

Gestion des risques industriels en agglomération – onde de choc et explosion



Etudiants :

Clémence LEGRAND

Juliette LEMOIGNE

Margot PALIN

Cyrine BARHOUMI

Laurie AUTER

Pierre GOSSELIN

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Date de remise du rapport : *11/06/2022*

Référence du projet : *STPI/P6/2022 – 008*

Intitulé du projet : *Gestion des risques industriels en agglomération – onde de choc et explosion*

Type de projet : *Bibliographique et expérimental*

Objectifs du projet :

Définir les ondes de choc et leurs modèles de propagation.

Assimiler les notions physiques de pression nécessaires pour comprendre les effets des ondes de choc sur une infrastructure.

Se renseigner sur les secteurs soumis au risque d'explosion afin d'appréhender les tenants et aboutissants d'un accident industriel.

Présenter des méthodes de protection des bâtiments par le biais de l'atténuation des ondes de choc.

Mots-clefs du projet : *détonation, industrie, gestion, mitigation*

TABLE DES MATIERES

1. Remerciements :	7
2. Introduction.....	7
3. Méthodologie / Organisation du travail.....	8
4. Propriétés physiques générales	9
4.1. Onde de choc	9
4.2. Combustion.....	9
4.3. Onde de déflagration	9
4.4. Onde de détonation.....	9
4.5. Explosion.....	10
4.6. Pressions	10
4.6.1. Pression dynamique.....	10
4.6.2. Pression statique	11
4.6.3. Pression statique équivalente	11
4.6.4. Pression totale	11
4.7. Impulsion.....	11
5. Technique de visualisation de phénomènes en milieu transparent.....	12
6. Modèles de propagation.....	14
6.1. Modèle de Chapman-Jouguet	14
6.2. Modèle de Zeldovich-von Neumann-Döring	15
7. Types de détonation.....	16
7.1. Détonation stable/instable.....	16
7.2. Détonation à spin	16
7.3. Détonation galopante	16
7.4. Détonation hélicoïdale	17
7.5. Détonation hétérogène/homogène	17
8. Application aux risques industriels.....	17
8.1. Industries concernées.....	18
8.1.1. Usines pétrochimiques	18
8.1.2. Usines de stockage	18
8.2. Equivalent TNT	18
8.3. Causes	19
8.4. BLEVE	19
8.5. Conséquences	20
8.5.1. Conséquences sur les infrastructures.....	20
8.5.2. Conséquences sur l'Homme.....	20
8.6. Exemples d'accidents	21
8.7. Mesures de sécurité et évolution des normes	22
9. Moyens d'atténuation et de mitigation	23
9.1. Mousse.....	24
9.2. Gouttelettes.....	26

9.3.	Event.....	26
10.	Conclusions et perspectives	27
11.	Bibliographie.....	28
12.	Table des illustrations.....	30
13.	Annexes.....	31
13.1.	Ombroscopie.....	31
13.2.	Background Oriented Schlieren (BOS)	32
13.3.	Explosion AZF	33

NOTATIONS, ACRONYMES

p = pression atmosphérique (Pa)

R = constante de gaz pour l'air ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

T = température (Kelvin)

p_{se} = pression statique équivalente (Pa)

p_{max} = pression maximale exercée sur la structure par l'onde (Pa)

p_s = pression statique (Pa)

D = célérité de détonation ($m \cdot s^{-1}$)

u = vitesse matérielle ($m \cdot s^{-1}$)

e_0 = énergie interne de l'explosif à l'état initial (P_0, v_0, T_0) (J)

e = énergie des produits de détonation à l'équilibre thermochimique (P, v, T) (J)

$e_{0produit}$ = énergie de formation des produits de détonation (J)

E_{gaz} = énergie libérée par le combustible après combustion (J)

E_{TNT} = énergie libérée par l'explosion d'un kg de TNT (soit environ 4690 kJ)

a = rendement de l'explosion de gaz

V_m = volume de la mousse (m^3)

V_l = volume du liquide utilisé (m^3)

g = masse volumique du gaz $g \cdot m^{-3}$

u_g = vitesse du gaz ($m \cdot s^{-1}$)

u_d = vitesse de la goutte ($m \cdot s^{-1}$)

φ_d = diamètre initial de la goutte (m)

σ = tension de surface du fluide (m)

1. REMERCIEMENTS :

Nous tenons à adresser nos remerciements à Monsieur Abdellah Hadjadj, enseignant responsable de notre groupe, de nous avoir accompagné tout au long du semestre et de nous avoir apporté les réponses et supports nécessaires à la réalisation de notre projet.

2. INTRODUCTION

Les ondes sont une part invisible de notre environnement, pourtant bien présente. Qu'il s'agisse de lumière (ondes lumineuses), de son (ondes sonores) ou de vagues (ondes mécaniques), les ondes partagent la définition suivante : elles sont caractérisées par la propagation d'une perturbation au sein d'un milieu matériel ou dans le vide qui produit une variation réversible de ses propriétés physiques.

Dans le cadre de ce projet intitulé « Gestion des risques industriels dans une agglomération - ondes de choc et explosions », nous nous intéresserons tout particulièrement aux ondes de choc et aux propriétés physiques de leur propagation. Nous présenterons également un montage optique permettant d'observer ces phénomènes.

Nous nous pencherons sur leur influence dans les milieux alentours, notamment sur les types d'incidents qu'elles induisent et leurs retombées environnementales et sociales.

Finalement nous aborderons les différents moyens de mitigation applicables aux secteurs de l'industrie visant à réduire le potentiel de destruction de ces ondes de choc.

3. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Tout au long du semestre, nous avons organisé notre projet de la manière suivante : nous avons séparé notre groupe de six personnes en trois binômes, chaque binôme réalisant une tâche par semaine. La plupart du travail réalisé était un travail bibliographique.

Dès les premières semaines nous avons décidé d'un plan général reprenant les grands titres de ce rapport, à savoir les propriétés physiques des ondes de choc, les risques industriels et l'impact des ondes de choc dans ce secteur et les moyens de prévention de ces risques et d'atténuation des ondes.

Nous avons également eu l'occasion d'organiser une observation de phénomènes invisibles en milieu transparent grâce à des élèves travaillant sur le projet « Visualisation des gradients de densité par technique schlieren ».

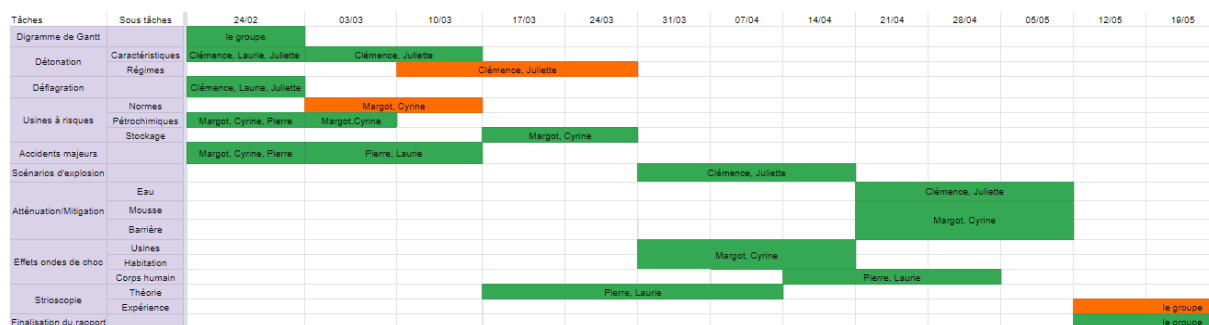


Illustration 1 : Diagramme de Gantt

Durant les deux premières semaines nous avons construit un diagramme de Gantt. Cela nous a permis de prévoir les tâches à accomplir afin de pouvoir les répartir équitablement entre tous les binômes et de manière à avoir une charge de travail équivalente chaque semaine.

Au cours de l'année nous avons mis en commun nos travaux de documentation grâce à un drive sur lequel nous renseignions toutes nos recherches et nos sources. Ainsi, nous avons suivi de bout en bout l'évolution du projet, et chaque binôme maîtrise l'ensemble du sujet, y compris les parties qu'ils n'ont pas traitées eux-mêmes.

Concernant la rédaction du rapport, chaque binôme a apporté sa part de recherche suivant le plan préétabli. Clémence et Juliette ont ensuite repris le tout afin de créer un fil conducteur, rédiger les parties manquantes et finaliser le rapport. En parallèle, Cyrine, Laurie, Margot et Pierre ont réalisé la présentation PowerPoint et l'affiche.

4. PROPRIETES PHYSIQUES GENERALES

4.1. Onde de choc

Une onde de choc se différencie d'une onde ordinaire par les modifications qu'elle apporte au milieu à son passage : une augmentation de la pression et de la masse volumique, ainsi qu'une diminution de la vitesse des gaz et une modification brutale de la température. Ces variations sont très brutales ; ainsi on qualifie l'onde de choc de discontinuité. Cette discontinuité sépare les gaz au repos, appelés gaz frais des gaz mis en mouvement par cette dernière, aussi appelés gaz choqués.

Un mobile crée des ondes de choc quand sa vitesse dépasse la célérité du son. Dans ce cas, on dit qu'il se déplace à une vitesse supersonique. Si la vitesse égale celle du son, elle est sonique, et si elle est inférieure elle est subsonique.

L'initiation d'une onde de choc commence généralement par une combustion.

4.2. Combustion

Une combustion est une réaction fortement exothermique, autonome et accompagnée d'émission de rayonnements. Elle est susceptible de s'accélérer brutalement si les conditions du milieu y sont favorables. Selon le confinement, le dégagement de chaleur de la combustion peut conduire à une expansion rapide du milieu réactionnel ou à une forte augmentation de pression.

La combustion entraîne la formation d'une flamme rapide qui devient rapidement une onde de déflagration.

4.3. Onde de déflagration

Une onde de déflagration est caractérisée par sa vitesse subsonique, de l'ordre de quelques mètres par seconde. Elle atteint sa vitesse maximale dans la zone de flamme qui correspond à une zone de discontinuité. Il s'agit d'une réaction qui amène une augmentation de la pression, de l'ordre de 2 à 3 bars, suivi d'une période de dépression. La déflagration se traduit aussi par une diminution de la masse volumique ainsi qu'une accélération des gaz.

Cette onde se propage de façon autonome dans un milieu combustible grâce notamment à la libération d'énergie issue des réactions chimiques et à la conduction de la chaleur. L'onde de combustion se diffuse depuis la zone de réaction chimique vers le mélange frais. L'écoulement du mélange frais devant la flamme est perturbé puisque cette dernière est subsonique. Cela traduit une instabilité qui peut conduire à des perturbations pouvant accélérer la flamme. Il est alors possible de passer d'un régime de déflagration à un régime de détonation. Ce phénomène s'appelle Transition Déflagration Détonation (TDD).

4.4. Onde de détonation

Une onde de détonation est caractérisée par un couplage fort entre une onde de choc incidente et la zone où la réaction chimique a lieu. Elle se déplace à une vitesse de l'ordre de plusieurs kilomètres par seconde et se traduit par une augmentation de la masse volumique

et une décélération des gaz. L'onde de choc élève la pression (de l'ordre de 100 bars) et la température des gaz frais ; ils deviennent choqués.

Ceci entraîne l'amorçage des réactions chimiques. Les gaz choqués entre la flamme et le choc brûlent, l'énergie dégagée très rapidement par la réaction entretient l'onde de choc. Il y a donc un phénomène de couplage entre l'onde de choc et la zone de réaction ; les deux s'auto-entretiennent.

Le front de flamme (fine zone dans laquelle se déroule la combustion et séparant le milieu contenant le combustible du milieu contenant les produits issus de la combustion) s'accélère, rattrape l'onde de choc. Le couple onde de choc-flamme est né et se propage de façon autonome, indépendamment de la source d'amorçage. Quand la propagation de l'onde devient indépendante du processus d'amorçage, l'onde est considérée comme autonome.

Cette onde de choc est instable. Lorsqu'elle est confinée ou rencontre un obstacle, son énergie se libère brusquement : on parle d'explosion.

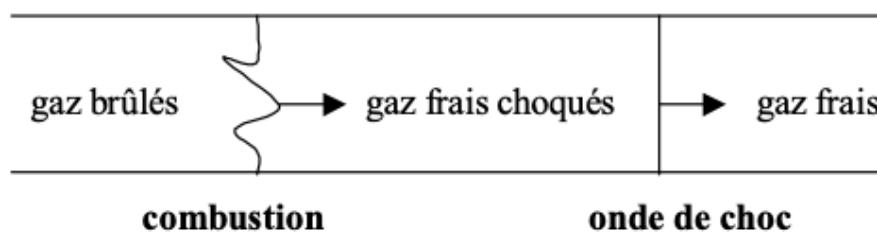


Illustration 2 : Propagation d'une onde de choc

4.5. Explosion

On appelle explosion une libération soudaine d'énergie plus ou moins confinée et plus ou moins maîtrisée. Elle peut entraîner des conséquences externes notamment si elle donne lieu à une onde de souffle ou une boule de feu.

Le traitement de surface par explosif, l'armement ou la propulsion sont des exemples d'explosion maîtrisée. Parmi les explosions non maîtrisées on peut citer la catastrophe qui a eu lieu à l'usine AZF à Toulouse en 2001. Nous reviendrons plus tard sur ce type d'accident.

4.6. Pressions

Afin d'appréhender correctement le phénomène de propagation d'une onde de choc, il est nécessaire d'introduire certaines notions physiques.

4.6.1. Pression dynamique

C'est la surpression nécessaire pour accélérer une masse volumique d'air de l'état de repos jusqu'à une certaine vitesse.

Elle se calcule selon la formule suivante :

$$\text{eq 1.} \quad p_d = \rho \frac{c^2}{2} [Pa]$$

La pression dynamique est donc dépendante de la masse volumique et donc de la température puisqu'on a :

$$\text{eq 2.} \quad \rho = \frac{p}{R \times T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

4.6.2. Pression statique

La pression statique correspond à la pression d'un fluide à l'arrêt qui s'exerce dans toutes les directions sur les parois du conteneur. Elle peut être positive, il s'agit alors d'une surpression, ou négative, c'est une dépression.

Ce phénomène se manifeste dans le cas d'un ballon gonflé à une pression d'un bar car l'air qui est sous pression appuie sur les parois du ballon en occupant tout l'espace.

4.6.3. Pression statique équivalente

La pression statique équivalente (PSE) peut être obtenue grâce à la méthode du Dynamic Load Factor (DLF). Elle permet d'assimiler une pression dynamique à une pression statique dans le cas d'un régime de déflagration en multipliant le pic de pression par le coefficient de DLF.

$$\text{eq 3.} \quad p_{se} = p_{max} \times DLF$$

4.6.4. Pression totale

La pression totale est la somme de toutes les pressions. Elle reste constante.

$$\text{eq 4.} \quad p_t = \sum p_s + p_d [Pa]$$

4.7. Impulsion

Dans certains cas, les dégâts causés sont caractérisés non pas grâce à la pression mais grâce à l'impulsion positive I+.

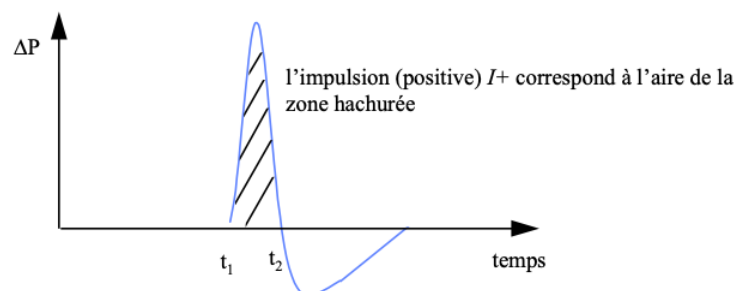


Illustration 3 : Définition de l'impulsion

Si l'explosion a pour origine la détonation d'une substance explosive, l'impulsion positive se caractérise par une très brusque montée jusqu'au maximum de pression suivie d'une décroissance.

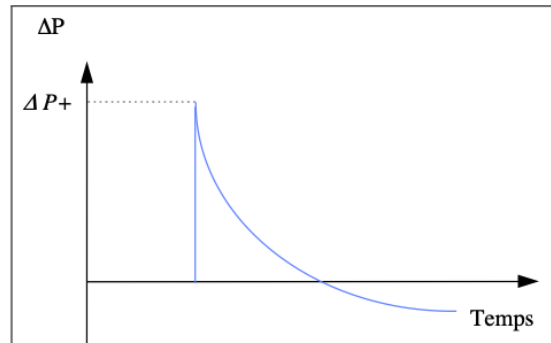


Illustration 4 : Impulsion pour une détonation

Pour une déflagration avec une vitesse de flamme plus petite que 120 m/s, les taux de croissance et de décroissance de la surpression de l'impulsion positive sont du même ordre. La phase négative est presque une homothétie inversée de la phase positive.

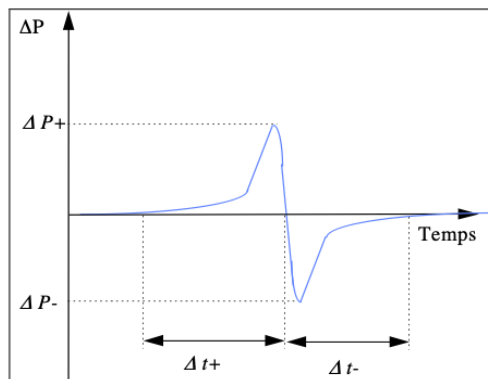


Illustration 5 : Impulsion pour une déflagration

Impulsion positive pour la pression statique :

$$\text{eq 5.} \quad I^+ = \int_{t_0}^{t_0 + \delta t} p(t) dt$$

Impulsion positive pour la pression dynamique :

$$\text{eq 6.} \quad I^+ = \int_{t_0}^{t_0 + \delta t} \rho \times \frac{v^2}{2} dt$$

5. TECHNIQUE DE VISUALISATION DE PHENOMENES EN MILIEU TRANSPARENT

Afin d'apporter une réelle dimension expérimentale à ce projet, nous avons décidé de nous intéresser aux différentes techniques de visualisation de phénomènes en milieu transparent comme les ondes.

Il en est ressorti quelques-unes : la strioscopie à un miroir, l'ombroscopie et la méthode BOS. (Voir annexe 12.1 et 12.2) Par chance, nous avons à notre disposition un montage de strioscopie et avons donc décidé de sélectionner cette méthode-ci pour l'expérience.

Il existe différents montages de strioscopie, on peut retrouver plusieurs miroirs, la présence ou non d'une lame, une ou plusieurs lentilles etc. Ici, nous nous intéresserons à une méthode de strioscopie à 1 miroir. Le principe de cette méthode est le suivant : on éclaire d'abord le miroir concave à l'aide d'une petite source ponctuelle. Il faut ensuite bien calibrer la caméra qui va récupérer le phénomène visuel et enfin, dans le faisceau de lumière, disposer le phénomène invisible. Celui-ci sera récupéré par la caméra et il sera donc possible d'observer les ondes liées à ce phénomène.



Illustration 6 : Montage de la strioscopie effectué par le groupe 42

Ce phénomène est très impressionnant puisqu'il permet d'observer des gradients de densité normalement invisibles. Le principe de fonctionnement de la strioscopie est le suivant: on observe la convection thermique qui n'est pas visible à l'œil nu (d'où l'usage de la caméra). Lorsque l'on place une source lumineuse en direction d'un dispositif convergent, les rayons lumineux de celle-ci voient leur trajectoire modifiée par le phénomène que l'on place dans le faisceau, ce qui laisse apparaître à la caméra des tâches plus ou moins claires. Ces tâches sont en fait les gradients de température. En effet, ce sont les variations de température qui entraînent cette variation d'indice de réfraction de l'air (et donc le changement de trajectoire des rayons).

On va pouvoir alors observer la chaleur qui émane d'une main ou bien d'une bougie, l'air comprimé qui sort d'une bombe à air sec ou bien l'onde de choc provoquée par l'explosion d'un ballon de baudruche. Nous avons par ailleurs testé ces derniers et voici les images que l'on a pu observer :

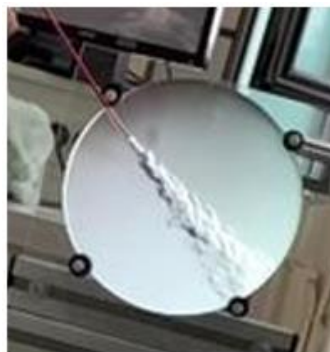


Illustration 7 : Observation d'un jet sortant d'une bombe à air sec

6. MODELES DE PROPAGATION

Différentes théories ont été développées par la communauté scientifique pour déterminer la célérité de la propagation de l'onde de détonation. Toutes ces théories, basées sur des expériences, décrivent mathématiquement des possibilités de couplage entre les variables représentatives de l'écoulement de la matière et celles relatives à la cinétique chimique.

6.1. Modèle de Chapman-Jouguet

Chaque modèle est basé sur plusieurs hypothèses. Concernant le modèle CJ, on suppose que l'écoulement est unidimensionnel plan. L'onde de détonation est assimilée à une discontinuité plane au travers de laquelle la réaction chimique est instantanée et complète.

Les fondements de la théorie de Chapman et Jouguet sont les travaux de Rankine et Hugoniot qui analysèrent les équations de la mécanique des fluides compressibles à travers une onde de choc (Rankine, 1870 ; Hugoniot, 1887-1889) :

$$\text{eq 7.} \quad \rho(D - u) = \rho_0(D - u_0)$$

$$\text{eq 8.} \quad P - P_0 = \rho_0 D(u - u_0)$$

$$\text{eq 9.} \quad e - e_0 = \frac{-1}{2}(P + P_0)(v - v_0)$$

Le lieu des états de détonation théoriquement possibles à partir d'un explosif à un état initial donné (pôle) est une adiabatique dynamique appelée courbe de Crussard. Cette dernière est définie dans le plan (P, v) par la troisième relation du système. Cette dernière peut, en introduisant l'énergie chimique Q , également se mettre sous la forme de l'équation :

$$\text{eq 10.} \quad e - e_0 = e - e_{0\text{produit}} - Q = \frac{-1}{2}(P + P_0)(v - v_0)$$

Le point (P_0, v_0) est le pôle de la courbe. Avec ces conventions d'écriture, Q est positif.

La solution de Chapman revient à trouver le point auquel la vitesse de détonation est minimale pour un explosif donné. Le postulat de Jouguet est le suivant : la condition CJ correspond à la production minimale d'entropie induisant une solution stable en fin de réaction. Cette solution correspond à un état sonique de l'écoulement au niveau de l'onde de détonation.

La droite de Rayleigh relie l'état du choc réactif atteint dans l'explosif à son état initial. En éliminant u_0 et u entre les équations 7 et 8, nous obtenons l'équation :

$$\text{eq 11.} \quad \frac{P - P_0}{v_0 - v} = \rho_0^2 D^2$$

Les solutions du système d'équation sont les points de tangence entre la courbe de Crussard et la droite de Rayleigh. Si la vitesse du mobile est faible, il n'y a pas de solutions, si la vitesse est suffisante on observe deux points d'intersection et si la vitesse d'écoulement est égale à la célérité du son par rapport aux produits, on obtient la solution CJ.

L'état de détonation CJ correspond ainsi à un régime pour lequel l'onde de détonation est sonique, autonome, stationnaire et de célérité DCJ (liée à la pente de cette droite). Il existe

deux autres solutions : la solution subsonique S (détonation forte), et celle supersonique W (détonation faible). La solution W n'est pas observable car elle est instable pour des raisons d'entropie : elle nécessite des conditions très stables pour avoir lieu, ce qui n'est pas le cas lors d'une détonation.

Le graphique suivant, tiré de la thèse de Sylvain Hansmetzger, résume ses observations.

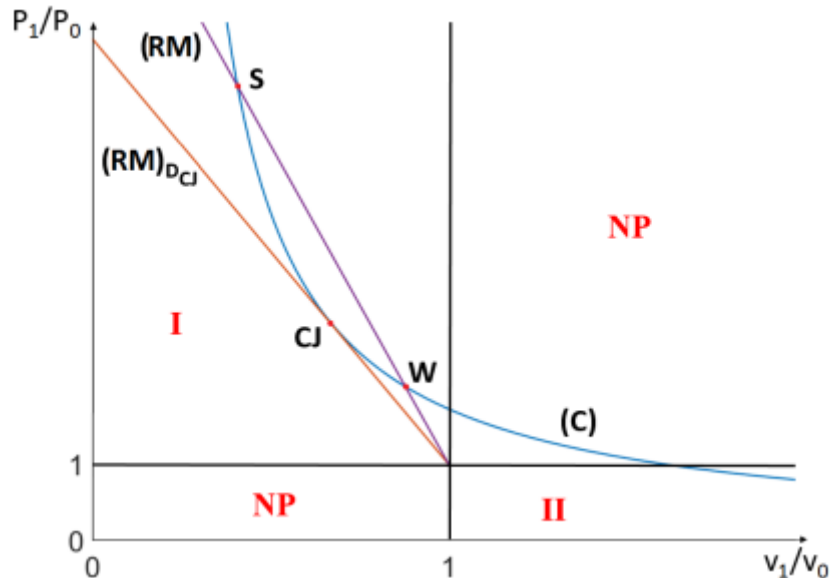


Illustration 8 : Droite de Rayleigh-Michelson (RM) et courbe de Crussard (C) dans le plan $P-v$

6.2. Modèle de Zeldovich-von Neumann-Döring

Le modèle de ZND admet des réactions chimiques exothermiques non instantanées. Dans ce modèle, la détonation est assimilée à une onde de choc inerte couplée à une zone de réaction.

La réaction est décrite de la manière suivante : tout d'abord, une onde de choc infiniment mince comprime l'explosif à haute pression et entraîne une augmentation brusque des propriétés thermodynamiques du fluide, les particules fluides se trouvent dans l'état de von Neumann (VN).

Au pic de von Neumann, l'explosif n'a pas encore réagi. L'état thermodynamique au point VN implique que le mélange peut s'auto-enflammer, avec une réaction derrière le front de choc qui se propage à la même célérité que l'onde de choc. Le pic marque l'apparition de la zone de réaction chimique exothermique, qui se termine à l'état de Chapman-Jouguet. Après cela, les produits de détonation se dilatent vers l'arrière.

La fin de la zone de réaction est marquée par le point sonique (CJ). Le flux des gaz après le choc est subsonique.

Pour une détonation autopropageante, le choc se détend à une vitesse donnée par la condition de Chapman-Jouguet. Cette dernière impose à la matière à l'arrière de la zone de réaction d'avoir une vitesse sonique locale dans le cadre de référence dans lequel le choc est stationnaire.

7. TYPES DE DÉTONATION

7.1. Détonation stable/instable

La stabilité d'une onde de détonation dépend de plusieurs facteurs tels que la largeur de la cellule de détonation, la longueur d'induction à la détonation ou l'énergie critique d'initiation d'une détonation sphérique.

Ainsi une onde de détonation est dite stable lorsque sa célérité reste constante sur une longue distance, c'est-à-dire le long de son trajet dans l'équipement, et lorsque le couplage onde de choc-zone de réaction est fort.

La détonation est instable ou inexistante en dehors des limites de détonabilité comprenant un domaine de concentration, aussi appelé richesse, à l'intérieur duquel la détonation se fait de manière auto-entretenu. La richesse se définit d'après la formule suivante :

$$\text{eq 12.} \quad \Phi = \frac{[\text{carburant}]/[\text{comburant}]_{\text{mélange}}}{[\text{carburant}]/[\text{comburant}]_{\text{stoechio}}}$$

Si $\Phi > 1$ on dit que le mélange est riche et il est pauvre si $\Phi < 1$. Quand $\Phi = 1$ le mélange est en proportions stœchiométriques.

La richesse est un facteur important dont dépendent les limites de détonation.

7.2. Détonation à spin

La détonation à spin a lieu si plusieurs conditions sont réunies. Il faut que cette dernière se déroule dans un tube cylindrique et qu'elle tourne en spirale le long de ce tube. La tête de la détonation doit aussi effectuer une rotation. La détonation à spin est ainsi caractérisée par la fréquence du spin qui dépend du diamètre du tube et par le pas de rotation de sa tête qui est environ trois fois le diamètre du tube dans lequel elle circule.

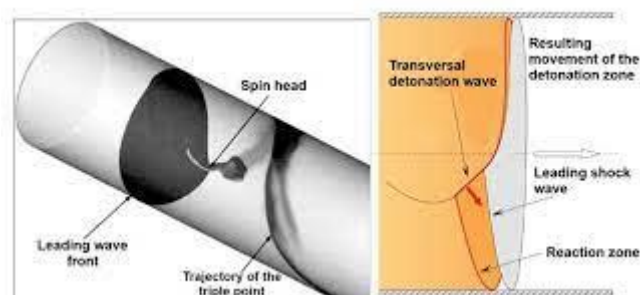


Illustration 9 : Propagation d'une détonation à spin

7.3. Détonation galopante

Une onde galopante se divise en plusieurs étapes. Premièrement, on assiste à la transformation d'une onde à basse célérité en une détonation dite "surpressée". Deuxièmement, on a une décélération progressive de cette onde jusqu'à atteindre la vitesse

de Chapman-Jouguet. Cette onde devient une détonation à spin. Puis, a lieu une diminution continue de la célérité de l'onde ce qui provoque le découplage entre l'onde de choc et la zone de réaction. Pour finir, l'onde accélère de façon lente ce qui conduit au recouplage brusque de l'onde de choc et de la zone réactionnelle. La première étape est alors répétée.

7.4. Détonation hélicoïdale

Lorsque le front de détonation est composé d'un seul point triple, la détonation est dite marginale ou à une seule tête. Le terme détonation hélicoïdale est quant à lui réservé aux détonations marginales qui se propagent dans les tubes circulaires. Le régime marginal de détonation est observé lorsque la taille du confinement d et la taille de la cellule de détonation λ sont semblables ; celui-ci constitue donc le régime limite de propagation de la détonation, la propagation ne peut pas s'opérer de manière stationnaire si $d \ll \lambda$.

Dans le cas d'une détonation hélicoïdale, la forme de l'onde est stationnaire par rapport au point triple et l'angle α entre l'axe du tube et les lignes de courant vaut approximativement 45° . Au contraire, dans la propagation des détonations marginales dans les géométries parallélépipédiques, cet angle n'est pas constant au cours du temps.

7.5. Détonation hétérogène/homogène

Une réaction est homogène si son explosif est homogène, et hétérogène s'il est hétérogène. La décomposition chimique de l'explosif homogène est décrite par une explosion thermique adiabatique, celle de l'explosif hétérogène par une combustion surfacique

Il existe quatre catégories de détonation hétérogène :

- Détonation hétérogène : la totalité du combustible se trouve dans les particules solides et l'oxydant dans la phase gazeuse (ou inversement mais c'est un cas peu fréquent).
- Détonation hybride : seulement une partie du combustible se trouve dans la phase solide, le reste du combustible et l'oxydant sont dans la phase gazeuse.
- Détonation gazeuse diluée par des particules : l'oxydant et le combustible sont tous les deux dans la phase gazeuse, ainsi les particules solides sont inertes.
- Détonation d'un monoergol : le combustible et l'oxydant se trouvent tous les deux dans la phase solide. Cette détonation se propage dans une atmosphère gazeuse inerte, oxydante ou réactive voire dans le vide.

8. APPLICATION AUX RISQUES INDUSTRIELS

Les déflagrations et les détonations présentent un risque important pour certaines industries qui doivent s'en prévenir afin d'éviter les accidents. Les risques liés à ce genre d'explosion sont multiples puisque, souvent, les sites en question sont à l'intérieur ou proches de grandes villes et emploient une grande quantité de personnes. A chaque fois, on observe un bilan humain et matériel très lourd dû à la grande concentration de population autour de ces sites industriels.

Il est aussi possible d'observer des phénomènes de pollution massive. La pollution massive est causée par les usines pétrochimiques qui stockent généralement des matières dangereuses pour l'environnement comme le benzène par exemple. Ainsi, à la suite d'une explosion, ces produits peuvent être lâchés dans la nature et détruire des écosystèmes en condamnant des fleuves.

De plus, le bilan matériel lié à ces catastrophes peut aller du million au milliard selon la valeur des équipements détruits, le rayon de destruction de l'explosion et les installations endommagées aux alentours.

8.1. Industries concernées

8.1.1. Usines pétrochimiques

Un des domaines les plus concernés est l'industrie pétrochimique. C'est une science, technique et industrie des produits chimiques dérivés du pétrole et du gaz naturel. Elle vise à convertir certaines des fractions de distillation (matières premières connues sous le nom de feedstocks) en produits pétroliers commercialisables. Elle se compose de trois différents types de processus qui modifient la structure moléculaire des hydrocarbures :

- Le cracking (en cassant les hydrocarbures en molécules plus petites)
- Le reformage (en les joignant les uns aux autres pour former de plus grandes molécules)
- Le remodelage des fractions (en les remodelant en molécules de plus haute qualité).

Les opérations de support ne sont pas directement impliquées dans la production des produits pétrochimiques mais établies dans un but de support (génération d'énergie, traitement des eaux usées, récupération du soufre, production d'additifs, traitement des gaz résiduels, manutention et stockage des produits).

8.1.2. Usines de stockage

L'autre domaine touché est l'usine de stockage. C'est un lieu industriel où l'on peut stocker différents produits ou matériaux bruts destinés à la vente ou à la production de produits plus développés. Parmi eux, des produits pouvant causer des explosions s'y trouvent comme les poudres, les céréales ou encore des produits chimiques tel que le nitrate d'ammonium dont on parlera par la suite.

8.2. Equivalent TNT

Pour évaluer la quantité d'énergie libérée lors d'une explosion, on utilise l'équivalent TNT (noté M_{TNT}). Energétiquement parlant, il est l'équivalent du pouvoir calorifique

L'équivalent TNT d'un mélange correspond à la masse de TNT qui, en explosant, engendrerait le même champ de surpressions que celui engendré par l'explosion d'un kg du mélange explosible considéré.

Sa valeur est donnée par la formule suivante :

$$\text{eq 13.} \quad M_{TNT} = a \times \frac{E_{gaz}}{E_{TNT}}$$

8.3. Causes

Chaque type d'entreprise présente des facteurs de dangers différents. Cependant, on observe des sources d'accidents communs, notamment la présence de gaz et de vapeurs, d'aérosols, de poussières combustibles ou de substances inflammables. Les deux principaux accidents industriels sont les incendies et les explosions. Dans le cas de notre projet, nous nous sommes davantage penchés sur les cas et facteurs d'explosion.

Une atmosphère explosive (ATEX) est le mélange avec l'air, dans des conditions atmosphériques, de substances inflammables sous forme de gaz, vapeurs ou poussières dans lequel, après inflammation, la combustion s'étend à tout le mélange non brûlé.

La formation d'une atmosphère explosive consiste à réunir six éléments. En effet, comme on peut le voir dans un triangle de feu classique, la présence d'un combustible, d'un comburant et d'une source d'inflammation est nécessaire, par ailleurs, lors de la formation d'une ATEX, l'état du combustible a également son importance puisqu'il doit être sous forme de gaz, de brouillard ou de poussières en suspension dans l'air. L'obtention d'un domaine d'explosivité (domaine de concentration du combustible dans l'air à l'intérieur duquel les explosions sont possibles) joue également un rôle dans ce processus et le confinement peut être un facteur aggravant.

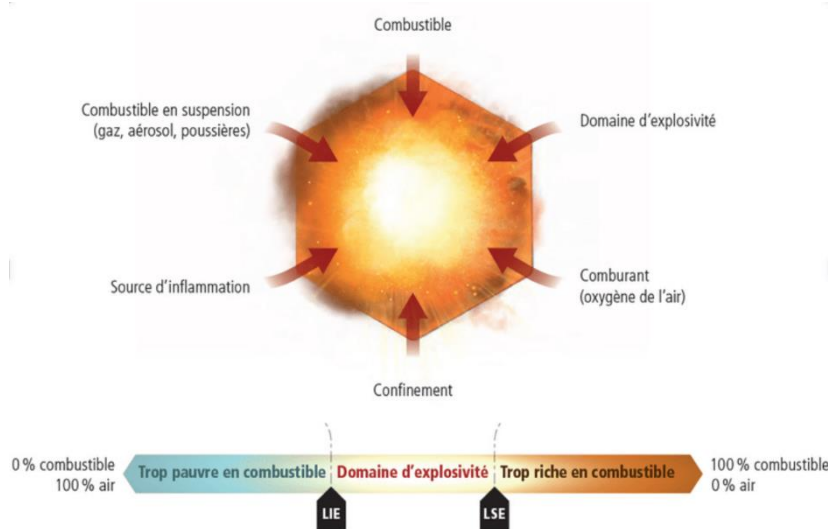


Illustration 10 : Facteurs favorables à la formation d'une ATEX

8.4. BLEVE

Pour illustrer nos propos, on peut prendre l'exemple d'un BLEVE. BLEVE est l'acronyme anglais de « Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion » qui signifie « Explosion due à l'expansion des vapeurs d'un liquide en ébullition ».

Un gaz liquéfié sous pression retourne à l'état gazeux quand la pression atmosphérique et la température sont normales, mais est habituellement stocké et transporté sous forme de liquide sous pression. Si un réservoir de gaz liquéfié sous pression se rompt, entraînant une brusque chute de pression, il peut en résulter un dégagement explosif de vapeur et de gaz liquide. C'est ce qu'on appelle le BLEVE. Le BLEVE est une explosion qui va entraîner la projection de débris du réservoir et la création d'un nuage de vapeur. La substance en cause n'a pas à être inflammable pour qu'il y ait BLEVE. En revanche, si elle l'est, on fait face aux dangers additionnels de la boule de feu et de son rayonnement thermique.

8.5. Conséquences

8.5.1. *Conséquences sur les infrastructures*

La face avant d'un bâtiment subit des surpressions de crête (pression maximale atteinte pour un phénomène). Une fois que l'onde de souffle initiale est passée, la surpression sur la face retombe à zéro. Simultanément, les faces latérales et supérieure du bâtiment sont exposées à des surpressions (qui ne sont pas réfléchies et sont donc moins élevées que sur la face avant). La surpression du souffle s'atténue sur la face avant pour résultat une « pression négative ». L'arrière de la structure n'est soumis à aucune pression jusqu'à ce que l'onde de choc ait parcouru toute la longueur de la structure et que les ondes de compression aient commencé à entourer le bâtiment. Ainsi, l'accumulation de pression n'est pas instantanée et il y a un délai entre le développement des pressions et des charges sur les faces avant et arrière. Ce délai a pour effet de causer l'action de forces de translation dans la direction de l'onde de choc.

8.5.2. *Conséquences sur l'Homme*

L'explosion reste un des mécanismes les plus traumatisants pour le corps humain. Les lésions par explosion sont classées en lésions primaires (liées à l'onde de choc), liaisons secondaires (liées à la projection de débris sur la victime) et liaisons tertiaires (liées à la projection de la victime elle-même par l'effet de souffle).

➤ Effet thermique

L'effet thermique est généré par le rayonnement thermique d'une explosion ou d'un incendie. Il est qualifié de continu pour des phénomènes de plus de deux minutes (feux de nappe, feux de solides et jets enflammés) et se traduit par un flux thermique exprimé en kW/m². Il est qualifié de transitoire quand il dure moins de deux minutes (boule de feu et feu de nuage). L'exposition peut conduire à des brûlures de la peau et des voies respiratoires.

Les phénomènes que nous étudions dans ce projet sont caractérisés par un souffle transitoire (explosion flash) suivi d'un feu continu.

➤ Effet de surpression

L'effet de surpression est généré par le souffle d'une explosion. Il est principalement caractérisé par son intensité (exprimée en mbar). Les effets de la surpression sont principalement indirects, dus à la projection de débris des vitres. Dans ces mêmes zones, les effets peuvent également être directs et provoquer des lésions aux tympans et aux poumons.

➤ Effet toxique

L'effet toxique est la conséquence du rejet accidentel de produits polluants sous forme de nuage gazeux, consécutif par exemple, à une rupture de tuyauterie, à la destruction de réservoir de stockage ou à un incendie. Il ne peut être qualifié indépendamment de la substance dispersée car les produits n'ont pas tous, à concentration égale, les mêmes effets sur l'être humain. Un nuage toxique rejeté dans l'atmosphère peut s'étendre et se déplacer sous l'effet des conditions météorologiques. Ses effets sur l'être humain dépendent de la toxicité des produits émis, de leur concentration dans l'air, et de la durée pendant laquelle la personne y est exposée.

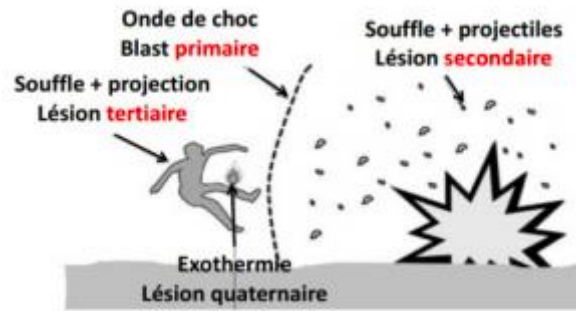


Illustration 11 : Conséquences d'une explosion sur l'Homme

8.6. Exemples d'accidents

Explosion de l'usine AZF de Toulouse, 21 septembre 2001 :

Le 21 septembre 2001 survient une explosion au sein de l'usine AZF de Toulouse qui plus tard sera qualifiée de « plus grave catastrophe industrielle d'après-guerre en France ». La cause de cet accident s'explique par le fait que 400 tonnes de nitrate d'ammonium sont entrées en contact avec un sol humide provoquant ainsi une réaction chimique extrêmement destructive. En effet, ceci a causé des dégâts dans un rayon de 4 km : des infrastructures ont été endommagées voire détruites, et les installations d'AZF se sont écroulées sous l'effet de l'explosion. Le souffle de l'explosion a causé énormément de dégâts puisque l'énergie libérée par cette explosion correspondait à celle d'un séisme d'une magnitude 3,4 sur l'échelle de Richter ou une explosion de 20 à 40 tonnes d'équivalent TNT. Cet accident entraîne la mort de 31 personnes ; par ailleurs, 4 500 personnes ont été blessées. (Voir annexe 12.3)

Catastrophe de Buncefield, 11 décembre 2005

La Catastrophe de Buncefield est une série de trois explosions survenues tôt le matin du 11 décembre 2005 au dépôt de carburant de Buncefield.

La catastrophe de Buncefield, survenue en Angleterre en 2005 est un exemple d'UVCE (Unconfined Vapour Cloud Explosion) qui va engendrer une série de 3 explosions et un incendie d'une grande ampleur suivi de maints autres incendies. Les déflagrations ont été si puissantes que l'onde de souffle générée a détruit les fenêtres des bâtiments voisins et l'explosion a été ressentie à plusieurs kilomètres de la ville.

La fuite d'un produit liquide du dépôt de carburant a engendré le processus suivant : le produit en question s'évapore en grande partie, le nuage de gaz se mélange à l'oxygène (mélange oxygène et hydrocarbures) et on est à la limite de la formation d'une ATEX mais le gaz reste tout de même dans une limite d'explosivité. En revanche, lorsque le nuage de gaz rencontre la moindre source de chaleur, il prend feu engendrant alors des incendies répétitifs. Finalement, le front de flamme se propage dans le nuage et les gaz brûlés agissent tel un piston sur les gaz frais restants dans le nuage, c'est suivant cette analogie que va être créée une onde de pression aérienne qui sera la cause de la déflagration. Quarante-trois personnes ont été blessées à la suite de la catastrophe, c'est un bilan qu'on peut qualifier de très léger au vu de l'étendue de l'explosion et de l'incendie et du nuage de fumée qui a parcouru une grande partie de l'Europe.



Illustration 12 : Image satellite du nuage de fumée traversant l'Europe

Exemple d'un accident très récent :

Explosions au port de Beyrouth, le 4 août 2020 :

En 2020, à Beyrouth, un stock de 2750 tonnes de nitrates d'ammonium explose à deux reprises. Entreposées depuis 2013 à proximité d'un entrepôt de feux d'artifices sans sécurité et surveillance adaptée, la seconde explosion (et la plus destructrice) sera comparée à un séisme de magnitude 4.5 sur l'échelle de Richter et une explosion de 1000 à 1500 tonnes d'équivalent TNT. Cet accident a fait 215 morts, 6500 blessés et 70 disparus.

8.7. Mesures de sécurité et évolution des normes

Chaque accident contribue à faire prendre conscience des dangers régnant dans les usines pétrochimiques et de stockage, l'analyse et la compréhension de ces accidents participent à l'amélioration des normes de sécurité et des directives SEVESO mises en place dans les pays de l'union européenne. En effet, celles-ci imposent aux États membres de l'Union Européenne d'identifier les sites industriels à haut risque appelés « sites Seveso », et d'y maintenir une prévention et une sécurité rigoureuse et permanente. On observe donc la mise en place de mesures visant à améliorer les outils de connaissance des risques liés aux installations industrielles et à renforcer la maîtrise de l'urbanisation autour de ces établissements à risques (loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages). Les enseignements tirés de la catastrophe de AZF ont notamment contribué à l'évolution du dispositif de gestion des situations d'urgence (Orsec) à travers la loi de modernisation de la Sécurité civile du 13 août 2004.

Afin de réguler tous ces paramètres et ces facteurs pouvant être déterminants à la formation d'une ATEX, des normes et des standards ont également été mis en place.

Norme ISO 589 : Détermination du taux d'humidité

La teneur en humidité influe sur la durée de conservation, la fonctionnalité et la qualité d'un produit. Il est donc impératif de déterminer ce paramètre avec précision pour garantir la qualité des produits dans de nombreux secteurs, notamment agroalimentaire, pharmaceutique et chimique. En outre, ce paramètre a une valeur maximale admissible et est parfois strictement réglementé. La teneur en humidité est généralement déterminée selon une approche thermogravimétrique, c'est-à-dire par perte à la dessiccation, dans un dessiccateur thermique. La dessiccation est une pesée différentielle qui va déterminer la perte de poids due à l'évaporation de l'humidité après le chauffage, séchage avec une lampe halogène.

Norme EN 14034-4 : Concentration Limite en Oxygène en sphère de 20 litres - CLO

“La CLO est le taux d'oxygène pour lequel aucune explosion n'est constatée, quelle que soit la concentration en poussières.” (d'après INERIS)

Ce paramètre est mesuré dans une chambre sphérique de 20 litres où on enflamme un nuage de poussières en enregistrant l'évolution de la pression en fonction du temps. On diminue ensuite la concentration en oxygène jusqu'à ce que l'on puisse déterminer le taux d'oxygène pour lequel aucune explosion n'est constatée, et ceci en faisant varier les concentrations en poussière. On répète ensuite l'essai deux fois afin de s'assurer de l'absence d'explosion au taux d'oxygène et à la concentration de poussière relevés.

Norme ISO 13320 : mesures des distributions granulométriques

Cette norme fournit des directives sur le mesurage des distributions granulométriques effectué dans tout système bi-phase (c'est-à-dire les poudres, pulvérisateurs, aérosols, matières en suspension, émulsions, bulles de gaz dans des liquides) et cela grâce à l'analyse de leurs motifs de diffusion de la lumière angulaire. Cependant, elle ne traite pas des prescriptions spécifiques relatives au mesurage granulométrique de produits particuliers. La plus grande partie de cette norme s'applique aux particules dont la taille est comprise entre 0,1 μm à 3 mm. La distribution granulométrique obtenue peut être différente de celles obtenues avec les méthodes fondées sur d'autres principes physiques (par exemple sédimentation, tamisage). Afin de déterminer ou non si la mesure des distributions granulométriques est bonne, on peut utiliser la méthode de diffraction laser.

Norme EN 140341

Cette norme caractérise les violences d'explosion en sphère de 20 litres à l'aide de la surpression maximale d'explosion (P_{max}) et du coefficient de violence d'explosion (K_{st}). Pour la déterminer on commence avec un essai de référence pour la détermination de la violence d'explosion. Après inflammation d'un nuage de poussières dans une enceinte close, la variation de pression est enregistrée en fonction du temps pour plusieurs valeurs de concentration moyenne de poussière. Puis, il y a répétition des essais au cours desquels P_{max} et la vitesse de montée en pression $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$ sont relevées afin de les comparer plus tard. Et pour finir, la valeur du K_{st} est calculée à partir de $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{max}$.

9. MOYENS D'ATTENUATION ET DE MITIGATION

L'atténuation d'ondes de choc peut se produire de diverses façons : par leur interaction avec la couche limite, par des instabilités dans le fluide qu'elles traversent, par la rencontre d'obstacles ou la traversée de milieux d'impédance acoustique différente.

Les collisions inter particules ou encore les transferts de quantités de mouvement et thermiques exercent une influence sur l'atténuation d'une onde de choc.

9.1. Mousse

Il existe plusieurs moyens d'atténuer les ondes de chocs. Un de ces moyens est la mousse. Le type de mousse utilisé est la mousse aqueuse. Tout d'abord, elle a un caractère diphasique, c'est à dire qu'elle est composée d'une phase gazeuse dispersée encapsulée par une phase continue liquide. De plus, elle se caractérise par la nature du gaz, la proportion entre sa phase gazeuse et sa phase liquide, sa structure géométrique et la composition de son émulseur (phase liquide). Ces mousses ont la capacité d'atténuer les ondes de chocs et de souffle et de limiter la dispersion des particules.

On peut caractériser l'influence de la phase gazeuse sur la phase liquide par la formule suivante :

$$\text{eq 14.} \quad F = \frac{V_m}{V_l}$$

Le taux de foisonnement est le volume de mousse formée par rapport au volume de solution moussante fournie. Plus de l'air est introduit, plus le taux de foisonnement est élevé. Les types de mousses utilisés pour les ondes de chocs ont un foisonnement supérieur à 20.

De nombreuses expériences ont été faites afin de prouver l'efficacité des mousses aqueuses dans l'atténuation des ondes de choc, notamment des expériences utilisant des tubes de chocs. Le tube à choc est un instrument utilisé pour simuler des explosions et leurs effets à échelle réduite.

Explicitons une de ces expériences étudiées dans la thèse d'Émilie del Prete. L'expérience se déroule donc dans un tube à choc composé d'une chambre Haute Pression (HP) et d'une chambre Basse Pression (BP) séparées par un diaphragme de rupture. Le gaz moteur contenu dans la chambre HP est mis en mouvement, ce qui va entraîner la rupture du diaphragme séparant les deux compartiments et créer une onde de choc dont le nombre de Mach varie entre 1.05 et 2 qui est observé par ombroscopie.

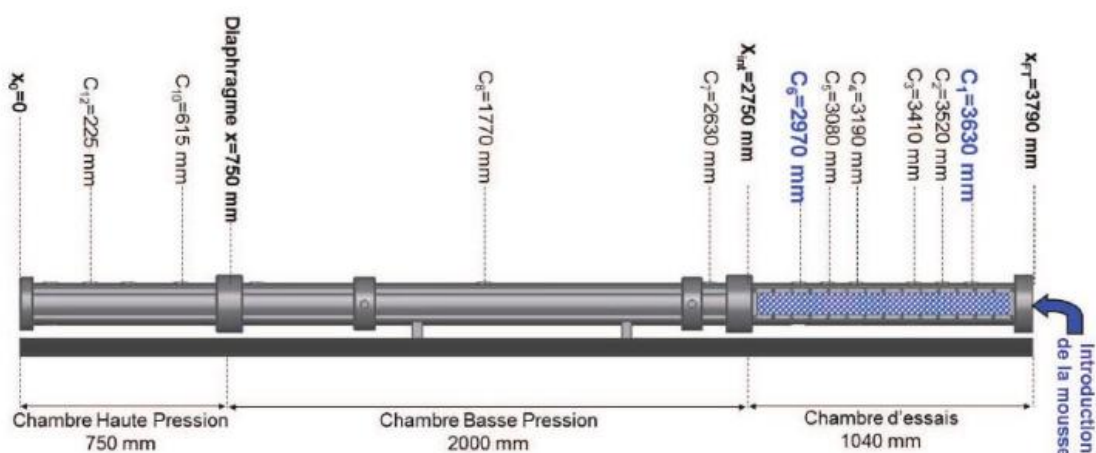


Illustration 13 : Schéma d'un tube de choc

Les signaux résultants mettent en évidence trois phases. La première phase se distingue par la présence d'un choc précurseur, qui correspond à un faible front de compression se propageant dans la mousse avant qu'elle ne se fragmente. Durant la deuxième phase, une

fois que la mousse est fragmentée, la pression augmente progressivement jusqu'à atteindre un palier : on ne parle plus d'onde choc mais d'onde de compression. Le front de compression s'étale spatialement et temporellement. La troisième phase est marquée par une décroissance en pression due à l'arrivée d'un faisceau de détonés réfléchies au fond de la chambre HP. Ce faisceau de détonés rattrape l'onde de compression incidente, induisant une diminution progressive du niveau de surpression enregistré.

Ces résultats ont ensuite été interprétés. Tout d'abord, en comparant les deux configurations (dans l'air et dans la mousse), il apparaît que l'onde de choc induit une surpression de plus forte amplitude dans la mousse que dans l'air. Cet écart se justifie par l'impédance acoustique de la mousse, c'est-à-dire sa résistance aux perturbations provoquées par l'onde la traversant, qui est plus importante que celle de l'air. De plus, on remarque de fortes différences temporelles. Cela provient de la faible vitesse du son dans la mousse. Alors que la vitesse de l'onde de choc est de $463 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans l'air en moyenne sur le tube, elle est de $133 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans la mousse à l'air, soit une réduction d'un facteur 3,5 environ.

Suite à cette expérience on obtient une courbe sur laquelle nous pouvons remarquer que la valeur du seuil est légèrement dépendante du foisonnement mais indépendante de la vitesse de l'onde incidente.

Lorsque que l'on souhaite atténuer une onde choc, il faut aussi penser à atténuer l'onde de souffle. Celle-ci est caractérisée par trois grandeurs thermodynamiques : le pic de surpression ΔP , l'impulsion positive I^+ et la pente du front de choc. Une onde de souffle divergente est propagée lors de la dissipation de l'énergie libérée par la détonation d'un engin explosif. L'onde de souffle contient 4 phases dans l'air comme représenté ci-dessous. La première phase consiste en un choc incident qui crée une surpression ΔP . Elle est suivie d'une phase de pression positive qui génère une impulsion positive qui se calcule avec la formule suivante (dont les variables sont explicitées plus loin) :

eq 15.
$$I^+ = R t_a + t^+ + t_a P(t) + P(t) dt$$

Avec pour une charge sphérique de rayon r , de masse m en équivalent TNT la distance réduite à la charge : $R = \frac{r}{m^{\frac{1}{3}}}$ et t et t_a définis selon le graphique ci-dessous.

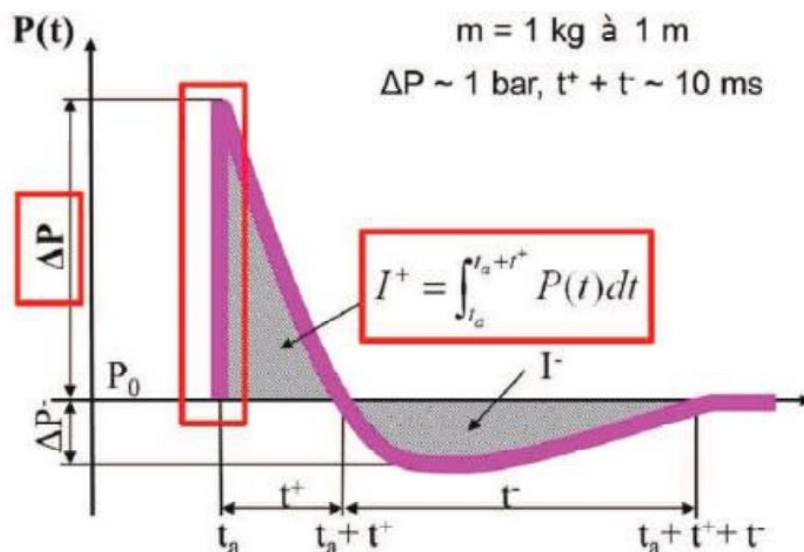


Illustration 14 : Graphique reliant les notions de temps, de pression et d'impulsion

Ensuite on a une phase de pression négative qui génère une impulsion négative I^- . Et pour finir, on a un retour à l'équilibre.

Une diminution du foisonnement de la mousse permettrait de diminuer rapidement la valeur du pic de surpression de l'onde de souffle. La mousse humide (fraction volumique liquide comprise entre 5 et 20%) est plus efficace que la mousse sèche (fraction volumique liquide supérieur à 20%) pour atténuer les ondes sonores.

D'un point de vue global, il a été démontré que le confinement par mousse aqueuse est très efficace puisqu'il permet d'atténuer l'onde de souffle très rapidement, pour une faible quantité de mousse mise en jeu. Cette atténuation est d'autant plus grande que le foisonnement est faible et la présence d'une zone d'exclusion autour de la charge explosive n'influe pas sur cette donnée, dès lors que l'épaisseur de mousse est suffisante.

9.2. Gouttelettes

Un autre moyen d'atténuer les ondes de chocs est les gouttelettes d'eau. Ce mode d'atténuation repose sur un nombre adimensionnel : le nombre Weber. Il caractérise l'influence des forces d'inerties (qui tendent à déformer le goutte) par rapport aux forces de tension de surface (qui tendent à la maintenir sphérique) pour minimiser son énergie de surface. Il est défini par la relation suivante :

$$\text{eq 16.} \quad W_e = \frac{g \times (u_g - u_d)^2 \times \varphi_d}{\sigma}$$

La goutte s'atomise lorsque le nombre de Weber atteint un seuil qui est dit critique défini à 12. L'atomisation est un processus de fragmentation durant lequel un nuage de gouttelettes mères est en tout ou partie transformée en un nuage de gouttes filles. Cela est possible lorsque la goutte mère est soumise à un champ d'instabilités aérodynamiques souvent associé à un écoulement à grande vitesse.

Il existe trois causes qui peuvent atténuer les ondes de choc : l'interaction avec une discontinuité qui la rattrape, la divergence géométrique et le processus de relaxation.

L'atténuation de l'onde de choc incidente est augmentée à la fois par l'accroissement de la concentration des particules dans le milieu qu'elle traverse et par la diminution de la taille des particules. C'est à ce moment qu'intervient l'atomisation car la fraction volumique et le diamètre des particules, en plus de l'intensité de l'onde de choc, ont une grande influence sur les zones de relaxation et par conséquent sur la propagation d'une onde de choc. Le milieu diphasique (eau et air) diminue la puissance du front de choc par l'échange de quantité de mouvement et par l'évaporation, c'est une réaction endothermique.

9.3. Event

Un événement d'explosion est un dispositif de protection passif d'une enceinte contre la surpression résultant d'une explosion à l'intérieur de celle-ci : équipant la paroi de l'enceinte, ce dispositif constitue une surface fragile, caractérisée par une pression d'ouverture suffisamment faible et une surface suffisamment grande pour qu'il s'ouvre à un stade précoce de l'explosion et qu'ainsi :

- Les gaz d'explosion et les gaz non brûlés soient déchargés à l'extérieur ;
- La surpression maximale atteinte dans l'enceinte reste inférieure à la surpression qui l'endommagerait.

Un événement est caractérisé par sa surface et sa surpression statique d'activation P_{stat} (surpression qui déclenche l'ouverture ou la rupture de l'événement), en bar.

10. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet de physique nous a beaucoup appris, tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Bien sûr, nous avons gagné en autonomie et en organisation de par la planification et la réalisation du projet en groupe.

Nous retirons de ce projet de nombreuses connaissances physiques sur les ondes de choc, notamment avec les équations régissant leur propagation, ainsi que sur les moyens d'atténuation et de mitigation. Nous avons eu l'occasion d'enrichir notre culture à propos des risques industriels et ceci sera utile dans nos projets à venir, tout particulièrement pour les personnes souhaitant s'orienter vers la maîtrise des risques.

Des projets traitant des ondes de choc avaient déjà été réalisés les années précédentes. Le nôtre avait pour particularité de tester l'emploi de la strioscopie. L'objectif était d'observer des ondes de choc. Cependant, la caméra n'étant pas assez performante, nous n'avons pas pu observer ce phénomène. Pour les projets à venir, il serait intéressant de développer cette technique d'observation, ainsi que de mettre en œuvre un code informatique pour traiter les images enregistrées par la caméra.

11. BIBLIOGRAPHIE

[1] Définition ondes de choc, explosions, lésions

https://sofia.medicalistes.fr/spip/IMG/pdf/Lesions_par_explosion.pdf

[2] Définition générale, équivalent TNT, Chapman Jouguet

https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/DEND/Documents/2006-these-trelat.pdf

[3] Définition détonation, limite de détonabilité

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/combustion/3-la-detonation/>

[4] Définition déflagration, détonation

<https://www.nato.int/structur/AC/310/pdf/nov2000.pdf>

[5] Définition des pressions

<https://www.abcclim.net/pression-statique-dynamique-totale.html>

[6] Définition et formules des pressions

<https://almeco.eu/fr/blog/la-différence-entre-pression-statique-pression-dynamique-et-pression-totale>

[7] Définition de la pression statique équivalente

https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/resistance_structures_web.pdf

[8] Définition impulsion

https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/DEND/Documents/2006-these-trelat.pdf

[9] Définition équivalent TNT, impulsion positive

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/4.pdf>

[10] Strioscopie

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-voir-invisible-strioscopie-90696/>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Strioscopie#:~:text=La%20strioscopie%20est%20une%20m%C3%A9thode,air%20ou%20d'autres%20fluides>

[11] Thèse sur les détonations galopantes et instables

https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/1706/Haloua_Frederique_PhD_1999.pdf?sequence=4&isAllowed=y

[12] Définition de plusieurs types de détonation

<https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=detonation#views-exposed-form-glossary-page>

[13] Explication BLEVE

<https://tc.canada.ca/fr/marchandises-dangereuses/bleve-reaction-prevention>

[14] Effets des accidents industriels

<https://www.ecologie.gouv.fr/risques-technologiques-directive-seveso-et-loi-risques>

[15] Définition pétrochimie

<https://www.cnrtl.fr/definition/p%C3%A9trochimie>

[16] Usines pétrochimiques

<https://www.prevor.com/fr/le-risque-de-projection-chimique-dans-lindustrie-petrochimique/>

[17] Exemple AZF

https://www.lexpress.fr/actualite/societe/justice/explosion-de-l-usine-azf-de-toulouse_1618581.html

<https://www.linternaute.com/actualite/societe/2571008-azf-a-toulouse-l-explosion-du-site-en-video-et-en-images/>

<https://www.midilibre.fr/2021/09/20/explosion-dazf-il-y-a-vingt-ans-toulouse-etait-balayee-par-une-onde-de-choc-tragique-9802271.php>

[18] Exemple Buncefiel

https://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Buncefield

[19] Exemple Beyrouth

https://fr.wikipedia.org/wiki/Explosions_au_port_de_Beyrouth_de_2020

[20] Normes ISO 13320

<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iso-133201/analyse-granulometrique-methodes-par-diffraction-laser-partie-1-principes-g/fa027119/17679#AreasStoreProductsSummaryView>

[21] Normes

<https://prestations.ineris.fr/sites/prestation.ineris.fr/files/PrestaWeb/Pages-Solution/Documents%20Associés/Fiche%20tech%20Pulvérulent%202018.pdf>

[22] Atténuation mousse aqueuse

http://www-physique-chimie.cea.fr/interaction-rayonnement-matiere/docs/6/2015/art7_Av_2015.pdf

[23] Atténuation gouttelettes

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00542871/document>

[24] Modèle de propagation de Chapman Jouguet et ZND

Thèse de Aliou Sow, « Modélisation numérique des détonations gazeuses en milieu confiné », 2014

Thèse d'Antoine Gautier, « Etude expérimentale de la propagation d'une onde de choc en milieu obstrué »

[25] Thèse d'Emilie del Prete

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790819/file/these_emilie_del_prete.pdf

12. TABLE DES ILLUSTRATIONS

Illustration de couverture

<https://www.fondation-nanosciences.fr/peut-on-survivre-a-lexplosion-dune-bombe-atomique/>

Illustration d'en-tête : Logo de l'INSA de Rouen

Illustration 1 : Diagramme de Gantt

Illustration 2 : Propagation d'une onde de choc

https://www.irsn.fr/FR/Larecherche/Formation_recherche/Theses/Theses-soutenues/DEND/Documents/2006-these-trelat.pdf

Illustration 3 : Définition de l'impulsion

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/4.pdf>

Illustration 4 : Impulsion pour une détonation

<https://www.vienne.gouv.fr/content/download/15639/101762/file/CR%20explosion%20IRIS%20-%20APSYS%20Sept%202017.pdf>

Illustration 5 : Impulsion pour une déflagration

<https://www.vienne.gouv.fr/content/download/15639/101762/file/CR%20explosion%20IRIS%20-%20APSYS%20Sept%202017.pdf>

Illustration 6 : Montage de la stioscopie effectué par le groupe 42

Illustration 7 : Observation d'un jet sortant d'une bombe à air sec

Illustration 8 : Droite de RM et courbe de C

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwirid u9yJ74AhUNbsAKHUQNCiEQFnoECCYQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.theses.fr%2F2018ESMA0002.pdf&usq=AOvVawIaukaFQzFKe4SUcRenromf>

Illustration 9 : Propagation d'une détonation à spin

<https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1114937.pdf>

Illustration 10 : Facteurs favorables à la formation d'une ATEX

<https://www.inrs.fr/risques/explosion/conditions-survenue-consequences.html>

Illustration 11 : Conséquences d'une explosion sur l'Homme

<https://www.gendarmerie.interieur.gouv.fr/pjgn/ircgn/l-expertise-decodee/sciences-physiques/les-ondes-de-choc-mettent-la-pression-aux-experts>

Illustration 12 : Image satellite du nuage de fumée traversant l'Europe

https://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_de_Buncefield

Illustration 13 : Schéma d'un tube de choc

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790819/file/these_emilie_del_prete.pdf

Illustration 14 : Graphique reliant temps, pression et impulsion

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790819/file/these_emilie_del_prete.pdf

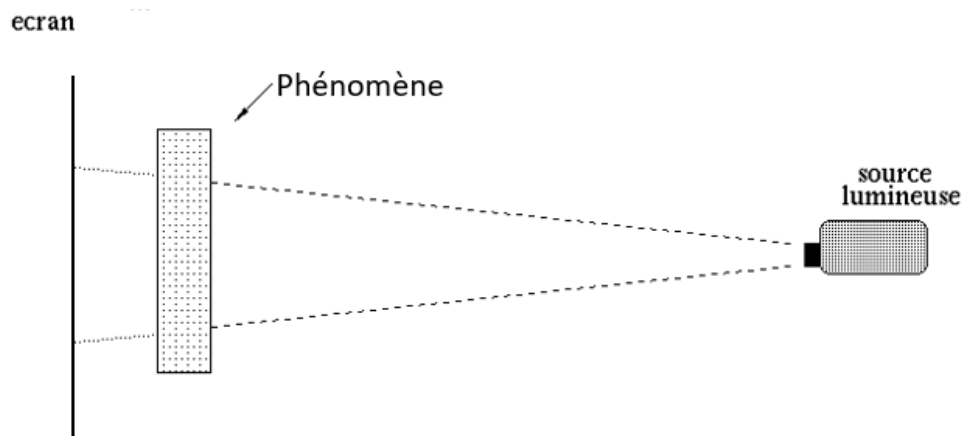
13. ANNEXES

13.1. Ombroscopie

L'ombroscopie est une alternative légèrement plus accessible à la technique de strioscopie à 1 miroir puisqu'elle nécessite moins de matériel. Cependant, le rendu à l'image sera moins net et il sera en noir et blanc (donc moins esthétique).

L'ombroscopie correspond à l'observation sur un écran de l'ombre d'un objet transparent placé dans un faisceau de lumière. En éclairant partiellement les objets traités, on observe sur l'écran des phénomènes invisibles comme la chaleur émanant d'une bougie par exemple.

L'explication de cette méthode est plutôt similaire à celle que nous avons vu précédemment.



En effet, encore une fois les variations d'indice de réfraction sont en jeu : ils viennent modifier l'onde qui sort de l'objet. Les rayons lumineux divergent là où la courbure de l'onde est dirigée vers la source. Ceux-ci vont donc se répartir plus largement que sur la surface de l'écran ce qui va entraîner une diminution de la luminosité. A l'inverse les rayons convergent lorsque la courbure de l'onde est dirigée vers le sens opposé à la source ce qui se traduit par une augmentation de la luminosité de l'écran. La caméra va donc récupérer l'ombre de l'objet et il sera alors possible d'observer le premier gradient de température (mais pas le deuxième donc cette méthode est moins précise que la strioscopie à 1 miroir).

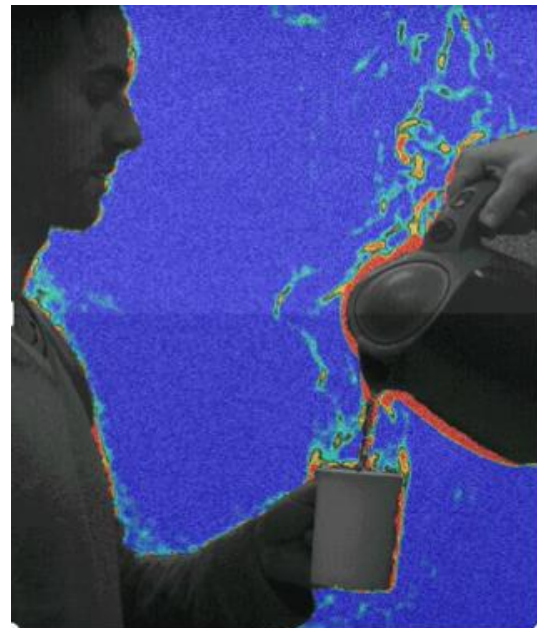


13.2. Background Oriented Schlieren (BOS)

Plus récemment, la technique BOS a été développée afin de voir de façon moins coûteuse des phénomènes bien plus grands. Cette méthode fonctionne également grâce à des différences d'indice de réfraction : en effet, en filmant un milieu dans lequel la densité n'est pas uniforme, la déviation des rayons lumineux devient la clé de nos observations puisque les indices de réfraction étant liés à la densité, sont différents. Au sein de cette méthode, l'imagerie numérique est utilisée pour faire apparaître nos phénomènes. Autrement dit, on ne pourra observer nos phénomènes invisibles qu'après les avoir soumis à une série de filtres appliqués grâce à un code informatique. Les équipements nécessaires à la mise en place de cette méthode sont : du papier moucheté, une caméra, un phénomène invisible (onde de choc, écoulement...) et un ordinateur.



Le fonctionnement de la méthode est le suivant : d'abord, la caméra reçoit une image de référence grâce à la position exacte des mouchetis imprimés sur le papier. Ensuite, la caméra va successivement recueillir des images en restant dans une position bien fixe, l'écoulement permet d'observer le déplacement de chaque mouchetis et, alors, on pourra comprendre et observer les variations de densité au niveau de notre phénomène avec le traitement numérique. Ainsi nous pouvons obtenir ce type d'image grâce à la méthode BOS :



13.3. Explosion AZF

AZF : ce qu'il se serait passé le 21 septembre 2001

Le scénario selon le rapport de l'instruction judiciaire

