2002 , JEREMIĆ, R.*

- [17] *Mesure de surpression dans l'onde de choc aérienne, Rapport technique, Institut technique, Académie militaire, Belgrade, 2012, BAJIĆ, Z.*
- [18] *Blast effects of external explosions. Explosion in Air. Austin, University of Texas Press, 1973., BAKER W.E.*
- [19] *Elements of mathematical phenomenology, Serbian Royal Academy, Print ing by Planeta, Belgrade, 1911, PETROVIĆ, M.*
- [20] *Physique de l'explosion, Belgrade, 1996, STAMATOVIĆ, A.*
- [21] *Types de bâtiments pour les installations de matières explosives DTIM 05.20 - DIRECTIVES TECHNIQUES INTERNATIONALES SUR LES MUNITIONS- ,2011, UN ODA*

ANNEXES

ANNEXE -A- Répartition en groupes de compatibilité et code possibles, de classement des munitions

10

Tableau 2B : Répartition en groupes de compatibilité et codes possibles, de classement des munitions

Désignation du Groupe	Description des matières ou objets du groupe	Division de risque				
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
		codes de classement				
A	Explosif primaire ou d'amorçage c'est-à-dire matière qui, même en petite quantité, détone sous l'action d'une flamme, d'une friction ou d'un léger choc.	1.1A				
B	Objet contenant de l'explosif primaire.	1.1B	1.2B		1.4B	
C	Explosif secondaire déflagrant (à l'exclusion de la poudre noire) ou matière explosible propulsive ou objet contenant une telle matière.	1.1C	1.2C	1.3C	1.4C	
D	Explosif secondaire détonant, ou objet contenant un tel explosif sans moyens propres d'amorçage et sans charges propulsives, ou poudre noire non en vrac en emballage fermé admis au transport.	1.1D	1.2D		1.4D	1.5D
E	Objet contenant un explosif secondaire détonant sans moyens propres d'amorçage avec charges propulsives à l'exception de celles qui contiennent un liquide inflammable (classées en J) et de celles qui contiennent un liquide hypergolique (classées en L).	1.1E	1.2E	1.3E	1.4E	
F	Objet contenant de l'explosif secondaire détonant avec moyens propres d'amorçage et avec ou sans charges propulsives à l'exception de celles qui contiennent un liquide inflammable ou hypergolique	1.1F	1.2F	1.3F	1.4F	
G	Composition pyrotechnique ou objet contenant une telle composition ou objet contenant, avec une autre matière explosible, une composition éclairante, incendiaire, lacrymogène ou fumigène à l'exception de tout objet hydro actif (classé en L) ou contenant du phosphore blanc (classé en H) ou contenant un liquide ou un gel inflammable (classé en NJ)	1.1G	1.2G	1.3G	1.4G	
H	Objet contenant à la fois une matière explosible et du phosphore blanc.		1.2H	1.3H		
J	Objet contenant à la fois une matière explosible et un liquide ou un gel inflammable	1.1J	1.2J	1.3J		
K	Objet contenant à la fois une matière explosible et un agent chimique toxique		1.2K	1.3K		
L	Matière ou objet devant être isolé de tout autre matière ou objet de type différent, c'est-à-dire qui n'aurait pas les mêmes propriétés ou les mêmes composants. Poudre noire en vrac ou en emballage non admis au transport	1.1L	1.2L	1.3L		
S	Matière ou objet emballé ou conçu de façon que tous les effets dus à un fonctionnement accidentel ne présentent qu'un danger mineur et restent intérieurs à l'emballage ou n'affectent que son voisinage immédiat.				1.4S	

ARTICLE 10**Listes de classement**

Les listes de classement des types actuels de munitions conventionnelles et leurs répartitions selon les groupes de compatibilité, sont données par les tableaux 3 et 4 ci-après.

Tableau 3 : Symboles de Classification

Description du produit ou de la munition à classer	Groupe de compatibilité	Classe de stockage
Explosif primaire en vrac.	A	1.1A
Article ou munition contenant un explosif primaire	B	1.1B 1.2B 1.4B
Charge propulsive explosive ou autre explosif secondaire à déflagration ou munition contenant cet explosif	C	1.1C 1.2C 1.3C 1.4C
Explosif détonant secondaire ou poudre noire ou munition contenant un explosif détonant secondaire chacun sans son moyen propre d'amorçage et sans charge propulsive	D	1.1D 1.2D 1.4D
Munition contenant un explosif détonant secondaire, avec son moyen propre d'amorçage, avec charge propulsive.	E	1.1E 1.2E
Munition contenant un explosif détonant secondaire, avec son moyen propre d'amorçage, avec ou sans charge propulsive.	F	1.1F 1.2F 1.4F
Substance pyrotechnique, ou munition contenant une substance pyrotechnique, ou munition contenant à la fois un explosif et une substance éclairante, incendiaire, lacrymogène ou fumigène (autre qu'un dispositif hydro actif ou un dispositif contenant du phosphore blanc, du phosphore ou un liquide ou gel inflammable	G	1.1G 1.2G 1.3G 1.4G
Munition contenant à la fois un explosif et du phosphore blanc.	H	1.2H 1.3H
Munition contenant à la fois un explosif et un liquide ou gel inflammable	J	1.3J
Munition contenant à la fois un explosif et un agent chimique toxique	K	1.2K 1.3K
Munition contenant un explosif et présentant un risque spécial exigeant l'isolation de chaque type.	L	1.1L 1.2L 1.3L
Munition dont l'emballage ou le modèle sont tels que tout effet explosif, pendant le stockage ou le transport, est limité à l'emballage, sauf lorsqu'un incendie extérieur a endommagé cet emballage.	S	1.4S

ANNEXE -B- Arrêté interministériel du 10 août 1993 portant conditions d'isolement des établissements de production ou de conservation des substances explosives

27 Dhou El Kaada 1414
8 mai 1994

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 28

3

DECISIONS INDIVIDUELLES

Décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994 portant nomination d'un ambassadeur extraordinaire et plénipotentiaire de la République algérienne démocratique et populaire.

Par décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994, M. M'Hamed Saïdi est nommé à compter du 1er avril 1994, ambassadeur extraordinaire et plénipotentiaire de la République algérienne démocratique et populaire auprès de la Grande Jamahiriya arabe libyenne populaire et socialiste à Tripoli.

Décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994 portant nomination d'un sous-directeur au ministère des affaires étrangères.

Par décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994, M. Belkacem Touati est nommé à compter du 5 janvier 1994, sous-directeur du Sahel, au ministère des affaires étrangères.

Décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994 mettant fin aux fonctions d'un sous-directeur au ministère des affaires étrangères.

Par décret présidentiel du 16 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 27 avril 1994, il est mis fin, à compter du 29 mars 1994, aux fonctions de sous-directeur du Sahel au ministère des affaires étrangères, exercées par M. Belkacem Touati, décédé.

Décret exécutif du 14 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 25 avril 1994 mettant fin aux fonctions du directeur de la vie associative et des relations publiques à l'ex-ministère de l'intérieur et des collectivités locales.

Par décret exécutif du 14 Dhou El Kaada 1414 correspondant au 25 avril 1994, il est mis fin aux fonctions de directeur de la vie associative et des relations publiques à l'ex-ministère de l'intérieur et des collectivités locales, exercées par M. Zoubir Sifi, appelé à exercer une autre fonction.

ARRETES, DECISIONS ET AVIS

MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DE L'ENERGIE

Arrêté interministériel du 10 août 1993 portant conditions d'isolement des établissements de production ou de conservation des substances explosives.

Le ministre de l'industrie et des mines ;
Le ministre de la défense nationale ;
Le ministre de l'intérieur et des collectivités locales ;
Le secrétaire d'Etat à la recherche scientifique ;

Vu le décret présidentiel n° 90-198 du 30 juin 1990 portant réglementation des substances explosives ;

Arrêtent :

Article 1er. — Conformément aux articles 8 et 11 du décret présidentiel n° 90-198 du 30 juin 1990 portant

réglementation des substances explosives, le présent arrêté fixe les conditions d'isolement des établissements de production ou de conservation des substances explosives.

Art. 2. — Au sens du présent arrêté on entend par :

* **Local pyrotechnique** : le local pouvant contenir des matières et objets explosives ;

* **Enceinte pyrotechnique** : la partie d'un établissement visé à l'article 1er ci dessus, comprenant les dépôts, les ateliers de fabrication, de chargement, de conditionnement, d'étude ou d'expérimentation des matières et objets explosibles et leurs magasins de service ;

* **Dépôts de conservation** : le local, le bâtiment, l'emplacement ou le véhicule en stationnement utilisés pour conserver les matières et objets explosibles ;

* **Risque pyrotechnique** : le risque présenté par les matières et objets explosibles lors de leur décomposition fonctionnelle ou accidentelle ;

* **Accident pyrotechnique** : toute explosion, combustion ou décomposition de matières ou objets explosibles ne résultant pas d'un fonctionnement normal de l'installation où elle se produit et susceptible de causer des dommages aux personnes et des dégâts aux biens.

Art. 3. — Les distances d'isolement varient en fonction de la nature et de la quantité des substances explosives en cause, du type d'opérations effectuées sur ces substances et de l'efficacité des dispositifs de protection interposés.

Ces distances dépendent de la gravité des effets de l'accident pyrotechnique ainsi que de la probabilité d'un tel accident.

Art. 4. — A l'intérieur de la section dangereuse citée à l'article 9 du décret présidentiel n° 90-198 du 30 juin 1990 susvisé, toute charge des substances explosives se trouvant dans chaque emplacement de travail situé en plein air ou dans un local isolé ou faisant partie d'un atelier, dans chaque dépôt ou magasin, cette dite charge est à l'origine de zones dangereuses.

Ces zones dangereuses comprennent cinq (5) catégories, classées suivant la gravité probable des dangers qu'elles présentent pour les personnes et les biens.

DESIGNATION DE LA ZONE	DOMMAGES PREVISIBLES AUX PERSONNES	DEGÂTS PREVISIBLES AUX BIENS
Z 1	Blessures mortelles dans plus de 50 % des cas	Dégâts très graves
Z 2	Blessures graves pouvant être mortelles	Dégâts importants
Z 3	Blessures	Dégâts moyens et légers
Z 4	Possibilités de blessures	Dégâts légers
Z 5	Très faible possibilité de blessures légères	Dégâts très légers

Art. 5. — L'étendue des zones de danger dépend essentiellement de la configuration du terrain, des moyens mis en place et de la nature et de la division du risque des substances explosives qui leur donnent naissance.

Art. 6. — Les distances symbolisées par la lettre R (exprimées en mètres) des limites des zones dangereuses pour une charge symbolisée par la lettre Q (exprimée en kilogrammes) de substances explosives, placée au niveau du sol, au dessus d'un terrain plat sans protection et aux conditions atmosphériques normales (température et pression voisinent de 15 ° C et 1013 millibars) sont indiquées ci-après :

1. Cas d'une charge de matières ou objets de la division 1.1. :

ZONE	DISTANCE R A LA CHARGE Q
Z 1	$0 < R_1 \leq 5Q^{1/3}$
Z 2	$< R_2 \leq 8Q^{1/3}$
Z 3	$< R_3 \leq 15Q^{1/3}$
Z 4	$< R_4 \leq 22Q^{1/3}$
Z 5	$< R_5 \leq 44Q^{1/3}$

Toute charge Q susceptible de détoner est le centre des zones dangereuses ci-dessus définies, mais en tout point où une détonation pourrait entraîner presque simultanément d'autres détonations, Q représente la somme des masses pouvant détoner presque simultanément.

Des détonations sont dites presque simultanées si elles se suivent suffisamment de près (à intervalles de temps de quelques milli-secondes) pour produire en un point une suppression de crête supérieure à chacune de celles qu'elles y produiraient si elles survenaient isolément.

On admet que la détonation d'une charge Q, en terrain plat sans protection particulière, entraîne dans un rayon $R = 0,50 Q^{1/3}$, la détonation presque simultanée de toute la masse susceptible de détoner.

On admet également que la détonation d'une charge Q, en terrain plat sans protection particulière, peut entraîner dans un rayon $R = 2,4 Q^{1/3}$ s'il ya risque de projection, la détonation presque simultanée de toute la masse susceptible de détoner.

27 Dhou El Kaada 1414
8 mai 1994

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 28

5

2. Cas d'une charge de matières et objets de la division 1.2 :

ZONE	DISTANCE R A LA CHARGE $Q \geq 100$
	Munitions de calibre 60 mm ou s'il y a risque de projection de plus de 150 grammes à plus de 15 mètres sans risque de projection de plus de 250 grammes à plus de 15 mètres.
Z 1	$0 < R \leq 15$
Z 2	$< R \leq 90$
Z 3	$< R \leq 200$
Z 4	$< R \leq 60 Q^{1/6}$ ou si $300 \geq 60 Q^{1/6}$
Z 5	$< R \leq 120 Q^{1/6}$ ou si $600 \geq 120 Q^{1/6}$
	Munitions de calibre 60 mm ou s'il y a risque de projection de plus de 250 grammes à plus de 15 mètres.
Z 1	$0 < R \leq 25$
Z 2	$< R \leq 135$
Z 3	$< R \leq 300$
Z 4	$< R \leq 75 Q^{1/6}$ ou 400 si $400 \geq 75 Q^{1/6}$
Z 5	$< R \leq 150 Q^{1/6}$ ou 800 si $800 \geq 150 Q^{1/6}$

— Les distances figurant dans le tableau ci-dessus peuvent être réduite d'un tiers lorsque la charge Q est inférieure à 100 et supérieure ou égale à 10.

— Les limites des zones de danger sont à définir par une étude particulière lorsque la charge Q est inférieure à 10.

Dans les cas ci-dessus, des matières et objets de la division 1.2, Q représente la masse nette des matières explosibles à l'exclusion des enveloppes qui les contiennent.

Si des matières et objets présentent à la fois un danger d'explosion en masse et un risque important de projections (de plus de 150 grammes à plus de 15 mètres), les zones de danger à retenir sont les plus étendues de celles qui ont été déterminées pour ces matières ou objets considérés comme appartenant soit à la division 1.1, soit à la division 1.2.

3. Cas d'une charge de matières ou objets de la division 1.3. :

ZONE	DISTANCE R A LA CHARGE DE MASSE Q
	matières ou objets de la sous-division 1.3 a matières ou objets de la sous-division 1.3 b.
Z 1	$0 < R \leq 2.5 Q^{1/3}$ $0 < R \leq 1.5 Q^{1/3}$
Z 2	$< R \leq 3.5 Q^{1/3}$ $< R \leq 5 Q^{1/3}$
Z 3	$< R \leq 5 Q^{1/3}$ $< R \leq 5 Q^{1/3}$
Z 4	$< R \leq 6.5 Q^{1/3}$ $< R \leq 3.25 Q^{1/3}$

Ce cas ne comporte pas de zone Z5.

4. Cas d'une charge de matières ou objets de la division 1.4 :

ZONE	DISTANCE R A LA CHARGE Q.
Z 2	$0 < R \leq Q^{1/3}$ ou 5 si $0.5 Q^{1/3} > 5$
Z 3	$< R \leq 10$
Z 4	$< R \leq 25$

Le cas de la division 1.4 ne comporte pas de Z1 et de Z5.

Les matières et objets du type 1.4 S ne comportent pas de dangers plus graves que ceux des zones Z4.

5. Cas d'une charge de matières de la division 1.5 :

Les zones dangereuses sont les mêmes que celles qui ont été définies dans le cas d'une charge de matières ou objets de la division 1.1.

Art. 7. — Dans les conditions normales de température et de pression au dessus d'un terrain plat et sans protection, les distances à la charge explosible qui doivent être prises comme limites des zones Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, sont celles qui sont indiquées à l'article 6 ci-dessus, à moins que les propriétés explosives particulières de la charge ne justifient une évaluation différente de l'étendue des zones dangereuses définies à l'article 5 ci-dessus.

Ces distances doivent être augmentées s'il existe des conditions particulières susceptibles d'aggraver le danger.

Elles peuvent être réduites si la configuration du terrain ou la mise en place de dispositifs de protection diminuent la gravité du danger.

Les distances d'isolement applicables aux différentes situations sont indiquées en annexe au présent arrêté.

Art. 8. — Dans chaque installation pyrotechnique élémentaire, suivant la nature des matières ou objets explosibles qui peuvent s'y trouver et le type d'opérations qui y sont effectuées, la probabilité d'un accident pyrotechnique doit être estimée et respectivement désignée P1, P2, P3, P4, P5 selon que l'éventualité d'un tel accident se révèle extrêmement rare, très rare, rare, assez fréquente ou fréquente.

Dans l'étude de sécurité, sera arrêté et justifié le choix fait du degré de probabilité d'accident pyrotechnique pour chaque emplacement de travail où un tel accident peut survenir, compte-tenu des opérations qui y sont effectuées et des mesures de sécurité qui y sont prises.

Art. 9. — Les degrés de probabilité d'accident pyrotechnique P1, P2, P3, P4, P5 correspondent à :

P1 : probabilité annuelle inférieure à 1/100 000;

P2 : probabilité annuelle au moins égale à 1/100 000 mais inférieure à 1/10 000;

P3 : probabilité annuelle au moins égale à 1/10 000 mais inférieure à 1/1000;

P4 : probabilité annuelle au moins égale à 1/1000 mais inférieure à 1/100;

P5 : probabilité annuelle au moins égale à 1/100.

La probabilité d'accident pyrotechnique est évaluée par combinaison des trois méthodes ci-après :

* la première est intuitive et fait surtout appel à l'expérience;

* la seconde est empirique et procède de données statistiques;

* la troisième est analytique, elle correspond à la décomposition du système de travail et à l'étude de ses divers composants ainsi qu'à la recherche des causes qui pourraient contribuer à provoquer une explosion.

Les degrés de probabilité correspondant à certaines opérations sont :

P1 : le stockage dormant de produits emballés et manutention de produits autres que les explosifs primaires en emballage admis au transport;

P2 : l'opération d'emballage, de mélange, de séchage, de coulée ou d'encartouchage de produits peu sensibles et la manutention de ces produits en récipients de transfert ainsi que certaines nitrations particulièrement bien contrôlées;

P3 : les opérations dans lesquelles des matières ou objets explosibles sont à un moment donné à nu (fabrication d'explosifs, nitration etc...);

P4 : les opérations sur des objets explosifs chargés en composition pyrotechnique très sensible et des explosifs primaires secs ainsi que la fabrication d'explosifs primaires;

P5 : les mélanges et les compressions d'explosifs primaires.

Les indications ci-dessus, qui ne donnent que certains éléments d'appréciation de la probabilité, sont à compléter par les éléments suivants :

* sensibilité des substances explosives où la probabilité d'accident est plus élevée lorsque les contraintes mécaniques et thermiques en cours de production sont proches des conditions assurant leur amorçage et explosion;

* signes avant coureur permettant de prendre des mesures visant à empêcher l'accident;

* fréquences des accidents par rapport au nombre d'opérations;

* sensibilité au rayonnement électromagnétique;

* densité de stockage;

* diversité des opérations effectuées sur une même installation.

Art. 10. — L'étude de risque, accompagnée de toutes les justifications, détermine pour chaque installation pyrotechnique élémentaire :

* le classement des matières ou objets explosibles dans la division de risque correspondant;

* les zones dangereuses qui en découlent, en prenant en considération, les propriétés explosives particulières de ces matières et objets. Il sera tenu compte des dispositions envisagées ainsi que des conditions existantes susceptibles de réduire ou d'aggraver le danger;

* la probabilité estimée d'accident pyrotechnique ainsi que les mesures prises pour éviter la transmission d'un tel accident entre installations pyrotechniques élémentaires ou même à l'intérieur d'une telle installation lorsqu'elle contient des matières ou objets, de groupe de compatibilité différents.

Art. 11. — Les différentes catégories d'installations à protéger contre les effets d'un accident pyrotechnique, qui se produirait dans une installation pyrotechnique élémentaire désignée a0, dont les voies d'accès et les annexes doivent être placées dans son voisinage immédiat, sont définies ci-après :

1°) Construction ou emplacement intérieur à l'établissement pyrotechnique :

* installations pyrotechniques (emplacement de travail, ateliers, dépôts, magasins) ainsi que leurs voies d'accès et annexes qu'il est indispensable de placer dans le voisinage de a0, classées a1;

* installations pyrotechniques non classées a1. Voies de circulation intérieures, classées a2;

* bâtiments et locaux non pyrotechniques, classés a3.

2°) Voies de circulation extérieures à l'établissement pyrotechnique :

* voies peu fréquentées où le trafic est inférieur ou égal à 200 véhicules par jour, classées b1;

* voies fréquentées où le trafic est compris entre 200 et 2000 véhicules par jour, classées b2;

* voies très fréquentées où le trafic est égal ou dépasse 2000 véhicules par jour, classées b3;

3°) Constructions ou emplacements extérieurs à l'établissement pyrotechnique :

* constructions non habitées peu fréquentées (abris de jardin, hangars agricoles etc...), classées c1;

* locaux habités ou fréquentés liés à l'établissement ou habitations isolées, classés c2;

27 Dhou El Kaada 1414
8 mai 1994

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 28

7

* installations industrielles, commerciales, agricoles ou locaux habités ou fréquentés qui ne sont pas nécessairement liés à l'établissement, classés c3;

* installations d'alimentation ou de distribution d'eau, d'énergie, non enterrées (réseaux électriques sous haute tension et moyenne tension, réservoirs et conduites de produits inflammables, ensembles de production et de transmission d'énergie pneumatique etc...), classés c3;

* lieux de rassemblement de personnes (stades, mosquées, marchés, écoles, hôpitaux etc...), agglomérations denses, immeubles de grande hauteur ou formant mur rideau, classés c4.

Art. 12. — Le tableau suivant donne l'implantation possible des différentes catégories d'installations dans chaque zone dangereuse :

TABLEAU

ZONE DE DANGER	PROBABILITE D'ACCIDENT PYROTECHNIQUE				
	P1	P2	P3	P4	P5
Z 1	a0	a0	a0 (*)	a0 (**)	a0 (**)
Z 2	a1	a1 a2 (*)	a1	a1 (*)	a1 (**)
Z 3	a1 b1 c1 a2 a3	a1 b1 c1 a2	a1 a2	a1	a1 (*)
Z 4	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3	a1 b1 c1 a2	a1 a2	a1
Z 5	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3 b3 c3	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3 b3 c3	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3 b3 c3	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3 b3 c3	a1 b1 c1 a2 b2 c2 a3 b3

(*) signifie que le personnel nécessaire au fonctionnement de l'installation considérée ne doit pas être soumis, pendant plus de 10% du temps de travail normal, à des risques équivalents à ceux auxquels il est exposé dans cette installation.

(**) signifie qu'aucune personne ne doit se trouver dans la zone et l'installation considérées.

Le nombre des personnes admises à se trouver simultanément dans les zones Z1 et Z2 doit être réduit au strict minimum.

Le nombre des personnes présentes simultanément dans toute installation classée a0 ayant une probabilité d'accident pyrotechnique supérieure à P1 ne doit pas normalement dépasser 5.

Les installations classées a0 (*) situées en Z1 P3 et classées a0 (**) situées en Z1 P4 peuvent être respectivement changées en a0 et a0 (*) s'il peut être démontré que, dans ces installations, des signes perceptibles se produisent, annonciateurs d'accidents ou d'une explosion (odeurs ou bruits anormaux, échauffement excessif, fumée caractéristique etc...) permettant de prévoir avec certitude la survenue prochaine d'un accident pyrotechnique mais laissant au personnel en danger le temps de quitter en toute sécurité la zone exposée.

Art. 13. — Toute partie commune à deux zones de danger doit être considérée comme appartenant à l'une de ces deux zones où les possibilités d'implantation sont les plus réduites.

Art. 14. — Les limites des zones dangereuses sont reportées sur un plan de l'installation ou de l'établissement pyrotechnique et de leurs alentours.

Ce plan, annexé à l'étude de sécurité, indique l'implantation des différentes installations avec, pour chacune d'elles, l'estimation des probabilités d'accident pyrotechnique.

Ce plan comporte, le cas échéant, des agrandissements de certaines parties de l'établissement de façon que puisse être discerné chacun des emplacements de travail, ateliers, dépôts ou magasins pouvant être à l'origine d'un accident pyrotechnique.

Art. 15. — Le présent arrêté sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 10 août 1993.

Le ministre de la défense
nationale

Liamine ZEROUAL

Le ministre de l'industrie
et des mines

Belkacem BELARBI

Le ministre de l'intérieur
et des collectivités locales

Mohamed HARDI

Le secrétaire d'Etat
à la recherche scientifique

Malika ALLAB

A N N E X E

EXPLICATIONS DES SYMBOLES

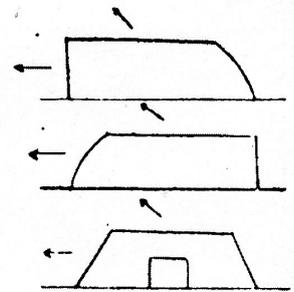
1. SIEGES POSSIBLES D'EXPLOSION.

1.1. Bâtiment recouvert de terre.

(1) Bâtiment recouvert de terre à trois murs talutés. Les effets directionnels passant par la porte et le pignon sont orientés vers un siège exposé.

(2) Même bâtiment qu'en (1), mais avec effets directionnels passant par la porte et le pignon à l'opposé de la direction du siège exposé.

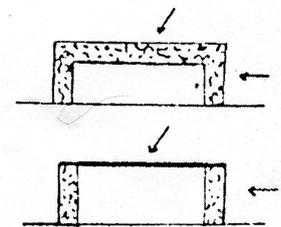
(3) Même bâtiment qu'en (1), mais avec les effets directionnels passant par la porte et le pignon perpendiculaires à la direction du siège exposé.



1.2. Bâtiment en maçonnerie lourde.

(1) Bâtiment à murs forts de 0,70 m de béton ou de matériaux de résistance équivalente, à toit protecteur de 0,15 m de béton. La porte est merlonnée si elle est orientée vers un siège possible d'explosion.

(2) Même bâtiment qu'en (1), mais sans toit protecteur. La porte est merlonnée si elle est orientée vers un siège d'explosion.



1.3. Siège merlonné.

(1) Stockage en plein air ou sous abri léger, merlonné.

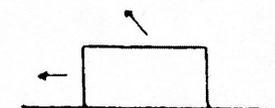
(2) Camion, remorque ou wagon chargé de munitions, merlonné.



1.4. Siège non merlonné.

(1) Stockage en plein air ou sous abri léger, non merlonné.

(2) Camion, remorque ou wagon chargé de munitions, non merlonné.



2. SIEGES EXPOSEES.

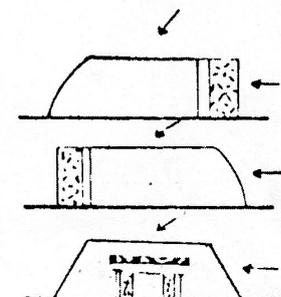
2.1. Bâtiment recouvert de terre.

2.1.1. Igloo conçu pour résister à 7 bars.

(1) Igloo résistant à une suppression extérieure de 7 bars, et aux projections à grande vitesse, avec la porte orientée vers un siège d'explosion.

(2) Même igloo qu'en (1), mais la porte orientée à l'opposé du siège possible d'explosion.

(3) Même igloo qu'en (1), mais avec la porte orientée perpendiculairement à la direction du siège possible d'explosion.



27 Dhou El Kaada 1414
8 mai 1994

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 28

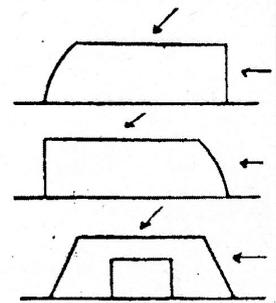
9

2.1.2. Autres bâtiments recouverts de 0,60 m de terre à murs talutés.

(1) Bâtiment recouvert de terre, non conforme aux règles de construction des igloos, dont la porte est orientée vers un siège possible d'explosion.

(2) Même bâtiment qu'en (1), mais dont la porte est orientée à l'opposé de la direction du siège possible d'explosion.

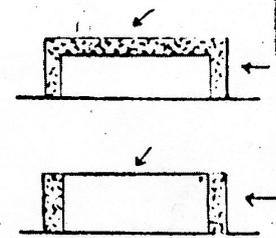
(3) Même bâtiment qu'en (1), mais dont la porte est orientée perpendiculairement à la direction du siège possible d'explosion.



2.2. Bâtiment en maçonnerie lourde.

(1) Bâtiment à murs forts de 0,70 m de béton ou de matériaux de résistance équivalente, à toit protecteur de 0,15 m de béton. La porte est merlonnée si elle est orientée vers un siège possible d'explosion.

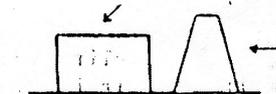
(2) Même bâtiment qu'en (1), mais sans toit protecteur. La porte est merlonnée si elle est orientée vers un siège d'explosion.



2.3. Siège merlonné.

(1) Stockage en plein air ou sous abri léger, merlonné.

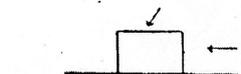
(2) Camion, remorque ou wagon chargé de munitions, merlonné. Stationnement à 24 h.



2.4. Siège non merlonné.

(1) Stockage en plein air ou sous abri léger, non merlonné.

(2) Camion, remorque ou wagon chargé de munitions, non merlonné. Stationnement 24 h.

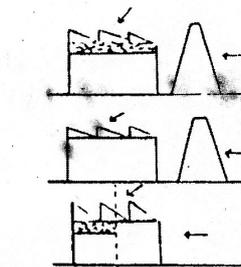


2.5. Atelier de munitions.

(1) Atelier de munitions avec toit protecteur, merlonné (un mur fort peut constituer le merlon).

(2) Atelier de munitions sans toit protecteur, merlonné (un mur fort peut constituer le merlon).

(3) Atelier de munitions avec ou sans toit protecteur, non merlonné.



2.6. Siège extérieur.

(1) Artères de circulation.

(2) Habitations.

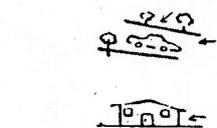
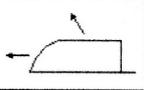
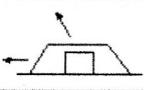
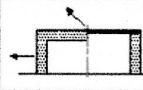
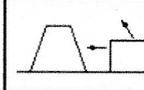
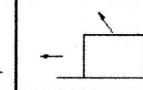
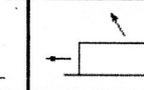
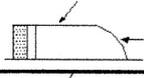
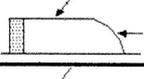
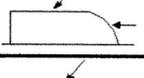
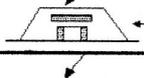
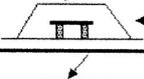
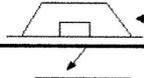
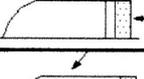
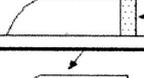
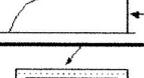
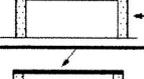
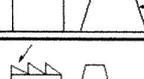
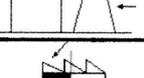
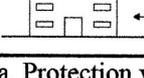


Tableau 11: distances de sécurité en fonction de la charge (division de risque 1,1)

Tableau des distances de sécurité pour la division de risque 1,1						Tableau 1B
Sièges exposés	Sièges possibles d'explosion					
						
	D3 ^{ag}	D3 ^{ag}	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D4 ^{ag}
	D3 ^{ag}	D3 ^{ag}	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D4 ^{ag}
	D4 ^{agh} ou D5 ^{ag}	D4 ^{agh} ou D5 ^{ag}	D4 ^{agh} ou D8 ^c	D4 ^{agh} ou D8 ^c	D4 ^{agh} ou D8 ^c	D4 ^{agh} ou D6 ^a
	D3 ^{ag}	D3 ^{ag}	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D5 ^{ag}
	D3 ^{ag}	D3 ^{ag}	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D6 ^c ou D7 ^b	D5 ^{ag}
	D4 ^{bgh} ou D6 ^a	D4 ^{bgh} ou D6 ^a	D4 ^{bgh} ou D8 ^c	D4 ^{bgh} ou D8 ^c	D4 ^{bgh} ou D8 ^c	D4 ^{bgh} ou D6 ^a
	D4 ^{ag}	D5 ^{ag}	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12 ^a	D8 ^b	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12 ^a	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12 ^a
	D6 ^a	D6 ^a	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12 ^a	D9 ^b	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12 ^a	D8 ^{bd} ; D9 ^{bj} ; D12
	D4 ^{bgh} ou D7 ^b	D4 ^{bgh} ou D7 ^b	D9 ^{bj} ou D12 ^f	D4 ^{cgh} ou D9 ^c	D9 ^{bj} ou D12 ^f	D9 ^{bj} ou D12 ^f
	D4 ^{cgh} ou D7 ^b	D4 ^{cgh} ou D7 ^b	D5 ^{cgh} ou D7 ^b			
	D4 ^{cgh} ou D7 ^b	D4 ^{cgh} ou D7 ^b	D5 ^{cgh} ou D7 ^b			
	D4 ^{bgh} ou D7 ^b	D4 ^{bgh} ou D7 ^b	D4 ^{bgh} ou D7 ^b	D1 ^{ci} ; D2 ^{bi} ; D4 ^{bgh} ; D7 ^b	D1 ^{ci} ; D2 ^{bi} ; D4 ^{bgh} ; D7 ^b	D4 ^{bgh} ou D7 ^b
	D10 (>270m)	D10 (>270m)	D10 (>270m)	D10	D10	D10 (>270m)
	D10 (>270m)	D10 (>270m)	D13	D10	D13	D13
	D11 (>270m) ^k D13 (>400m)	D11 (>270m) ^k D13 (>400m)	D11 (>270m) ^k D13 (>400m)	D11 ^k ou D13	D11 ^k ou D13	D11 (>270m) ^k D13 (>400m)
	D13 (>400m) ^l	D13 (>400m) ^l	D13 (>400m) ^l	D13 ^l ou D13 (>400m) ^{lm}	D13 ^l ou D13 (>400m) ^{lm}	D13 (>400m) ^l

a. Protection virtuellement complète

b. Degré de protection élevé.

c. Degré de protection modéré.

d. Résistance du pignon de la porte ou des portes sur le siège exposé.

f. Degré de protection dépendant de la structure sur le siège exposé et de la sensibilité de son contenu

g. A l'exclusion des substances explosives primaires.

h. A l'exclusion des articles, sur le siège exposé, vulnérable à l'attaque par des fragments lourds.

i. Stockage modulaire de bombe, etc. et piles à découvert.

j. Piles non merlonnées d'obus de construction robuste.

k. Réaction des conducteurs sur des routes fréquentées.

l. Projections et chutes de vers etc.

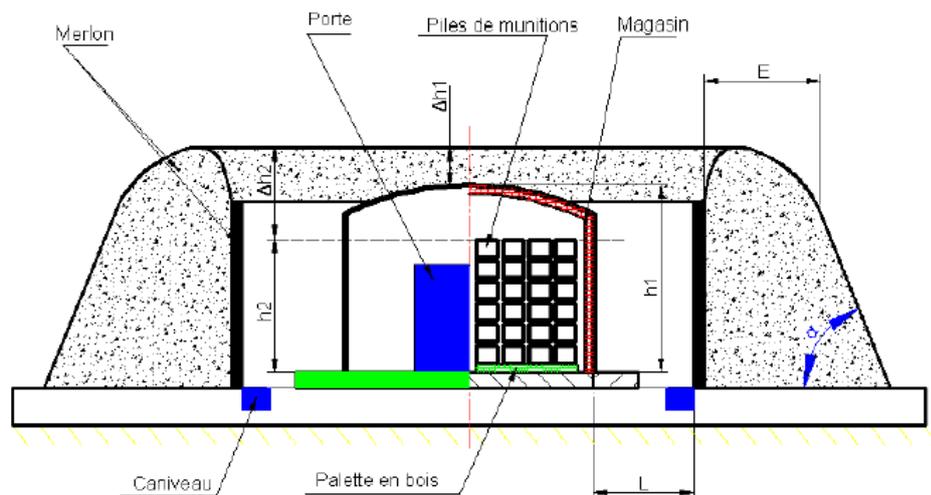
m. Distances aux zones bâties 400 m minimum.

Tableau 10: distances de sécurité en fonction de la charge (division de risque 1,1)

Tableau des distances de sécurité pour la division de risque 1,1												Tableau 1A	
Qté d'explosif Q (Kg)	Distance de sécurité (m)												
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13
500,00	3,00	4,00	4,00	7,00	9,00	15,00	20,00	29,00	39,00	64,00	180,00	180,00	270,00
600,00	4,00	4,00	5,00	7,00	10,00	16,00	21,00	31,00	41,00	68,00	180,00	190,00	270,00
700,00	4,00	4,00	5,00	8,00	10,00	16,00	22,00	32,00	43,00	72,00	180,00	200,00	270,00
800,00	4,00	5,00	5,00	8,00	11,00	17,00	23,00	34,00	45,00	75,00	180,00	210,00	270,00
900,00	4,00	5,00	5,00	8,00	11,00	18,00	24,00	35,00	47,00	78,00	180,00	215,00	270,00
1 000,00	4,00	5,00	5,00	8,00	11,00	18,00	24,00	36,00	48,00	80,00	180,00	225,00	270,00
1 200,00	4,00	5,00	6,00	9,00	12,00	20,00	26,00	39,00	52,00	86,00	180,00	240,00	270,00
1 400,00	5,00	5,00	6,00	9,00	13,00	21,00	27,00	41,00	54,00	90,00	180,00	250,00	270,00
1 600,00	5,00	6,00	6,00	10,00	13,00	22,00	29,00	43,00	57,00	94,00	180,00	260,00	270,00
1 800,00	5,00	6,00	7,00	10,00	14,00	22,00	30,00	44,00	59,00	98,00	180,00	270,00	270,00
2 000,00	5,00	6,00	7,00	11,00	14,00	23,00	31,00	46,00	61,00	105,00	180,00	280,00	270,00
2 500,00	6,00	6,00	7,00	11,00	15,00	25,00	33,00	49,00	66,00	110,00	185,00	305,00	275,00
3 000,00	6,00	7,00	8,00	12,00	16,00	26,00	35,00	52,00	70,00	120,00	205,00	325,00	305,00
3 500,00	6,00	7,00	8,00	13,00	17,00	28,00	37,00	55,00	73,00	125,00	220,00	340,00	330,00
4 000,00	6,00	7,00	8,00	13,00	18,00	29,00	39,00	58,00	77,00	130,00	235,00	355,00	350,00
5 000,00	7,00	8,00	9,00	14,00	19,00	31,00	42,00	62,00	83,00	140,00	255,00	380,00	380,00
6 000,00	7,00	8,00	10,00	15,00	20,00	33,00	44,00	66,00	88,00	150,00	270,00	405,00	405,00
7 000,00	8,00	9,00	10,00	16,00	22,00	35,00	46,00	69,00	92,00	155,00	285,00	425,00	425,00
8 000,00	8,00	9,00	10,00	16,00	22,00	36,00	48,00	72,00	96,00	160,00	300,00	445,00	445,00
9 000,00	8,00	10,00	11,00	17,00	23,00	38,00	50,00	75,00	100,00	170,00	310,00	465,00	465,00
10 000,00	8,00	10,00	11,00	18,00	24,00	39,00	52,00	78,00	105,00	175,00	320,00	480,00	480,00
12 000,00	9,00	11,00	12,00	19,00	26,00	42,00	55,00	83,00	110,00	185,00	340,00	510,00	510,00
14 000,00	9,00	11,00	13,00	20,00	27,00	44,00	58,00	87,00	120,00	195,00	360,00	540,00	540,00
16 000,00	10,00	12,00	13,00	21,00	28,00	46,00	61,00	91,00	125,00	205,00	375,00	560,00	560,00
18 000,00	10,00	12,00	14,00	21,00	29,00	48,00	63,00	95,00	130,00	210,00	390,00	590,00	590,00
20 000,00	11,00	12,00	14,00	22,00	30,00	49,00	66,00	98,00	135,00	220,00	405,00	610,00	610,00
25 000,00	11,00	13,00	15,00	24,00	33,00	53,00	71,00	110,00	145,00	235,00	435,00	650,00	650,00
30 000,00	12,00	14,00	16,00	25,00	35,00	56,00	75,00	115,00	150,00	250,00	460,00	690,00	690,00
35 000,00		15,00	17,00	27,00	36,00	59,00	79,00	120,00	160,00	265,00	485,00	730,00	730,00
40 000,00		16,00	18,00	28,00	38,00	62,00	83,00	125,00	165,00	275,00	510,00	760,00	760,00
50 000,00		17,00	19,00	30,00	41,00	67,00	89,00	135,00	180,00	295,00	550,00	820,00	820,00
60 000,00		18,00	20,00	32,00	44,00	71,00	94,00	145,00	190,00	315,00	580,00	870,00	870,00
70 000,00		19,00	21,00	33,00	46,00	75,00	99,00	150,00	200,00	330,00	610,00	920,00	920,00
80 000,00		19,00	22,00	35,00	48,00	78,00	105,00	160,00	210,00	345,00	640,00	960,00	960,00
90 000,00		20,00	23,00	36,00	50,00	81,00	110,00	165,00	220,00	360,00	670,00	1000,00	1000,00
100 000,00		21,00	24,00	38,00	52,00	84,00	115,00	170,00	225,00	375,00	690,00	1040,00	1040,00
120 000,00		22,00	25,00	40,00	55,00	89,00	120,00	180,00	240,00	395,00	730,00	1100,00	1100,00
140 000,00			26,00	42,00	58,00	94,00	125,00	190,00	250,00	420,00	770,00	1160,00	1160,00
160 000,00			28,00	44,00	60,00	98,00	135,00	200,00	265,00	435,00	810,00	1220,00	1220,00
180 000,00			29,00	46,00	63,00	105,00	140,00	205,00	275,00	455,00	840,00	1260,00	1260,00
200 000,00			30,00	47,00	65,00	110,00	145,00	215,00	285,00	470,00	870,00	1300,00	1300,00
250 000,00			32,00	51,00	70,00	115,00	155,00	230,00	305,00	510,00	940,00	1400,00	1400,00

Formule donnant la distance en fonction de la charge
 $D1= 0,37Q^{1/3}$; $D2= 0,44Q^{1/3}$; $D3= 0,50Q^{1/3}$; $D4= 0,80Q^{1/3}$; $D5= 1,10Q^{1/3}$; $D6= 1,80Q^{1/3}$; $D7= 2,4Q^{1/3}$;
 $D8= 3,60Q^{1/3}$; $D9= 4,80Q^{1/3}$; $D10= 8,00Q^{1/3}$; $D11= 3,60Q^{1/3}$ Pour $Q < 4500$; $D11= 14,8Q^{1/3}$ Pour $Q > 4500$;
 $D12= 22,2Q^{1/3}$; $D13= 5,50Q^{1/3}$ Pour $Q < 4500$; $D13=22,2Q^{1/3}$ pour $Q > 4500$

ANNEXE -C- Conditions et Proposition de type d'empilement.



LEGENDE	
H : hauteur du merlon	$\Delta h1$: écart entre hauteurs du merlon et du magasin (≥ 1 mètre)
$tga = 1/1.5$ (pente du merlon mètre)	$\Delta h2$: écart entre hauteur du merlon et hauteur limite de stockage (≥ 2 mètre)
h1 : hauteur totale du magasin	E : épaisseur au sommet du merlon (≥ 1 mètre)
h2 : hauteur limite de stockage	L : espace entre muret de protection et murs extérieurs du magasin.

FIGURE 4.19: Conditions d'empilement.

Pour notre cas nous recommandant un stockage sur palettes de dimension **1,15 m X 1,45 m** de charge d'explosifs de 960 kg (cas de la Marmanit de calibre 80 mm) caisse **51 cm X 33 cm X 14 cm**).

Dans le cas **d'un dépôt a double compartiments** ; l'empilement des palettes proposé est fait sur une double pile de deux rangé de 13 palettes pour un totale de 52 palettes par compartiment ce qui nous donne une charge totale de 96 t comme illustré dans la Figure 4.19 .

Pour le cas **d'un dépôt a compartiment unique** ; l'empilement des palettes proposé est fait sur une double pile de trois rangés de 12 palettes pour un totale de 72 palettes par compartiment ce qui nous donne une charge totale de 69 t comme illustré dans la Figure 4.20 .

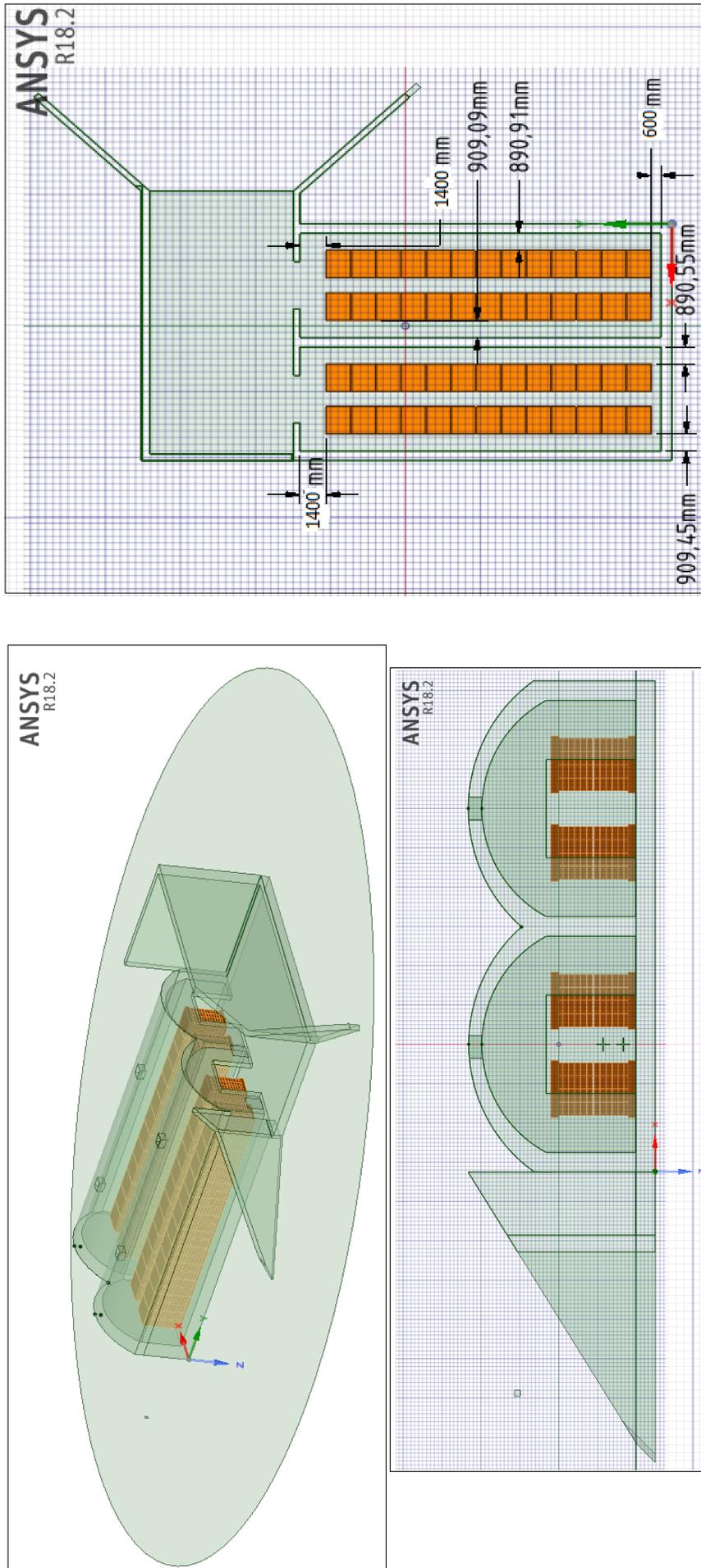


FIGURE 4.20: Proposition-Structure à double baies.

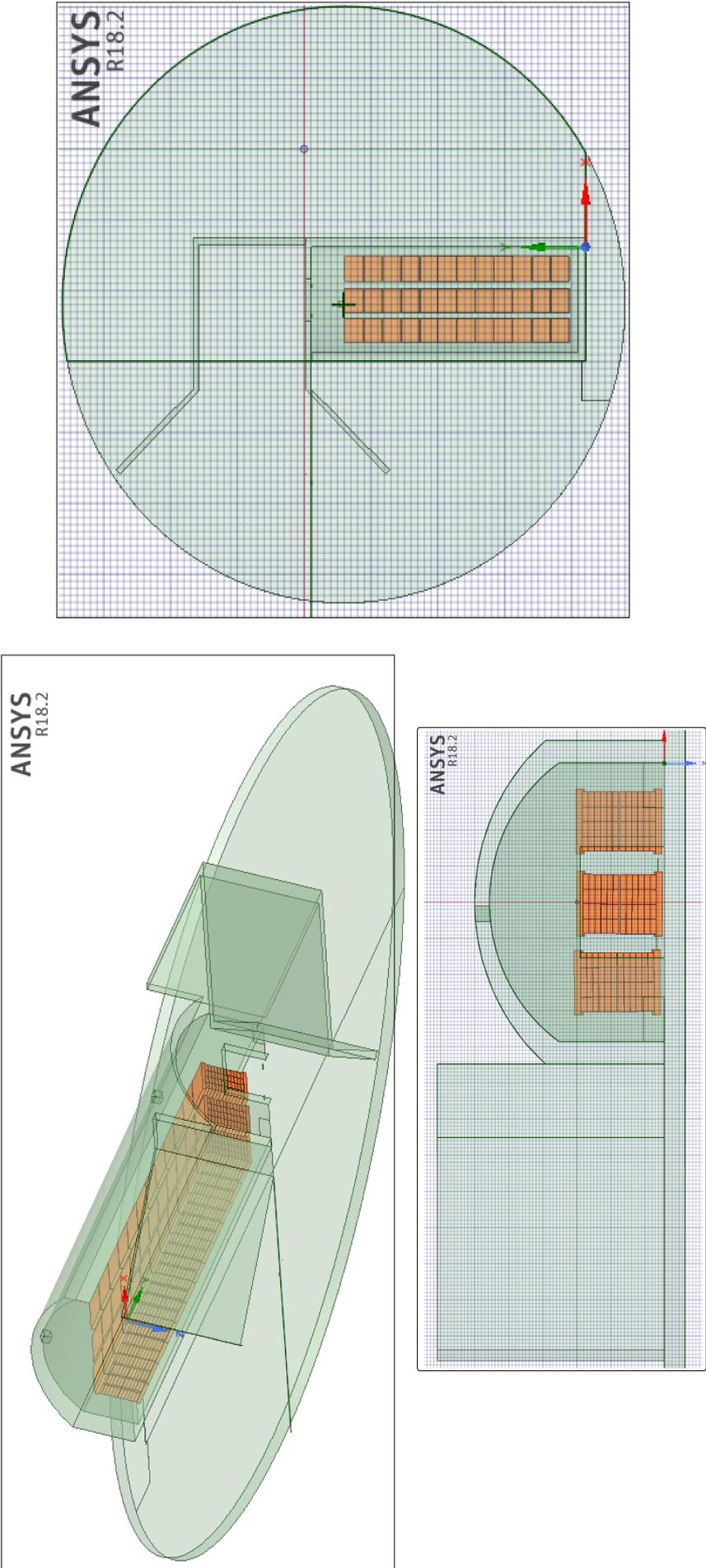


FIGURE 4.21: Proposition-Structure à simple baie.