

**Projet de Physique P6**  
**STPI/P6/2017 - 5 et 6**

**ONDES DE CHOC**



**Etudiants:**

**Yann BLAZERE**

**Xavier DUROSELLE**

**Anaïs DUVAL**

**Justine GLOZ**

**Guillaume LANGLOIS**

**Guillaume MERENVIELLE**

**Antoine METAYER**

**Antoine MEYER**

**Julius TRUFFIER-BLANC**

---

**Enseignant responsable du projet:**  
**Abdellah HADJAJ**



Date de remise du rapport : 19/09/2017

Référence du projet : STPI/P6/2017 – 5 et 6

Intitulé du projet : Ondes de choc

Type de projet : Bibliographique (théorique et numérique)

Objectifs du projet : Notre projet a pour but de comprendre le fonctionnement des ondes de choc en général, avec une partie dédiée à l'étude théorique et numérique du phénomène, mais aussi le rôle qu'elles ont dans chaque domaine étudié:

- Biomédical: le fonctionnement des machines à ondes de choc et leurs différents bienfaits sur le corps humain
- Aéronautique: phénomènes liés aux ondes de choc s'exerçant sur les avions à vitesse transsonique et supersonique, étude du comportement des réacteurs
- Risque industriel: explosions, effets des ondes de choc sur les structures et les moyens utilisés pour réduire l'effet des ondes

Mots-clefs du projet : Onde de choc, biomédical, aéronautique, explosion

# TABLE DES MATIÈRES

<b>NOTATIONS, ACRONYMES</b>	<b>4</b>
<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>Méthodologie / Répartition du travail</b>	<b>6</b>
<b>Travail réalisé et résultats</b>	<b>7</b>
<b>Les ondes de choc : Généralités</b>	<b>7</b>
<b>Les ondes de choc : Application biomédicale</b>	<b>12</b>
Histoire de la thérapie par ondes de choc	12
Machine à ondes de choc	13
Principe d'action de la thérapie	15
Différents domaines d'application	17
<b>Les ondes de choc dans l'aéronautique</b>	<b>23</b>
Description de l'apparition des ondes de choc	24
Description d'un phénomène particulier : les disques de Mach	27
Étude spécifique : entrée d'air des réacteurs du Concorde	29
Écoulement de l'air dans une tuyère d'un moteur fusée	32
<b>Les ondes de choc et la maîtrise des risques industriels</b>	<b>36</b>
Explosions en milieu industriel	37
Conséquences d'une onde de choc dans un environnement industriel	39
Quantification des conséquences d'une onde de choc	41
Réduction des ondes de choc	44
<b>Conclusion</b>	<b>47</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>51</b>

# NOTATIONS, ACRONYMES

VEGF : Vascular Endothelial Growth Factor

PCNA : Proliferating Cell Nuclear Antigen

eNOS : endothelial Nitric Oxide Synthase

BMP : Bone Morphogenetic Protein

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

# 1. Introduction

Au cours de notre Projet Physique, nous nous sommes intéressés au phénomène des ondes de choc et à ses différentes applications dans des domaines différents tels que l'aérospatiale, le biomédical et la maîtrise des risques industriels.

Mais qu'est-ce qu'une onde de choc ? Une onde de choc est d'abord une onde, c'est-à-dire la propagation d'une perturbation qui produit sur son passage une variation réversible des propriétés physiques du milieu, sans transport de matière mais avec un transport d'énergie.

Une onde de choc est caractérisée par une transition brutale voire discontinue des grandeurs physiques du milieu dans lequel elle se propage, telles que la température, la pression, la masse volumique et la vitesse ainsi que par une vague de haute pression accompagnant cette perturbation.

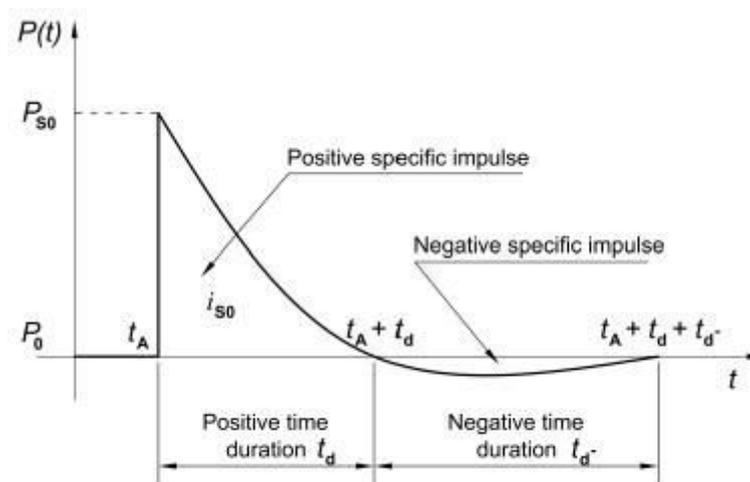


Figure 1: Typical blast wave pressure-time history.

L'onde de choc peut ainsi être considérée comme une discontinuité entre un état initial et un état choqué. Les ondes de choc peuvent être perçues par un observateur lors d'explosions ou lorsqu'un avion dépasse le mur du son, émettant un son caractéristique.

Le phénomène des ondes de choc est présent dans de nombreuses situations et a des applications dans divers domaines. Notre objectif sera donc de comprendre comment et dans quelles conditions elles peuvent se former, quels peuvent être les effets des ondes de choc, notamment sur les installations humaines, et comment il est possible d'utiliser ces ondes de choc, à des fins curatives par exemple.

## 2. Méthodologie / Répartition du travail

Le projet P6 a été réalisé tout au long du semestre 4. Nous avons travaillé dessus durant 17 semaines du 2 février au 15 juin 2017. Nous avons rendez-vous avec le professeur tous les jeudis de 9h45 à 11h15.

Pour travailler sur ce projet, nous nous sommes séparés en trois petits groupes traitant chacun un domaine d'application des ondes de choc, soit: le biomédical; l'aéronautique; la maîtrise des risques industriels.

Le diagramme ci-dessous permet de rendre compte de la répartition du travail au sein de chaque sous-groupe:

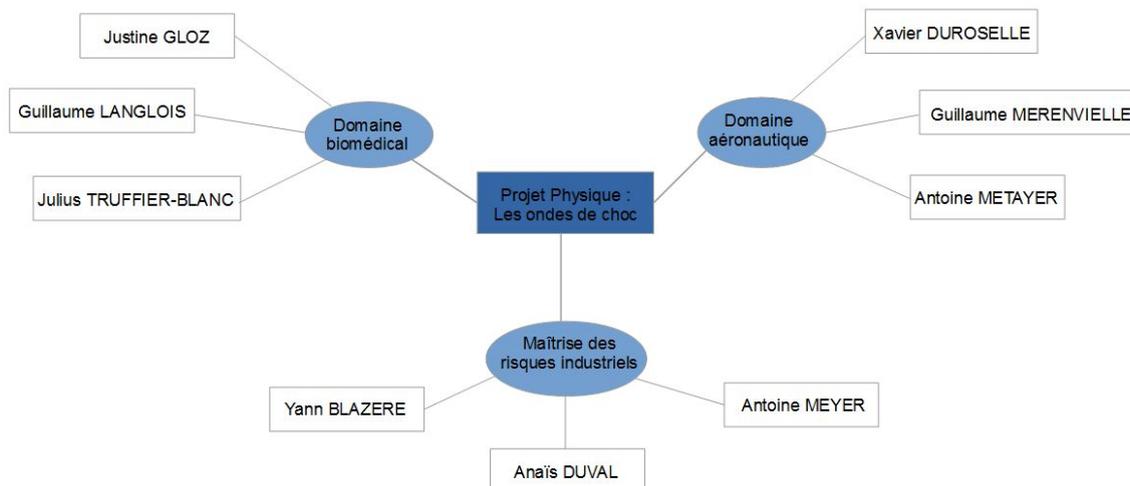


Figure 2: Diagramme de répartition du travail

Notre projet étant basé uniquement sur de la documentation et de la bibliographie, nous n'avons pas réalisé d'expérience ni de conception durant nos entrevues avec le professeur. En effet, le sujet que nous traitons ne se prêtait pas aux manipulations et aux expériences. Notre travail s'est essentiellement basé sur des documents de références d'organismes officiels, sur des thèses et autres documents scientifiques.

Les séances de travail avec le professeur consistaient à la présentation de nos recherches effectuées entre deux séances. Une personne de chacun des trois sous-groupes passait à l'oral pour présenter à l'ensemble du groupe et au professeur le travail réalisé et le support visuel qui servira à la soutenance orale. Au terme de la séance, le professeur nous indiquait les éléments à conserver, à approfondir ou à éliminer de notre rapport et de notre présentation.

# 3. Travail réalisé et résultats

## 3.1. Les ondes de choc : Généralités

### 3.1.1. Lois mathématiques des ondes de choc

Les ondes de choc et leur comportement peuvent être modélisés par différentes lois et relations mathématiques que nous allons détailler dans cette partie.

#### **Approche historique:**

La modélisation mathématique du phénomène des ondes de choc s'amorce en 1808 lorsque Siméon Denis Poisson trouve une solution discontinue aux équations aux dérivés partielles correspondantes à la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

En 1876, Ernest Mach établit le rapport entre la vitesse du mobile et la célérité du son comme étant le paramètre principal des ondes de choc, ce qui donnera le nombre de Mach.

A la fin du XIXème siècle, Rankine et Hugoniot établissent chacun les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour donner les équations de l'onde de choc droite.

#### **Approche mathématique:**

Dans la suite, on traite séparément les deux types d'ondes de chocs:

- ondes de choc droites;
- ondes de choc obliques.

Dans les deux cas, Il est possible de quantifier la discontinuité qui se propage dans le milieu correspondant à l'onde de choc à partir des équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

- **Quantification des ondes de choc droites:**

*Définition:* Dans le cas d'une onde de choc droite, le front d'onde est orthogonal à l'axe de propagation de l'onde.

Le milieu traversé par une onde de choc peut être considéré comme divisé en deux par une discontinuité d'épaisseur négligeable : le milieu se trouvant avant le front d'onde, qui correspond au milieu qui n'est pas encore choqué, et le milieu se trouvant après le front

d'onde, correspondant au milieu choqué. On y observe, sur une longueur infinitésimale, une très brusque variation des grandeurs caractéristiques du fluide.

Nous allons donc quantifier ce phénomène en étudiant les grandeurs physiques des deux milieux de part et d'autre de cette surface dite de discontinuité.

Afin de simplifier notre étude, nous supposons l'onde de choc stationnaire.

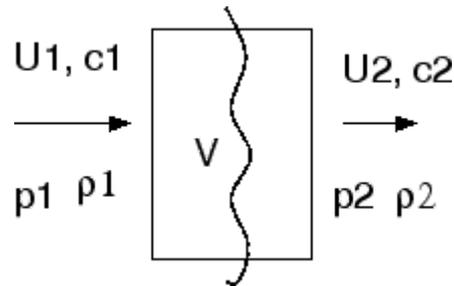


Figure 3: Propagation d'une onde de choc

Lors du passage de l'onde de choc (rencontre entre l'écoulement de fluide et l'onde de choc, pour une onde de choc stationnaire), il n'y a pas de perte de matière, ni de force extérieur qui s'applique sur le milieu. Les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement s'appliquent donc.

On note  $\rho$  : la masse volumique du milieu,  $u$  : la vitesse matérielle,  $P$  : la pression,  $h$  : l'enthalpie massique. L'indice  $_1$  correspond à l'état initial et l'indice  $_2$  correspond à l'état choqué.

- Equation de la conservation de la masse : elle provient de la conservation du débit massique à travers la surface de discontinuité considérée.

$$\rho_1 \times u_1 = \rho_2 \times u_2$$

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$P_1 + \rho_1 \times u_1^2 = P_2 + \rho_2 \times u_2^2$$

- Equation de la conservation de l'énergie : elle découle de l'application du premier principe industriel au fluide, dans le cas d'une transformation *adiabatique* et *sans apport de travail*.

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} u_2^2$$

À l'inverse, de part et d'autre d'une discontinuité, la température n'est pas continue même s'il n'y a pas d'apport de chaleur. Ainsi, une partie de l'énergie cinétique est transformée en énergie interne, l'entropie augmente donc lors du choc.

Il est également possible de quantifier ce phénomène à l'aide d'un certain nombre de relations, appelées relations de sauts, qui représentent les variations des grandeurs physiques entre les milieux se trouvant avant et après le front d'onde : les relations de saut de vitesse, de saut de masse volumique, de saut de pression, de saut d'enthalpie ainsi que

le rapport de températures.

- **Définitions préalables:**

On introduit le nombre de Mach, noté M, et défini par:

$$M = \frac{v}{c}$$

Ce terme adimensionné quantifie le rapport de la vitesse locale v d'un fluide et de la célérité c du son dans le fluide considéré.

Pour établir ces relations, on suppose que le fluide peut être assimilé à un gaz parfait. En notant  $C_p$  la capacité thermique à pression constante, et  $C_v$  la capacité thermique à volume constant, on a :  $dh = C_p dT$  et  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ . Enfin, dans le cadre de ces approximations, la vitesse du son est donnée par:  $c^2 = \gamma RT$ .

On obtient alors à partir des équations précédentes, les relations suivantes:

Relation de saut de vitesse :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{(\gamma-1)M_1^2+2}{(\gamma+1)M_1^2}$$

Relation de saut de masse volumique :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2}$$

Relation de saut de pression :

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_1^2 - 1)$$

Relation de saut d'enthalpie :

$$h_2-h_1 = \ln \left( 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_1^2-1) \right) - \gamma \ln \left( \frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2} \right)$$

Rapport des températures :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{(2+(\gamma-1)M_1^2)(2\gamma M_1^2+1-\gamma)}{(\gamma+1)^2 M_1^2}$$

Néanmoins, ces équations qui régissent le comportement des ondes de choc ne sont applicables que dans le cas, relativement restreint, où l'onde de choc est droite, c'est-à-dire normale à son sens de propagation. Nous allons donc nous intéresser maintenant au cas où l'onde de choc est oblique.

- **Quantification des ondes de choc obliques:**

Il s'agit d'ondes de choc dont la discontinuité n'est pas perpendiculaire au sens de propagation de l'onde. On peut observer des ondes de choc obliques dans de nombreuses situations, notamment lors de la réflexion d'une onde de choc droite, sur une structure inclinée par exemple.

Tout d'abord, il est à noter que la vitesse  $u$  de l'onde de choc oblique peut se décomposer en une vitesse normale  $u_n$ , orientée dans le sens de la normale à la discontinuité, et une vitesse tangentielle  $u_t$ , parallèle à la discontinuité.

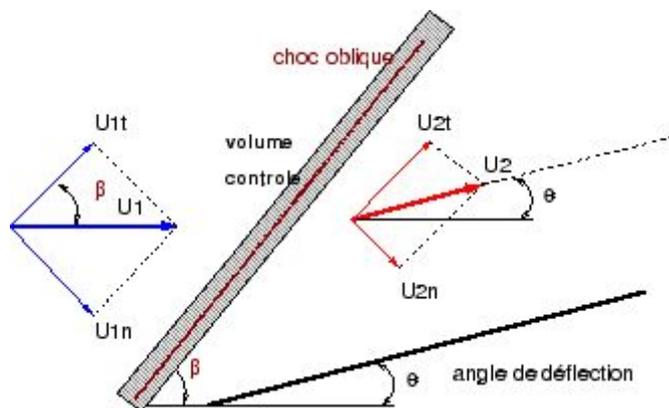


Figure 4: onde de choc oblique

Comme pour les ondes de choc droites, il est possible d'établir des équations sous forme de bilans qui permettent de modéliser mathématiquement le phénomène.

- Equation de conservation de la masse :

$$\rho_1 \times u_{n1} = \rho_2 \times u_{n2}$$

- Equation de conservation de la quantité de mouvement :
  - suivant la normale d'une part :

$$\rho_1 \times u_{n1}^2 + p_1 = \rho_2 \times u_{n2}^2 + p_2$$

- et suivant la tangente d'autre part :

$$\rho_1 \times u_{n1} \times u_{t1} = \rho_2 \times u_{n2} \times u_{t2}$$

- Equation de conservation de l'énergie:

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} u_2^2$$

soit:  $h_1 + \frac{1}{2} (u_{t1}^2 + u_{n1}^2) = h_2 + \frac{1}{2} (u_{t2}^2 + u_{n2}^2)$

On peut également établir des équations dites de saut par analogie avec le cas des ondes droites. On note  $M_{1n} = u_{1n} / c_1$

Relation du saut de température:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{(2+(\gamma-1)M_{1n}^2)(1-\gamma+2\gamma M_{1n}^2)}{((\gamma-1)M_{1n}^2)^2}$$

Relation du saut de masse volumique:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)M_{1n}^2}{(\gamma-1)M_{1n}^2+2}$$

Relation du saut de pression:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1-\gamma+2\gamma M_{1n}^2}{1+\gamma}$$

Relation du saut d'entropie:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = C_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{1-\gamma}\right)$$

## 3.2. Les ondes de choc : Application biomédicale

### 3.2.1. Histoire de la thérapie par ondes de choc

Le principe des ondes de choc a été découvert dans les années 50. Cependant, on n'en trouve des applications dans le domaine biomédical que depuis les années 80, dans le cas du traitement des calculs urinaires. Ce traitement, dont nous étudierons le fonctionnement plus tard, s'appelle la lithotritie extracorporelle. Aujourd'hui elle reste la thérapie de référence pour cette maladie qui touche encore environ 10% de la population.

Suite à cette découverte, le monde de la recherche s'est intéressé de plus près aux effets des ondes de choc sur le corps humain, et aux thérapies futures. Au début des années 90, les chercheurs se sont concentrés sur l'application des ondes de choc en ostéologie, et plus particulièrement sur les cas de retard de consolidation ou de pseudarthrose. Le terme désigne une absence de consolidation de deux fragments osseux survenant après une fracture.

En appliquant le traitement sur la zone endommagée, les scientifiques se sont aperçus que la lithotritie avait un effet bénéfique non seulement sur les os fracturés, mais aussi sur les tendons environnants (bien souvent également abîmés). Cette découverte a donc intéressé les spécialistes de la médecine du sport qui ont alors appliqué ce traitement aux tendons et aux aponévroses (membrane enveloppant les muscles ou liant les muscles aux os). Aujourd'hui, ce traitement n'est plus uniquement réservé aux sportifs de haut niveau et s'est largement démocratisé.

Résumé de l'histoire des ondes de choc :

- 1951 : Création du premier générateur d'ondes de choc (en vue d'applications cliniques)
- 1971 : Destruction de calculs urinaires par un tube à ondes de choc (théorie et tests)
- 1980 : Première application clinique au département d'urologie de l'université de Munich
- 1991 : Recherche sur la capacité des ondes de choc à favoriser la guérison des fractures, d'un retard de consolidation ou de pseudarthrose
- 1991-98 : Études sur les pathologies de l'appareil locomoteur
- Depuis 2000: Application et essais cliniques dans de nouveaux domaines tels que la cardiologie, la neurologie, l'urologie etc.

## 3.2.2. Machine à ondes de choc

Depuis leur création dans les années 90, les machines à ondes de choc ont beaucoup évolué. Elles sont devenues plus fonctionnelles pour le praticien grâce à un écran tactile, des programmes intégrés selon la pathologie à traiter et une possibilité de créer son propre programme. Cependant, elles ont un coût élevé, allant jusqu'à 10.000 euros.



Figure 5: Machine moderne

Sur chaque machine, il est possible de définir la puissance du choc qui donne naissance à l'onde en réglant la pression et la fréquence des ondes et donc le nombre d'impulsions. En général la pression varie de 1 à 5 bars, et la fréquence varie de 1 à 22 Hz selon le type de pathologie à traiter. Le changement d'embout permet également d'obtenir des ondes de choc aux propriétés différentes.



Figure 6: Différents embouts

Il existe trois types d'ondes de choc :

- R-SWT (Radial Shockwave Therapy, ondes de choc radiales)
- F-SWT (Focus Shockwave Therapy, ondes de choc focalisées)
- P-SWT (Planar Shockwave Therapy, ondes de choc planaires)

### 3.2.2.1. Ondes de choc radiales

Des ondes de choc radiales à bas niveau d'énergie (R-SWT) sont transmises dans le corps au moyen d'un applicateur mécanique.

L'applicateur est un générateur d'ondes de choc qui génère l'onde au moyen d'une masselotte à l'intérieur de l'applicateur. Cette petite masse est accélérée par de l'air comprimé. Le mouvement de la masselotte combiné à son poids accumule de l'énergie potentielle qui, lorsque celle-ci frappe une surface de contact, transforme cette énergie potentielle en énergie acoustique sous forme d'impulsions à ondes larges.

Les ondes de choc radiales ont un pic de pression bas et une durée d'émission longue. L'essentiel de l'énergie se forme à la surface de la peau. Seule une très faible partie de cette énergie pénètre les tissus plus profonds et n'excède jamais les 30 mm.

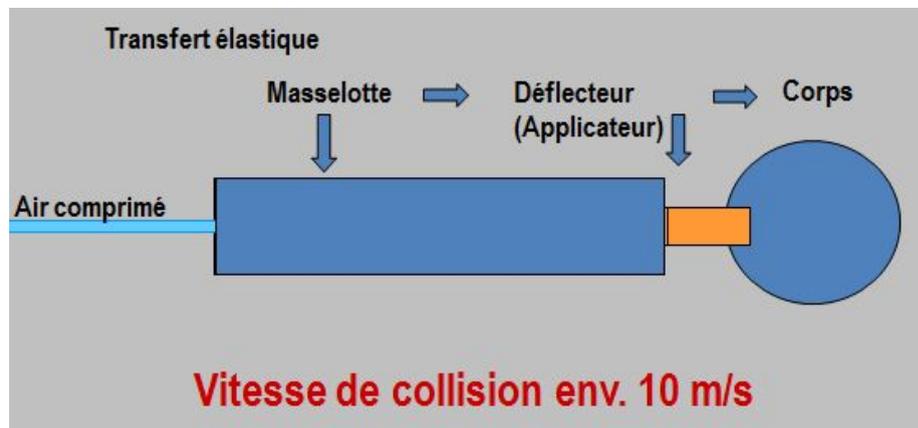


Figure 7: Procédé de formation d'une onde de choc

### 3.2.2.2. Ondes de choc focalisées

Pour les appareils générant une onde de choc focalisée, l'énergie maximum est atteinte au niveau d'un point focal spécifique du corps. Ces appareils produisent un niveau d'énergie moyen à élevé ayant une efficacité jusqu'à 125 mm de profondeur. Les ondes de choc focalisées permettent donc d'envoyer uniquement la densité d'énergie optimale en profondeur sans dégâts collatéraux.

### 3.2.2.3. Ondes de choc planaires

Les ondes de choc planaires ont une quantité d'énergie assez grande et une large zone d'efficacité. L'énergie se dissipe moins rapidement une fois au contact de la peau que les ondes radiales, mais n'a pas d'efficacité au delà de 55 mm de profondeur. De ce fait, elles sont surtout utilisées dans le traitement des troubles cutanés. Elles sont produites en utilisant la technologie F-SWT, avec l'utilisation d'un embout permettant de « défocaliser » l'onde et de la rendre planaire ce qui empêche la focalisation de l'énergie en un point. Les ondes restent parallèles tout au long de leur propagation dans les tissus.

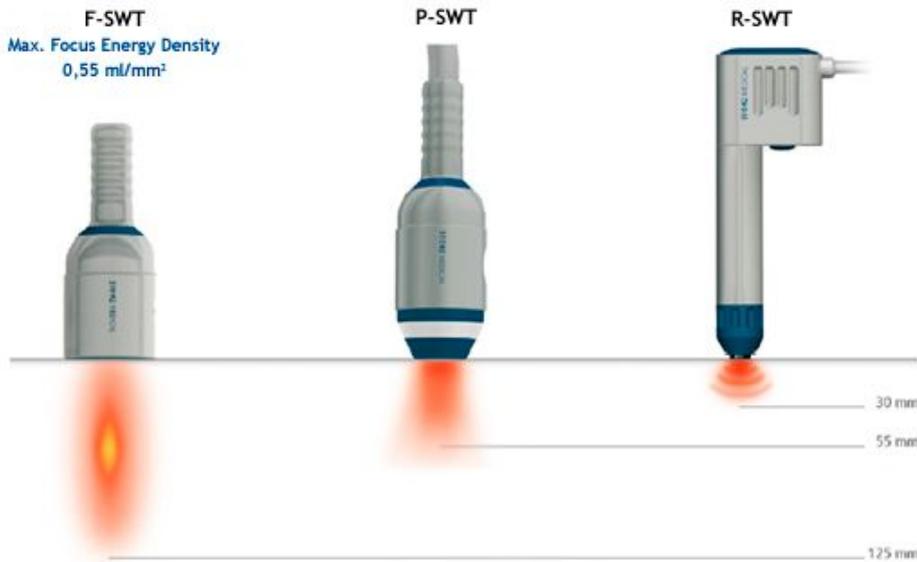


Figure 8: Les trois types d'ondes de choc

### 3.2.3. Principe d'action de la thérapie

#### 3.2.3.1. Réparation du tissu et croissance des cellules

L'application d'ondes acoustiques crée des micro-ruptures capillaires (un capillaire sanguin est un vaisseau sanguin extrêmement fin, souple et élastique, relié aux veines et aux artères) dans les tissus et les muscles, et augmente significativement la sécrétion des indicateurs de croissance (éléments pr tels que eNOS, VEGF, PCNA et BMP, utilisé dans notre corps pour réparer, par exemple, les coupures).

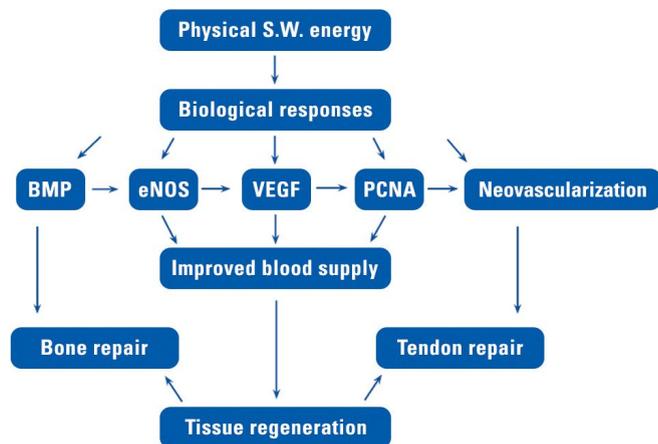


Figure 9: Effet des ondes de choc sur les tissus

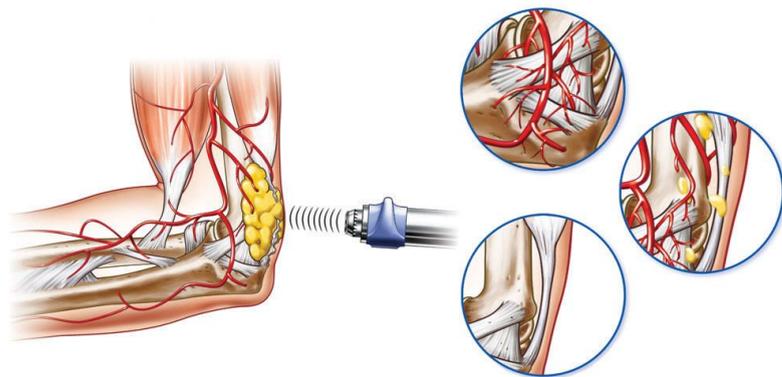
Ces deux procédés stimulent la croissance et le remodelage de nouvelles artéριοles (petit vaisseau sanguin qui naît d'une artère pour relier celle-ci à un capillaire) . Les nouveaux vaisseaux sanguins créés amélioreront ainsi l'apport sanguin et l'oxygénation résultant entraînant une guérison plus rapide du muscle.

L'activité des mastocytes (un certain type de globules blanc) , impliquées lors d'une inflammation, peut être accrue par des ondes acoustiques. L'activation des mastocytes peut être suivie par la synthèse de chémokines (petites protéines gérant le positionnement des cellules immunitaires ) et de cytokines (assimilable à des hormones elles sont impliqué dans la croissance et la maturation des cellules sanguines). Le déblocage de mélanges pro-inflammatoires, si nécessaire, peut contribuer à rétablir la guérison normale et les procédés régénérateurs.

La thérapie par ondes de choc accélère la synthèse procollagène (constituant structural de l'os, du cartilage, des ligaments et du tissu conjonctif (fibres blanches rigides des tendons)). Ainsi ces fibres de tendon nouvellement formées sont plus denses et dures.

Ainsi les ondes de chocs accélèrent la cicatrisation.

Figure 10: Procédé de réparation des tissus



### 3.2.3.2. Analgésie et réhabilitation de la mobilité

Les ondes de chocs permettent de diminuer la production de substance P ce qui à pour effet de diminuer la douleur.

La substance P est un neurotransmetteur qui sert de médiateur pour l'information de douleur via les fibres C. Cette substance est généralement associée à une douleur chronique, persistante et intense. Elle est utilisée pour relayer les messages de douleurs vers le système nerveux central. La diminution de la concentration de substance P, réduit la douleur. La diminution de la substance P, les histamines et d'autres métabolites nociceptifs contribuent aussi à inhiber le développement d'un œdème inflammatoire.

Un dépôt de calcium est présent après un traumatisme aux niveaux d'un tendons par exemple. Ceux ci ont tendance à provoquer une gêne chez le patients. Les ondes acoustiques ont ainsi pour but de briser les calcifications existantes qui seront ensuite enlevées par le système immunitaire. Les ondes de chocs accélère ainsi la disparitions de ces plaques chez le patients.

Ce type de thérapie soulage aussi les “noeuds” dans nos muscles (appelé points gâchettes). Ils sont la principale cause de douleur dans le dos, la nuque, les épaules et les extrémités. Ils sont associés à des nodules (grosseur anormale de formes arrondie) palpables en groupes tendus de fibres musculaires extrêmement contractés. La contraction est tellement forte que les muscles commencent à couper leur propre apport sanguin. Cela cause un dépôt de produits déchet (dioxyde de carbone entre autre) qui irrite la terminaison nerveuse, causant encore plus de contractions. Les effets des ondes de chocs sur ce cercle vicieux ne sont pas encore clairement prouvés. Cependant l'utilisation d'une thérapie par onde de chocs soulage les points gâchettes.

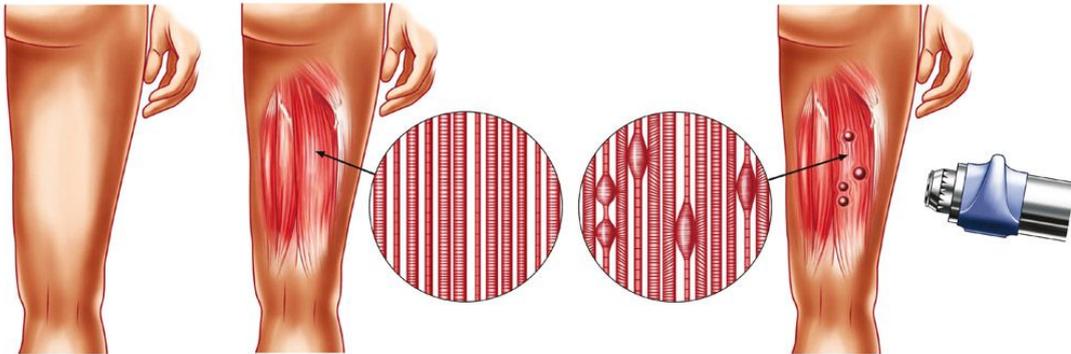


Figure 11: Effet des ondes de choc sur les points gâchette

### 3.2.4. Différents domaines d'application

#### 3.2.4.1. Traitement des calculs urinaires: Lithotritie extracorporelle (LEC)

Les calculs urinaire sont le résultat de la cristallisation de sels présents dans l'urine. Ils peuvent se former à divers endroits dans les voies urinaires, c'est-à-dire dans le rein lui-même, dans l'uretère, dans la vessie ou dans l'urètre. Dans 90 % des cas, les calculs sont aussi petits qu'un grain de sable. Ils peuvent alors passer inaperçus et sont facilement éliminés par le système urinaire. Cependant, s'ils sont plus gros, ils provoquent au niveau du dos une violente douleur, nommée colique néphrétique. Depuis son apparition dans les années 80, la LEC est le traitement le plus utilisé contre les calculs urinaires rénaux et urétéraux. Elle se fait par diffusion d'ondes de choc planaires, où l'embout qui permet de défocaliser les ondes est un ballon en caoutchouc qui se remplit progressivement d'eau au contact de la peau.

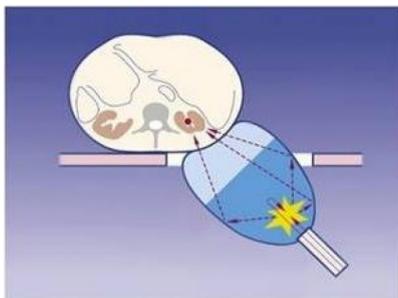
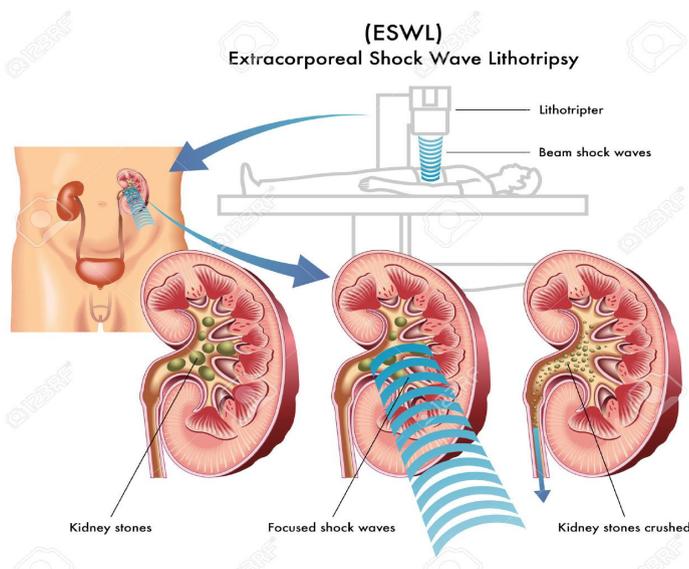


Figure 12: Embout pour la LEC



Tout d'abord le praticien effectue un repérage du calcul par radiologie ou échographie. La tête de traitement est alors installée au contact de la peau, en regard du calcul. Un gel de contact est appliqué entre le ballon et la peau. Il envoie ensuite vers le point ciblé une série de 3000 à 4000 impacts. Le calcul est alors réduit en fragments qui vont s'éliminer par voie naturelle, le plus souvent sans douleur, les jours suivants la séance.

Figure 13: Principe de la LEC

Le nombre de séances nécessaires varie en fonction de la nature du calcul, sa taille et sa localisation. Pour les calculs rénaux, le taux de succès après trois mois pour les calculs du rein est de 70 à 80 % . Pour les calculs urétéraux les résultats varient selon la taille et la localisation des calculs de 73 à 89 % après un nombre moyen de séance de 1,36.

### 3.2.4.2. Nouveau domaine d'application: la cardiologie

Les thérapies cardiaques par ondes de choc (CSWT) sont actuellement en phase d'essai clinique. Le protocole opératoire est très semblable à celui de la LEC.

L'efficacité de la CSWT a été démontrée contre des troubles comme:

- L'angine de poitrine non revascularisable
- La cardiopathie ischémique
- Le phénomène de « no-reflow » après une intervention coronarienne percutanée (ICP)
- La calcification coronarienne diffuse

Ils sont dus à des troubles du métabolisme et à une irrigation insuffisante du tissu myocardique. La CSWT permet donc de traiter ces maladies en augmentant la circulation sanguine, le débit cardiaque, l'absorption d'oxygène, le VEGF et récepteur, la densité capillaire, etc.

### 3.2.4.3. Traitement des pathologies osseuses

Dans les années 80 les scientifiques craignaient des dégâts osseux au niveau du bassin et des têtes fémorales lors de traitement de calculs vésicaux par LEC. L'effet des ondes de choc sur les os a donc été étudié. Contre toute attente, au lieu d'engendrer des dégâts sur l'os, elles ont augmenté l'ostéosynthèse osseuse. En effet, l'augmentation de pression sur l'os stimule l'ostéogénèse par la création de microfractures et une néovascularisation.

Les ondes de choc radiales sont actuellement utilisées avec succès dans les retards de consolidation des petits os. Dans le milieu du sport, elles sont également utilisées depuis plus de 15 ans sur les fractures de fatigue.

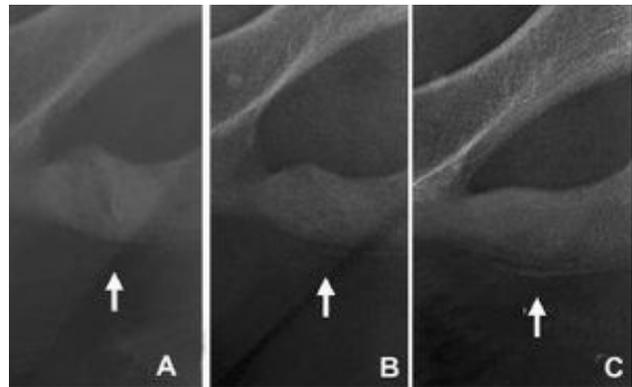


Figure 14: Fracture de fatigue avant traitement, après 1 mois puis 3 mois.

Durant la séance, le praticien envoie environ 2000 coups d'une pression allant de 2 à 3 bars et d'une fréquence entre 9 et 15 Hz. Le traitement s'étend sur 6 à 8 semaines, avec une fréquence de 1 à 2 séances par semaine.

### 3.2.4.4. Traitement des pathologies tendineuses

Dans la médecine du sport, les pathologies tendineuses peuvent être traitées par utilisation des ondes de choc radiales.

Après repérage de la zone à traiter, celle-ci est soumise à 2000 à 3000 impulsions à 2.5 bars. Généralement, 4 à 6 séances à intervalle d'une semaine sont réalisées.

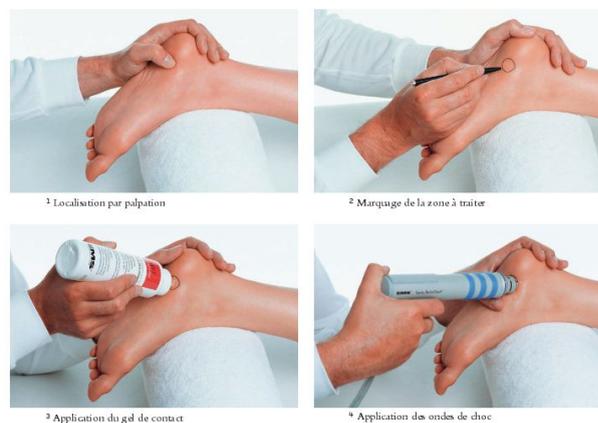


Figure 15: Protocole opératoire

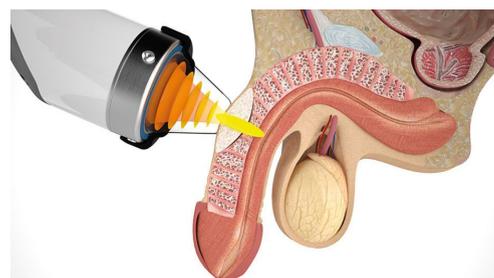
À court terme, la thérapie a pour effet la diminution des douleurs. Deux mécanismes sont responsables : la libération par l'organisme d'endorphines, et de substances inhibitrices de la douleur; et l'inhibition des stimuli neurologiques au niveau de la moelle épinière. À long terme, une action défibrosante des tissus, et une hypervascularisation sont à l'origine d'une augmentation du métabolisme local favorisant une meilleure cicatrisation. En conclusion, les ondes radiales permettent une amélioration de la qualité de vie rapide et cicatrisation totale au bout de 6 semaines. Ce traitement est considéré comme efficace avec un taux de réussite entre 70 et 80%.

### 3.2.4.5. Nouveau domaine d'application: l'urologie

Les ondes de choc focalisées permettent désormais un traitement de la dysfonction érectile d'origine organique (DE), de la maladie de La Peyronie (IPP) et du syndrome de douleurs pelviennes chroniques (CPPS).

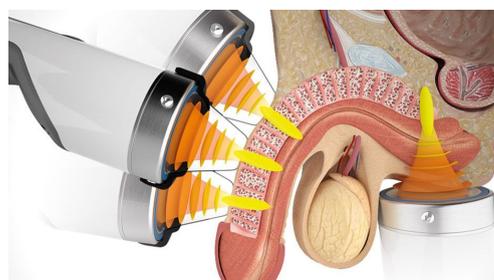
La dysfonction érectile (DE) désigne un trouble sexuel qui empêche d'avoir ou de maintenir une érection suffisante pendant une durée prolongée malgré l'excitation sexuelle. Dans la plupart des cas, elle s'explique par des causes physiques, notamment les problèmes vasculaires. Dans le cadre de la thérapie de la DE, des ondes de choc sont appliquées à une faible intensité sur différentes zones de traitement du pénis et la région périnéale.

Les ondes entraînent une néovascularisation et permettent une amélioration de la fonction sexuelle.



amélioration de la  
*Figure 16: Traitement*

Par Induratio Penis Plastica (IPP), ou maladie de La Peyronie, on entend une maladie généralement évolutive du pénis. La maladie se remarque souvent par l'identification de durcissements, les plaques. Ensuite, elle provoque des douleurs et une déviation du pénis en érection. Ce trouble entrave voire empêche les rapports sexuels. Les ondes contribuent à l'élimination de la plaque, stabilisent la courbure du pénis et inhibent les douleurs.



*Figure 17: Traitement IPP*

Le syndrome de douleurs pelviennes chroniques (CPPS) se caractérise par des douleurs ressenties dans la région du bassin. Il présente également d'autres symptômes, comme des troubles de la miction sans infection avérée des voies urinaires. Pour une partie des patients, il entraîne également des troubles de la fonction sexuelle. Pour le CPPS, l'utilisation des ondes de choc s'effectue dans la région périnéale: la musculature du plancher pelvien et la prostate sont traitées. Ce traitement permet une amélioration significative des douleurs, des troubles de la miction et des fonctions érectiles. *Figure 18: Traitement CPPS*



#### 3.2.4.6. Nouveau domaine d'application: la neurologie

Depuis 2014, les essais en rééducation neurologique dans le traitement des lésions cérébrales et des maladies nerveuses donnent des résultats encourageants. Des études ont pu démontrer que le traitement par ondes de choc permet une amélioration de la motricité, l'atténuation des douleurs dans de nombreuses pathologies, ce qui se traduit par une amélioration notable de la qualité de vie. Par ailleurs, le recours à la thérapie par ondes de choc ouvre d'autres possibilités de traitement des paralysies après attaque des patients Alzheimer et Parkinson.

#### 3.2.4.7. Dermatologie esthétique

Dans le domaine de l'esthétique, les ondes de chocs sont utilisées dans le traitement de la cellulite, les vergetures et le relâchement cutané. Ce traitement peut s'appliquer au corps et au visage.

##### Traitement du corps:

L'utilisation combinée des ondes de chocs planaires et radiales permet de réduire la cellulite à la surface de la peau. En effet, les ondes planaires à haute intensité permettent de défibrer les zones cellulitiques et donc d'améliorer la circulation, les échanges cellulaires et ainsi réduire le volume des adipocytes (cellules graisseuses). Les ondes de choc radiales de faible intensité sont utilisées à la surface de la peau pour réduire la cellulite et donner un meilleur aspect visuel à la peau.

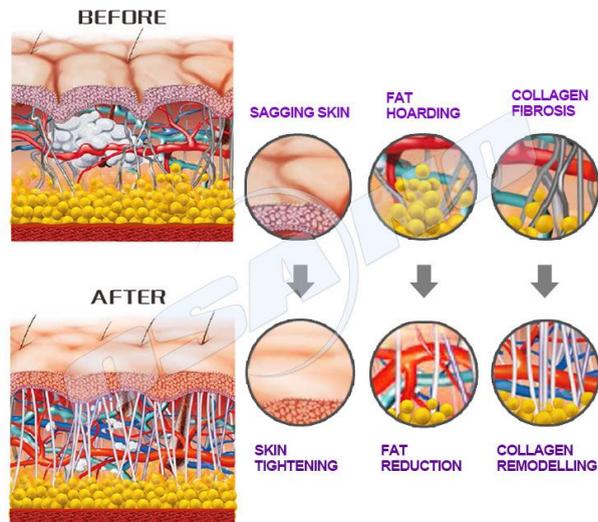


Figure 19: Effets des ondes de choc sur la cellulite

#### Traitement du visage:

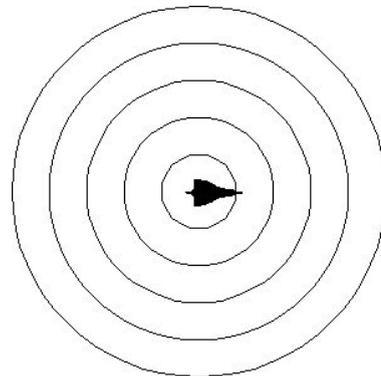
Sur le visage, l'utilisation des ondes radiales permettent de réduire les rides et de redonner à la peau son élasticité naturelle. Cette technique permet une meilleure circulation sanguine et un assouplissement du tissu conjonctif. La production de collagène est stimulée, et a pour conséquence le raffermissement du derme et de l'épiderme.

## 3.3. Les ondes de choc dans l'aéronautique

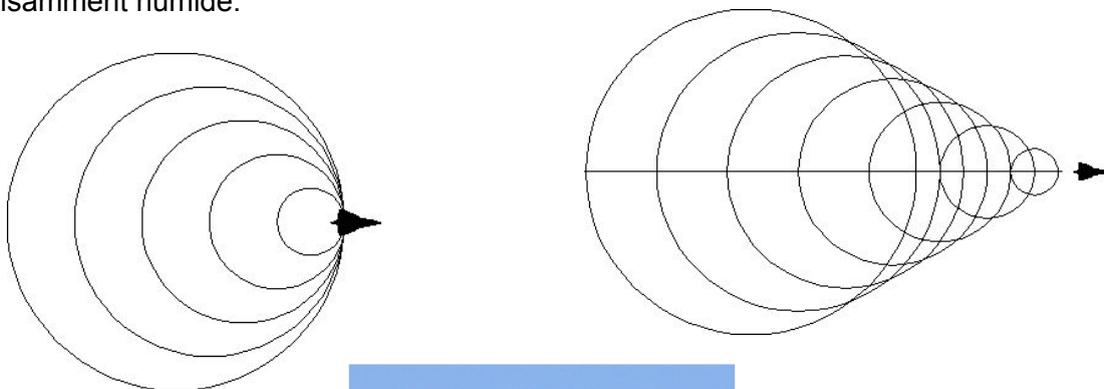
### 3.3.1. Partie introductive

La manifestation la plus connue des ondes de chocs dans le domaine de l'aéronautique est le 'bang' supersonique parfois accompagné d'un nuage lorsqu'un avion franchit le mur du son.

Lorsqu'un avion se déplace dans l'air, il génère des ondes de pression qui s'éloignent de lui comme les ronds dans l'eau. Ainsi, lorsque la vitesse de l'avion est très inférieure à Mach 1, les ondes se propageant à la vitesse du son sont bien plus rapides que l'avion et elles se propagent tout autour de lui.



Au fur et à mesure que l'avion se rapproche de Mach 1 ( $M_1$ ), les ondes qui se déplacent dans le même sens que lui (vers l'avant), ont de plus en plus de mal à le distancer. Une fois que l'avion a atteint  $M_1$ , il rattrape les ondes qu'il émet. De ce fait ces dernières s'accumulent sur le nez de l'avion, créant une grande pression. Elles provoquent aussi des vibrations et une augmentation de la traînée. C'est ce que l'on nomme couramment le mur du son. Lorsque l'avion vole à  $M_1$ , un nuage peut se former autour de l'avion. Il est dû aux changements de température et de pression de l'air en aval des ondes de choc. Ces dernières provoquent une forte détente et une baisse de la température, entraînant une condensation de la vapeur d'eau si l'atmosphère est suffisamment humide.



Quand l'avion a franchi le mur du son, les ondes de choc accumulées au niveau du nez de l'appareil se libèrent et forme un cône de mach. Ce cône est l'unique zone où l'on peut entendre le "bang". C'est pour cette raison que le pilote n'entend pas le 'bang' car il est situé à l'intérieur du cône. En fonction de la vitesse de l'avion, ce cône prend une forme différente : plus l'avion vole rapidement et plus le cône est étroit. Son angle peut être

déterminé par la relation :

$$\sin(\text{angle}) = \frac{v_{son}}{v_{avion}}$$

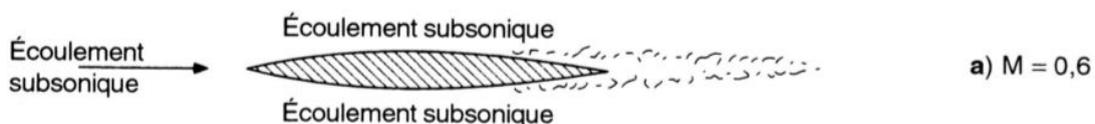
Le mur du son était connu des pilotes avant même d'avoir été franchi. En effet, beaucoup d'avions qui n'étaient pas conçus pour voler à de telles vitesses furent détruits en plein vol. De plus certains pilotes ont également perdu le contrôle de leur appareil en s'approchant de M1. Nous allons voir quelles contraintes imposent les ondes de chocs à la structure de l'avion, et quelles méthodes, aussi bien pour la structure que pour la motorisation les constructeurs ont mis en place pour faire voler des avions à des vitesses bien supérieures à celle du son.

### 3.3.2. Description de l'apparition des ondes de choc

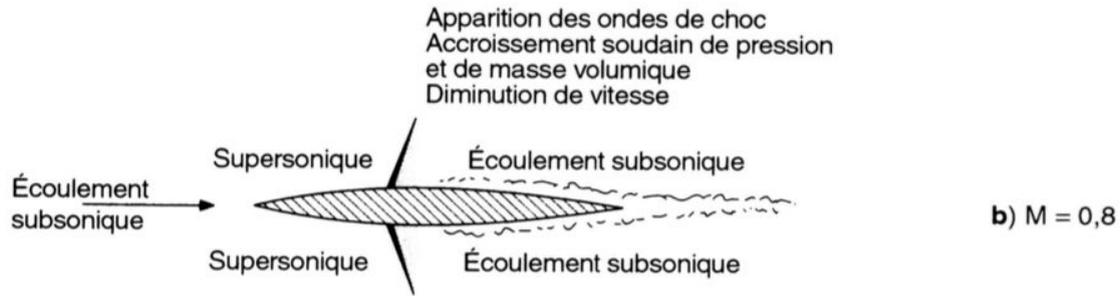
Lorsque la vitesse d'un avion devient égale à celle du son ( $M \approx 0.6$ ), le premier phénomène visible est la transformation, en un point donné, du régime laminaire (toutes les particules du fluide se déplacent dans la même direction) en régime turbulent. L'onde de choc apparaît au niveau du point de cambrure maximal, car c'est ici que l'écoulement est le plus accéléré. Cette apparition de l'onde de choc est due à la différence d'écoulement entre l'avant (bord d'attaque) et l'extrados de l'avion, comme l'explique le schéma ci-dessous. Il y a alors, juste derrière l'onde de choc, une augmentation soudaine de pression, de température et de masse volumique, ainsi qu'une chute de la vitesse d'écoulement de l'air.

Les différents schémas ci-dessous illustrent l'apparition progressive des ondes de choc autour d'un avion qui passe le mur du son. Nous allons vous expliquer chaque étape, représentée par un des schémas.

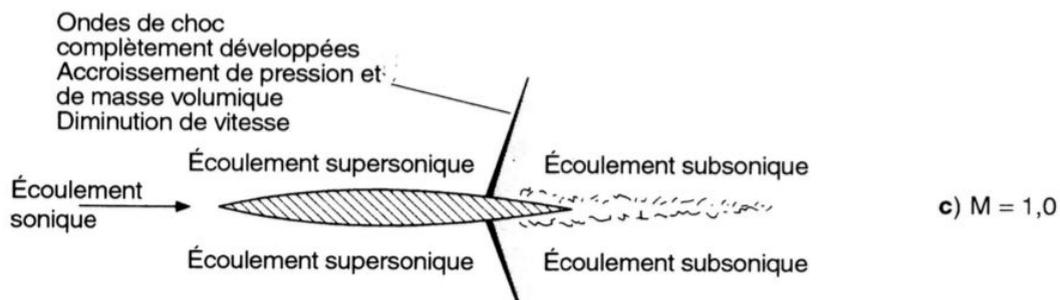
M = 0.6 : L'avion est à vitesse subsonique.



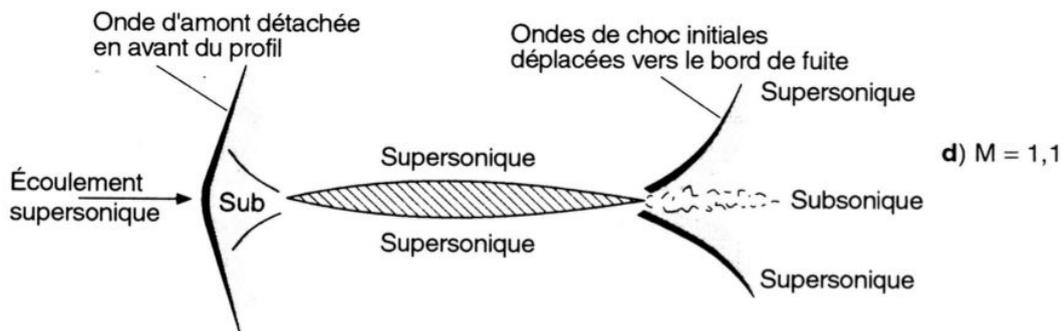
M = 0.8 : L'écoulement devient supersonique à l'avant de l'avion, à la fois sur l'extrados et l'intrados, ce qui entraîne l'apparition simultanée de deux ondes de choc, quasiment orthogonales à l'avion, très proches du point de cambrure maximal de la coque.



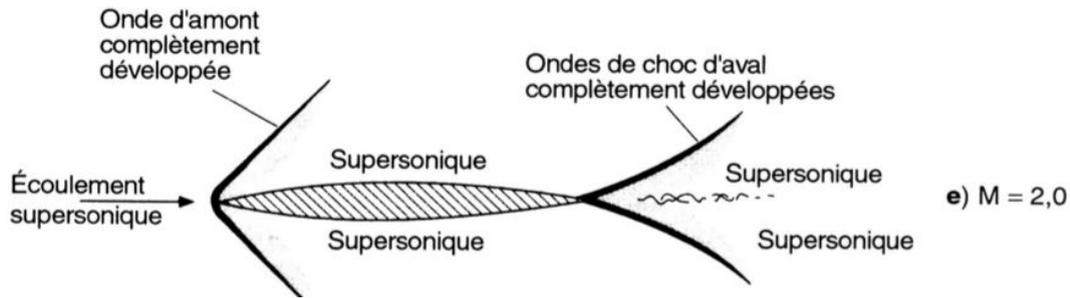
$M = 1.0$  : Les ondes de choc sont maintenant complètement développées. Plus la vitesse de l'avion augmente, plus celles-ci se déplacent vers l'arrière (bord de fuite) de l'avion et deviennent fortes et longues. Ainsi, les turbulences au niveau du bord de fuite deviennent également plus violentes.



$M = 1.1$  : Une "onde d'amont" (détachée) apparaît à l'avant de l'avion. Elle a une vitesse légèrement supérieure à celle du son. Dans le même temps, les ondes de choc initiales sont déplacées jusqu'au bord de fuite et s'incurvent pour former ce que l'on appelle une "onde d'aval".



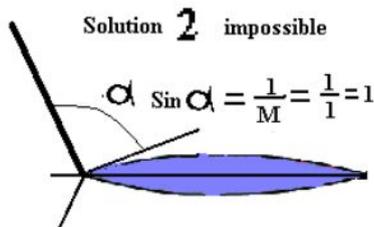
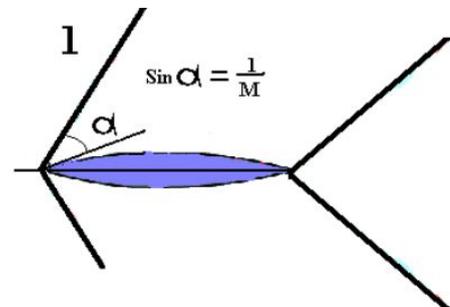
$M = 2.0$  : Lorsque la vitesse augmente encore, l'onde d'amont, dont la vitesse se fait "rattraper" par celle de l'avion, s'attache au bord d'attaque. Les ondes d'aval s'inclinent davantage vers l'arrière. Les ondes de choc d'aval et d'amont sont alors complètement développées.



Nous avons trouvé une formule expliquant concrètement le fait que les ondes s'inclinent vers l'arrière avec l'augmentation de la vitesse :

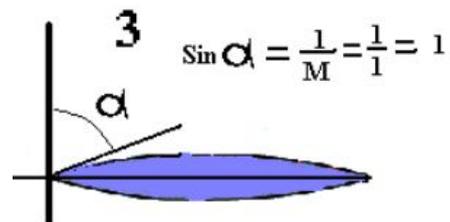
$$\sin(\alpha) = \frac{1}{M}$$

où  $\alpha$  est l'angle représenté sur la figure (1). Cette formule est cependant ajustée pour respecter le sens physique. En effet, étudions le cas où  $M = 1$ . D'après la



formule, on a  $\sin(\alpha) = 1$ , et donc  $\alpha = 90^\circ$ . Cependant, l'onde de choc ne peut absolument pas se propager en avant du profil (elle ne peut aller plus vite que l'avion qui est à Mach 1). La solution représentée en figure (2) est donc impossible. on aurait  $\alpha = 90^\circ$  uniquement

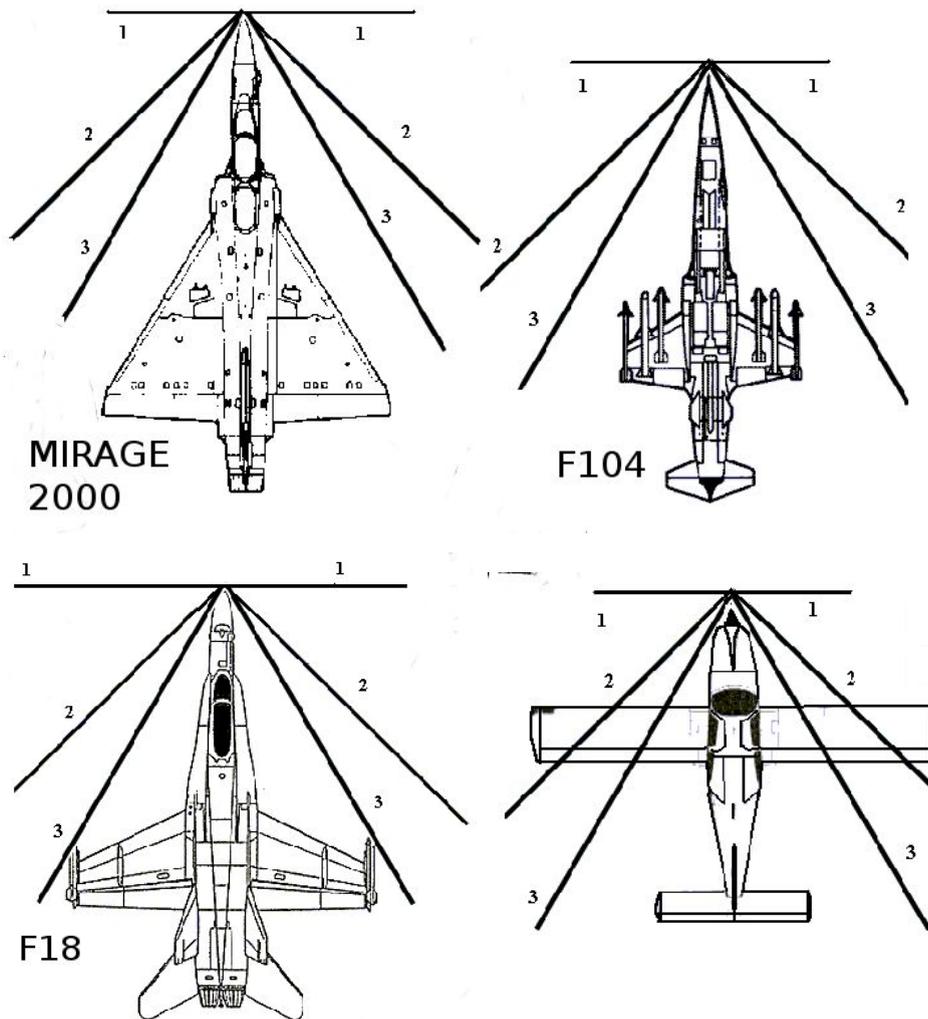
sur un profil parfaitement plat et sans épaisseur. Pour toutes les autres situations, l'onde de choc se présentera comme sur la figure (3) (à Mach 1, sous la forme d'une onde normale), et restera comme cela jusqu'à ce que l'angle  $\alpha$  diminue en dessous de la valeur de ce cas (3), avec l'augmentation de la vitesse.



Ces ondes de choc, qui sont ainsi d'autant plus inclinées que la vitesse est grande, conduisent à des spécifications dans la conception des avions destinés à voler à de très hautes vitesses. En effet, le cône de Mach formé par ces ondes ne doit pas se heurter aux ailes de l'avion. Plusieurs solutions sont possibles pour éviter cette "collision" :

- Donner à l'aile une forte flèche comme sur le mirage 2000 ;
- Donner à l'aile une petite envergure comme sur le F104 ;
- Reculer l'aile tout à l'arrière de l'avion comme sur le F18 ;

Sur les images ci-dessous, les lignes 1, 2 et 3 correspondent respectivement aux lignes d'ondes de choc à Mach 1, Mach 1.4 et Mach 2. La dernière image représente un avion de tourisme. On voit bien sur le schéma que celui-ci ne pourra pas voler à des vitesses supersoniques.



### 3.3.3. Description d'un phénomène particulier : les disques de Mach

Ce qu'on appelle les « disques de Mach » est un phénomène qui se forme lorsque les gaz supersoniques sortant de la tuyère des réacteurs sont légèrement sur-expansés ou sous-expansés (leur pression est supérieure ou inférieure à celle de l'air ambiant). Ces gaz sont généralement sous-expansés à basse altitude (où la pression ambiante est plus importante) et sur-expansés à plus haute altitude .



Une compression ou expansion du gaz se forme alors, et une onde de choc est créée lorsque le débit d'air comprimé devient parallèle à la « ligne médiane » de l'écoulement. Cette onde, perpendiculaire à l'axe d'écoulement, est une onde de choc normale, et sa formation correspond au premier disque de Mach. La zone située entre la tuyère et le premier disque de Mach est appelée «

zone de silence ».

$$x = 0.67D_0\sqrt{\frac{P_0}{P_1}}$$

La largeur de cette zone est donnée par une relation :  
 le diamètre de la tuyère,  $P_0$  la pression de l'écoulement et  $P_1$  la pression atmosphérique.

A la sortie d'une tuyère pour un fluide sous-détendu, le fluide peut être plus ou moins comprimé en fonction du NPR (Nozzle Pressure Ratio) qui est défini par le rapport entre la pression à l'orifice de la tuyère et la pression ambiante:

$$NPR = P(\text{orifice})/P(\text{ambient})$$

En fonction de la valeur du NPR on obtient différente propagation de l'onde de choc :

1. Si le NPR est compris entre 1.1 et 2 alors le fluide est trop faiblement sous-détendu et les ondes de chocs se propagent obliquement. Cette structure est appelée "EN diamant".
2. Si le NPR est compris entre 2 et 4, le fluide est assez sous-détendu pour générer une onde de choc droite qui sera le disque de Mach. Le fluide à la sortie du disque de Mach aura alors une vitesse subsonique et n'entraînera pas de nouveau disque de Mach.
3. Si le NPR est compris entre 4 et 10 alors le fluide est assez sous-détendu pour générer le premier disque de Mach. Le fluide derrière ce premier disque de Mach est alors suffisamment accéléré pour repasser en vitesse supersonique ce qui entraînera la création d'un nouveau disque de Mach et ainsi de suite.
4. Si le NPR est supérieur à 10 alors le premier disque de Mach est assez puissant pour que le fluide en aval du disque retrouve une structure en diamant comme dans le cas numéro 1.

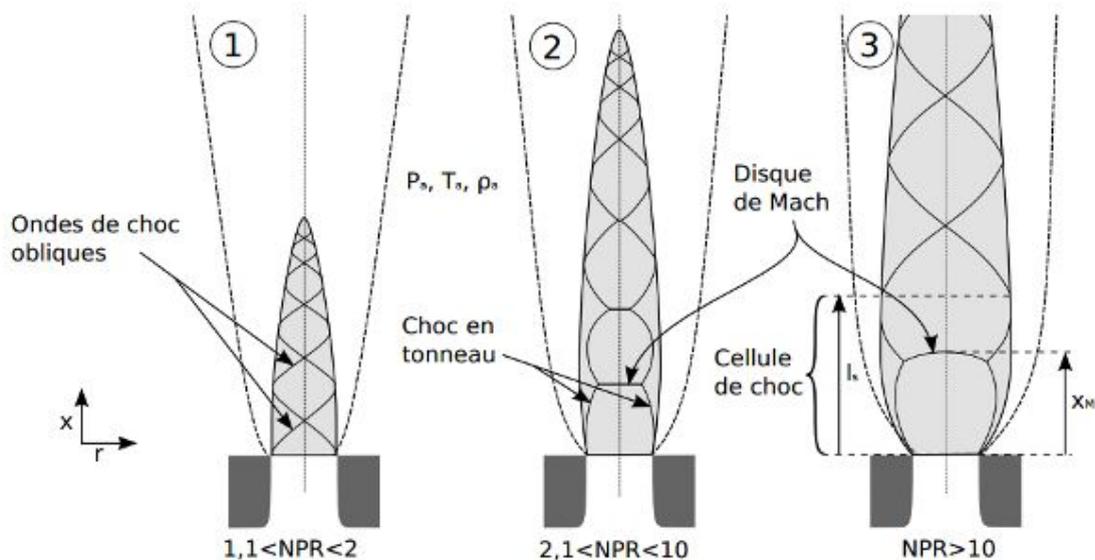
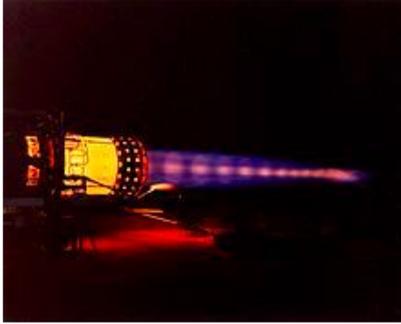


FIGURE 4.3 – Évolution de la structure compressible en champ proche d'un jet sous-détendu



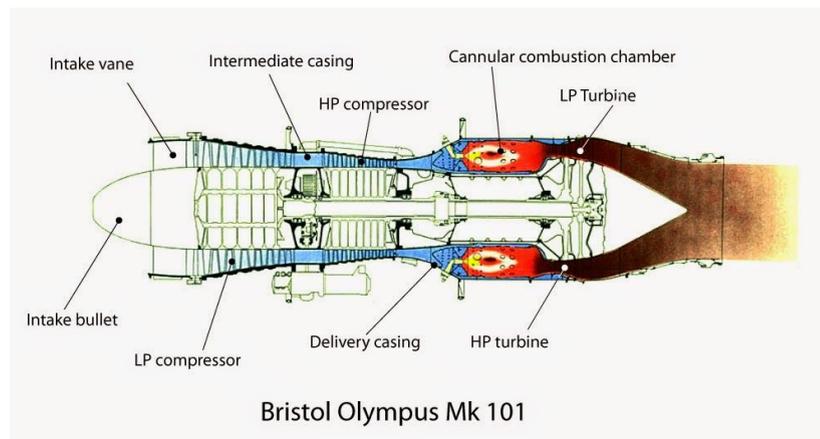
Lorsque l'écoulement traverse l'onde de choc normale, il y a augmentation de la température et de la pression. L'augmentation de la température provoque un enflamment du carburant en excès. C'est d'ailleurs de cet enflamment que provient la lueur vive que l'on appelle « disque de Mach ». L'augmentation de la pression (compression du gaz), quant à elle, engendre une dilatation lorsque cette pression descend en-dessous de la pression de l'air ambiant. Cette dilatation implique un ensemble d'ondes d'expansion que l'on appelle «

ventilateur d'expansion ». Ces ondes se propagent vers l'extérieur jusqu'à se refléter sur le bord externe de l'écoulement, et ainsi former, cette fois, un « ventilateur de compression ». Si cette compression est assez forte, une autre onde de choc oblique se forme et ainsi un nouveau disque de Mach. Cela se répète jusqu'à ce qu'un ventilateur de compression soit trop faible pour créer une onde de choc supplémentaire. La diminution de la force des ventilateurs de compression est due au caractère non parfait des gaz en présence, et des frottements. En effet, avec des gaz parfaits et sans frottements, les disques de Mach se prolongeaient à l'infini, ce qui n'est pas du tout le cas en réalité.



### 3.3.4. Étude spécifique : entrée d'air des réacteurs du Concorde

Pour réaliser cette étude nous allons dans un premier temps comprendre comment fonctionne un réacteur et plus particulièrement un réacteur post combustion. Ensuite, nous étudierons les différentes positions des entrées d'air des réacteurs pour chaque régime de vol.



### 3.3.4.1. Fonctionnement du réacteur

L'air entre par l'entrée d'air du réacteur, traverse un compresseur basse pression, puis un compresseur haute pression. L'air comprimé est ensuite mélangé à du carburant puis brûlé dans la chambre de combustion. Ce mélange est accéléré par une tuyère puis éjecté vers l'arrière à grande vitesse, ce qui engendre de la poussée. Dans le cas d'un réacteur post combustion, le mélange peut être de nouveau enflammé dans la chambre de post combustion, ce qui a pour effet d'augmenter la poussée.

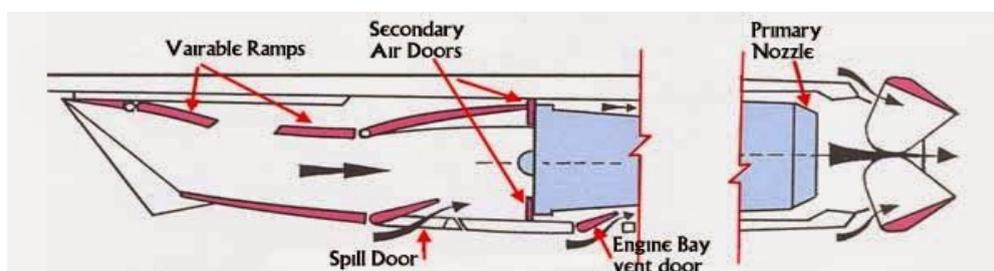


Les réacteurs du concorde sont de type subsonique (comme tous les turboréacteurs). Ils ne peuvent donc se satisfaire d'un écoulement d'air à vitesse supersonique, qui peut rendre le moteur instable et l'endommager. Des dispositifs ont été mis en place pour que la vitesse de l'air entrant dans le réacteur soit toujours subsonique qu'elle que soit la vitesse de l'avion. Ces derniers sont adaptés pour le vol à Mach 2, mais également à des vitesses intermédiaires. C'est pour cela qu'ils sont à géométrie variable afin d'obtenir, dans tous le domaine de vol de l'appareil, un rendement optimum. Ainsi l'entrée d'air à géométrie variable est composée d'une rampe avant et d'une rampe arrière qui sont rétractables en fonction du régime de vol. On retrouve aussi des portes secondaires et une entrée auxiliaire.

Nous allons à présent étudier la géométrie des entrées d'air des réacteurs du concorde en fonction du régime de vol.

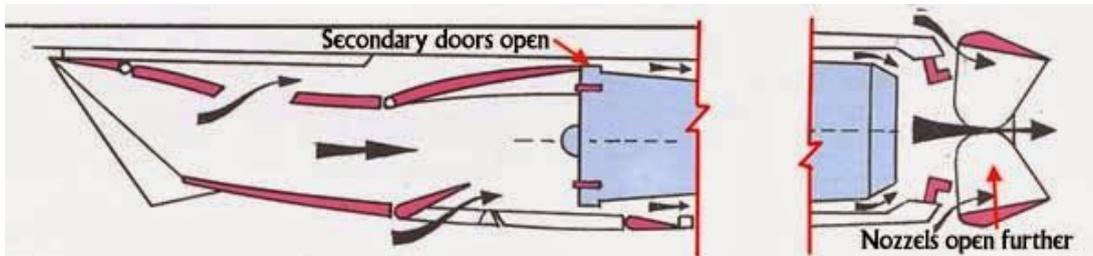
### 3.3.4.2. Au décollage

Au décollage, le réacteur a besoin d'un flux d'air le plus important possible pour pouvoir développer un maximum de poussée. C'est pourquoi les rampes sont complètement rétractées pour que l'entrée soit la plus grande possible. De plus les trappes secondaires situées à l'arrière sont fermées et la vanne auxiliaire d'admission est ouverte. Cette vanne secondaire située sous la nacelle est maintenue ouverte grâce à la dépression créée à l'intérieur de la nacelle à ce moment du vol. Elle commence à se fermer lorsque l'appareil se rapproche de Mach 1, et se ferme complètement à Mach 0.93.



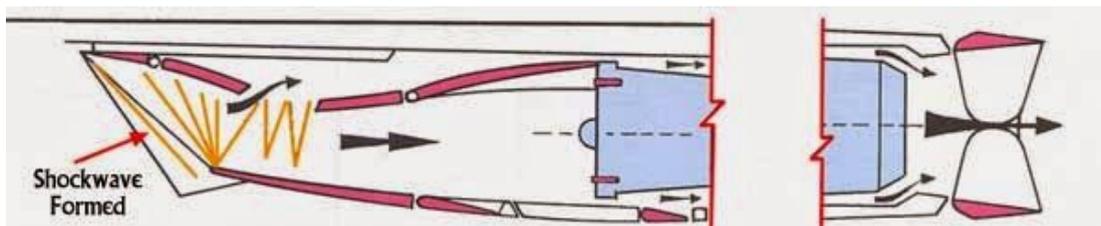
### 3.3.4.3. À vitesse subsonique

Peu de temps après le décollage, l'avion entame la procédure de réduction du bruit. Pour se faire, l'équipage coupe la post combustion et réduit la puissance des réacteurs. Les trappes secondaires sont ouvertes pour permettre à une plus grande quantité d'air d'entrer. Ce flux se contente de contourner le moteur ce qui réduit l'agitation des gaz d'échappement.



### 3.3.4.4. A vitesse supersonique

Dans la phase de vol supersonique, grâce à sa géométrie variable, les rampes mobiles d'admissions sont déployées et obstruent en partie l'entrée d'air du réacteur. Ainsi, cette dernière génère un faisceau d'ondes de chocs. Elles ont pour effet de réduire la vitesse du flux d'air capté mais également d'en augmenter la pression. Le choc est généré par l'inclinaison de la rampe, ce qui induit la création d'ondes de compression dues à la déflexion de l'écoulement de l'air. En effet, en réduisant la vitesse du flux d'air arrivant dans le réacteur, on en augmente la pression, ce qui crée un effet d'aspiration de l'avion vers l'avant contribuant à améliorer l'efficacité du réacteur. Ce flux d'air arrivant dans le réacteur, déjà comprimé, est ensuite recomprimé par les compresseurs. Ainsi le flux d'air sortant est davantage comprimé comparé à un flux d'air n'ayant pas subi d'ondes de choc auparavant. Cela contribue également à améliorer les performances du réacteur lorsque le concorde évolue à une vitesse supersonique.



En cas de défaillance moteur durant la croisière supersonique, les rampes sont descendues complètement pour réduire la quantité d'air entrant et la vanne auxiliaire est ouverte pour évacuer l'air qui n'est plus utilisé par le moteur en panne.

### 3.3.5. Écoulement de l'air dans une tuyère d'un moteur fusée

Nous allons nous intéresser dans cette partie au fonctionnement des tuyères des moteurs fusées.

#### 3.3.5.1. Fonctionnement d'un moteur cryogénique

Le moteur cryogénique fonctionne avec des ergols liquides. Les ergols sont utilisés dans les systèmes de propulsion par réaction. Ils sont composés d'un comburant et d'un carburant. Le moteur cryogénique utilise de l'hydrogène et de l'oxygène liquide. Ce couple d'ergols est très efficace mais il est difficile à maîtriser. En effet, lors de la combustion, l'oxygène et l'hydrogène sont liquides et pour qu'ils restent à cet état, il faut les maintenir à des températures extrêmement basses ( - 253°C pour l'hydrogène et - 182°C pour l'oxygène).

Dans un premier temps, un générateur entraîne des turbopompes qui mettent sous pression le carburant et le comburant. Ensuite, des conduits de refroidissement permettent de conserver les ergols sous forme liquide, puis les injecteurs diffusent les ergols dans la chambre de combustion, où ils sont brûlés. Enfin, la tuyère permet la détente des gaz qui sont accélérés. La poussée fournie par un moteur fusée est calculée grâce à cette formule :

$$F_n = \dot{m} V_e + A_e(P_e - P_{amb})$$

où  $\dot{m}$  = débit massique en kilogrammes par seconde (kg/s)  
 $V_e$  = vitesse de sortie de tuyère en mètres par seconde  
 $A_e$  = aire du flux à la sortie en mètres carrés (m<sup>2</sup>)  
 $P_e$  = pression statique de sortie en pascals (Pa)  
 $P_{amb}$  = pression ambiante en pascals

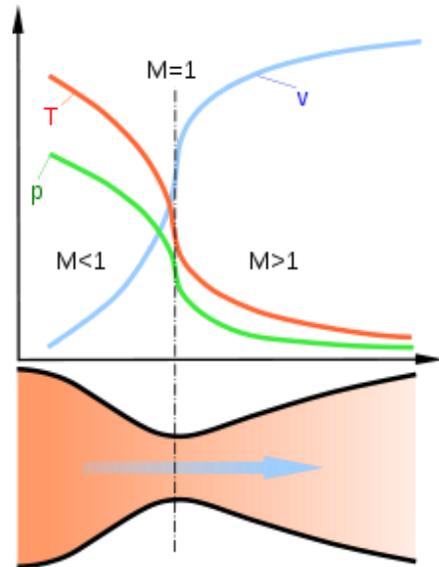
#### 3.3.5.2. Fonctionnement d'une tuyère

L'objectif d'une tuyère est d'augmenter l'énergie cinétique du fluide qui la traverse. Cela se traduit par une diminution de la pression et de la température.

Le principe de fonctionnement d'une tuyère repose sur les propriétés des gaz lorsqu'ils circulent à des vitesses subsoniques et supersoniques. Lorsqu'un gaz circule à une vitesse subsonique dans une tuyère dont le diamètre se rétrécit, sa vitesse augmente. La vitesse du gaz ne peut toutefois pas dépasser celle du son (Mach 1). Néanmoins, pour accélérer un écoulement supersonique il faut que le diamètre de la tuyère augmente. Nous allons maintenant nous concentrer sur l'étude des tuyères permettant une accélération des gaz jusqu'à des vitesses supersoniques. En effet, c'est sur ce type de tuyère que l'on peut observer les phénomènes d'ondes de chocs que nous allons étudier.

### 3.3.5.3. Tuyère de Laval

Une tuyère de Laval permet d'accélérer des gaz d'une vitesse subsonique jusqu'à une vitesse supersonique en combinant une partie convergente appelée «convergent» avec une partie divergente appelée «divergent». Les gaz sont accélérés jusqu'à Mach 1 dans la section convergente de la tuyère puis ils sont accélérés au-dessus de Mach 1 dans la section divergente. La partie de la tuyère située entre le convergent et le divergent est appelée le col. Lors du déplacement du gaz dans la tuyère, sa pression et sa température diminuent tandis que sa vitesse augmente jusqu'à atteindre celle du son au niveau du col. Pour y parvenir, la pression du gaz au niveau du col doit être au moins deux fois inférieure à celle d'entrée dans le convergent. Dans le cas contraire, le gaz n'atteint pas la vitesse du son à la sortie du convergent et, de ce fait, il ne peut pas être accéléré par le divergent. En effet, seul les gaz ayant une vitesse supersonique peuvent être accélérés par le divergent.



Ainsi, on peut calculer la vitesse de sortie des gazes grâce à la formule suivante:

$$v_e = \sqrt{\frac{TR}{M} \times \frac{2\gamma}{\gamma-1} \times \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]}$$

où :

$v_e$  = vitesse des gaz à la sortie de la tuyère en m/s

T = température à l'entrée de la tuyère

R = constante universelle des gaz parfaits

M = masse molaire du gaz en kg/kmol

$\gamma$  = coefficient adiabatique

$p_e$  = pression en sortie de tuyère

p = pression en à l'entrée de la tuyère

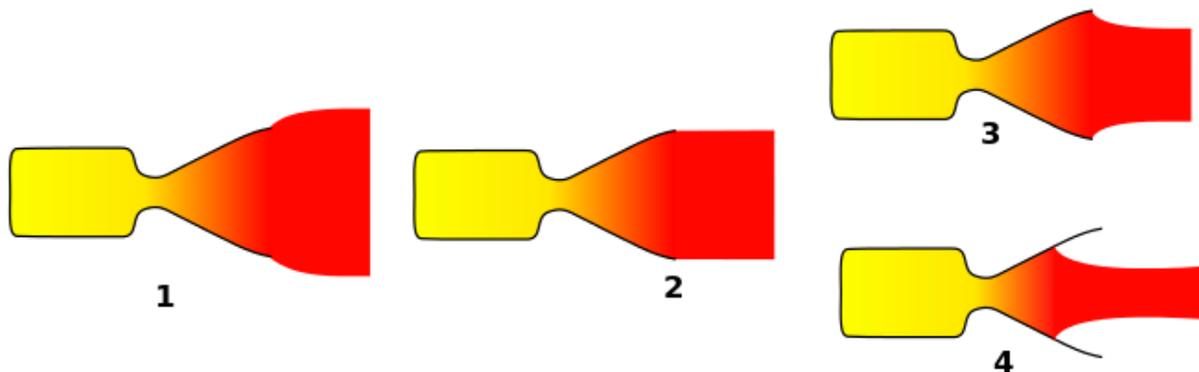
### 3.3.5.4. Les différents comportements des gaz sortants en fonction de la pression

Nous allons maintenant étudier les différents comportements des gaz sortant d'une tuyère de Laval en fonction du rapport entre la pression à l'intérieur de la tuyère et celle ambiante.

Si la pression en sortie est trop haute (1), elle l'emporte sur la pression extérieure, et le jet s'écarte. Non seulement une part de la poussée est "désaxée" si le jet devient très

divergent, mais ce surplus de pression aurait pu être utilisé pour accroître la vitesse d'éjection. Cela signifie que la tuyère n'a pas la forme permettant d'obtenir une accélération optimale des gaz. Ce phénomène peut être corrigé en allongeant la tuyère, ce qui a pour effet d'accroître la détente des gaz et d'équilibrer ainsi leur pression avec celle de l'air ambiant. Dans ce cas on parle de régime de sous détente des gaz, c'est-à-dire que les gaz sortant de la tuyère ne sont pas suffisamment détendus.

Lorsque la pression ambiante et celle des gaz en sortie sont identiques (2) cela signifie que la tuyère est adaptée. Dans ce cas on parle de régime optimal. Il est atteint une fois que la fusée est lancée et que la pression ambiante diminue jusqu'à correspondre à la pression de la tuyère.



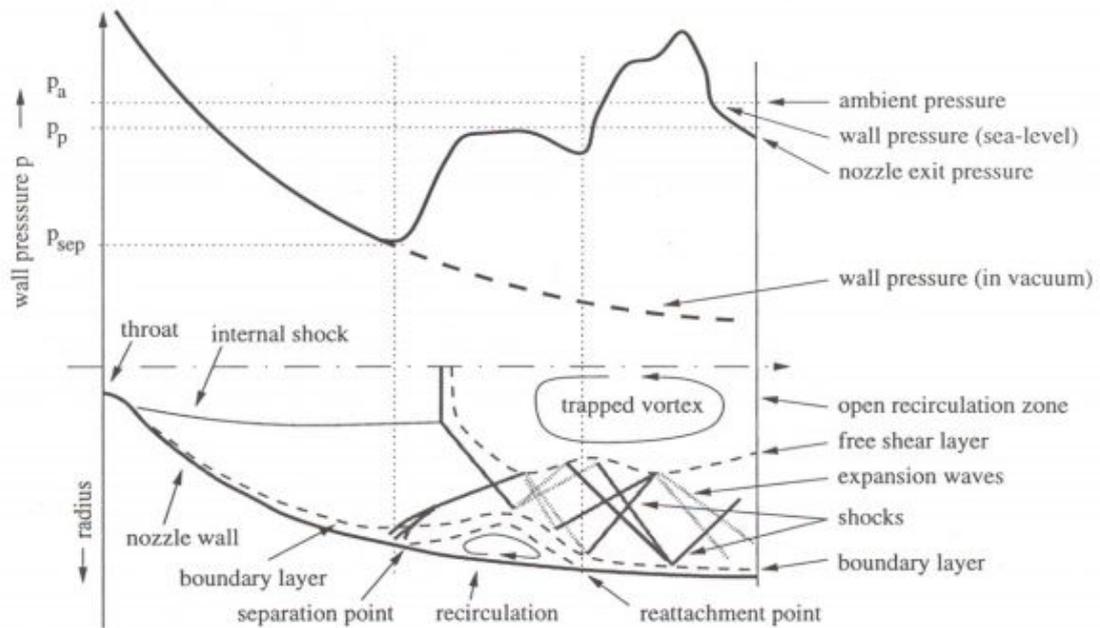
Les ondes de choc apparaissent lors du régime de sur-détente (3 et 4). Ici la pression des gaz sortants est inférieure à celle de l'air ambiant et les gaz sont recompressés dans la tuyère ou à la sortie de celle-ci. Cela provoque le décollement des couches limites dans la tuyère dans certains cas. La couche limite est la zone d'interface entre un fluide et un corps, ici il s'agit du flux de gaz et de la paroi. De plus, les fluctuations des directions du flux sortant induites par ces décollements peuvent affecter les caractéristiques du vecteur de poussée résultant et compromettre la stabilité de la fusée. Ces ondes de choc engendrent des contraintes supplémentaires sur les parois latérales de la tuyère, où ont lieu les décollements.

Il existe deux cas différents de décollement en régime sur détendu, que nous allons maintenant aborder.

Premièrement, lorsque le rapport de pression est faible mais suffisant pour provoquer un décollement, la couche limite est impactée par un choc de recompression oblique et décolle. Dans la zone de décollement, la pression le long de la paroi augmente pour finalement s'équilibrer avec celle de l'air ambiant. Ce décollement est dit libre car, en aval de ce point de décollement, la couche limite ne se rattache pas à la paroi de la tuyère. (cas 4)

Sinon, pour des rapports de pressions supérieurs au premier cas, la pression de la paroi augmente faiblement au début de la tuyère, au passage du choc, sans pour autant provoquer de décollement. Un peu plus loin dans la tuyère, dans la zone de recirculation (zone de décollement, voir schéma), cette pression dépasse largement la pression extérieure, provoquant localement un décollement le long de la paroi. Ce décollement, qui

s'accompagne d'autres phénomènes complexes (formation d'un choc interne, détente, reformation de chocs de recompression), est dit restreint, car la couche limite recolle en paroi du divergent.



Cependant, une tuyère de moteur-fusée propulsant le premier étage est amenée à fonctionner dans des conditions de pression externe très différentes. Celle-ci est de 1 bar au lancement mais quasiment nulle lorsque le moteur s'éteint. Puisque la pression extérieure diminue avec l'altitude, une tuyère prévue pour fonctionner dans un régime idéal à haute altitude serait construite plus longue que pour la basse altitude.

Néanmoins, la géométrie de la tuyère d'un moteur fusée ne peut pas s'adapter aux variations continues de la pression externe. Il a donc été choisi d'utiliser pour les moteurs fusée des tuyères courtes. De ce fait, la tuyère fonctionne en régime de sous-détente sur la majorité du temps de fonctionnement du moteur. Ainsi, la tuyère fonctionne dans un régime idéal seulement lorsque la fusée a déjà atteint un haute altitude. Une tuyère courte a par ailleurs l'avantage de réduire la masse du lanceur.

Toutefois, au moment de la montée en puissance du moteur-fusée (avant le décollage) et à l'extinction du moteur, les gaz produits sont temporairement en sur-détente, ce qui crée un décollement des flux pouvant endommager la tuyère au décollage et générer des poussées non symétriques s'ils ne sont pas maîtrisés.

## 3.4. Les ondes de choc et la maîtrise des risques industriels

Les installations industrielles sont soumises à d'importants risques d'accidents, notamment dus au stockage de produits inflammables ou d'explosifs. Depuis plus d'un siècle, de nombreux accidents industriels à travers le monde ont montrés que ce risque était bien réel et pouvait occasionner des dégâts considérables ainsi que de nombreux morts. Mais c'est seulement depuis quelques dizaines d'années que l'opinion publique a réellement pris conscience de l'importance de l'étude et de la maîtrise des risques industriels, notamment avec la catastrophe d'AZF en 2001 à Toulouse.

Lors d'un accident industriel, trois effets principaux apparaissent : un effet thermique (un incendie par exemple), un effet toxique (la dispersion atmosphérique de substances toxiques) et un effet de surpression (effet engendré par une explosion).

Dans cette troisième partie, nous allons nous intéresser à l'effet de surpression lors d'un accident industriel et plus particulièrement aux ondes de choc lors de ces accidents, ondes de choc qui se forment par le biais des explosions. Notre objectif dans cette partie est de comprendre comment peut se former une onde de choc dans un environnement industriel, quelles sont les conséquences de ce phénomène et quelles sont les techniques existantes pour s'en préserver.

### Quelques définitions :

Une explosion (définition très générale donnée en 2004 par le Groupement français de Combustion) : libération soudaine d'énergie plus ou moins confinée, plus ou moins maîtrisée, avec ou sans conséquences externes. L'explosion peut donner lieu à une onde de pression (onde de souffle) et à une boule de feu. Le processus de libération peut être une déflagration ou une détonation.

Une explosion se caractérise par un déplacement de matière en combustion, appelé front de flamme, et un déplacement de gaz frais appelé onde de choc.

Une déflagration : On parle de déflagration lorsque le front de flamme se déplace plus lentement que l'onde de choc. La vitesse du front de flamme est subsonique (donc inférieure à 340 m/s dans l'air à 20°C, soit 1224 km/h).

Une détonation : Dans le cas d'une détonation, l'onde de combustion et l'onde de choc sont liées. La vitesse d'une détonation est supersonique, bien supérieur à la célérité du son dans le milieu traversé. Cette vitesse est de l'ordre de plusieurs km/s. L'onde de choc et le front de flamme sont confondus, provoquant une augmentation considérable de la pression (suivi d'une dépression) et de la température, un déplacement de volume d'air très important et un bruit très fort. L'onde de pression et l'onde de combustion s'entretiennent

mutuellement.

La différence entre ces deux régimes de libération d'énergie est donc la vitesse des ondes de combustion et de choc. Une déflagration peut devenir une détonation si le front de flamme rattrape l'onde de choc. De l'extérieur, il n'est pas possible de différencier une détonation d'une déflagration.

Dans l'environnement industriel, une explosion peut avoir de très nombreuses causes, comme une surpression dans le stockage d'un gaz, la mise en combustion d'une substance explosive...

Quel que soit la cause de l'explosion (industrielle ou non d'ailleurs), quel que le mécanisme de cet explosion et que ce soit une détonation ou une déflagration, une onde de choc se forme.

### 3.4.1. Explosions en milieu industriel

#### Exemple d'un mécanisme d'explosion : le BLEVE

Le BLEVE est un phénomène d'explosion caractéristique des accidents industriels dans lequel l'onde de choc joue un rôle important. L'expression BLEVE est un acronyme pour « Boil Liquid Expanding Vapor Expanding ».

Le BLEVE est caractérisé par l'INERIS comme une vaporisation violente à caractère explosif consécutive à la rupture d'un réservoir contenant un liquide à une température significativement supérieure à sa température normale d'ébullition à la pression atmosphérique.

Lorsqu'un réservoir contenant un gaz liquéfié est exposé à une source de chaleur intense, comme par exemple un incendie entourant une citerne, la température du gaz contenu dans le réservoir va augmenter jusqu'à atteindre sa température d'ébullition. L'ébullition et la formation de bulles de vapeur sont déclenchées, à la température d'ébullition, par les irrégularités des surfaces, les impuretés présentes dans le liquide et au niveau des interfaces entre les surfaces, appelés sites de nucléation. Lorsque ces sites sont absents, il ne se produit pas d'ébullition et la température du liquide dans le réservoir continue d'augmenter. On dit que le liquide devient surchauffé. L'augmentation de la température entraîne également une augmentation de la pression de la partie gazeuse contenue dans le réservoir.

Parallèlement à ce phénomène, le réservoir peut être fragilisé par la source de chaleur extérieure ou par une autre cause de nature mécanique.

Sous l'effet combiné de la pression et de la fragilisation mécanique de la paroi, le réservoir se rompt, engendrant une évaporation instantanée de tout le produit contenu dans le réservoir, provoquant une onde de choc. Si le gaz liquéfié est inflammable, il peut s'enflammer et créer une boule de feu de grande dimension.

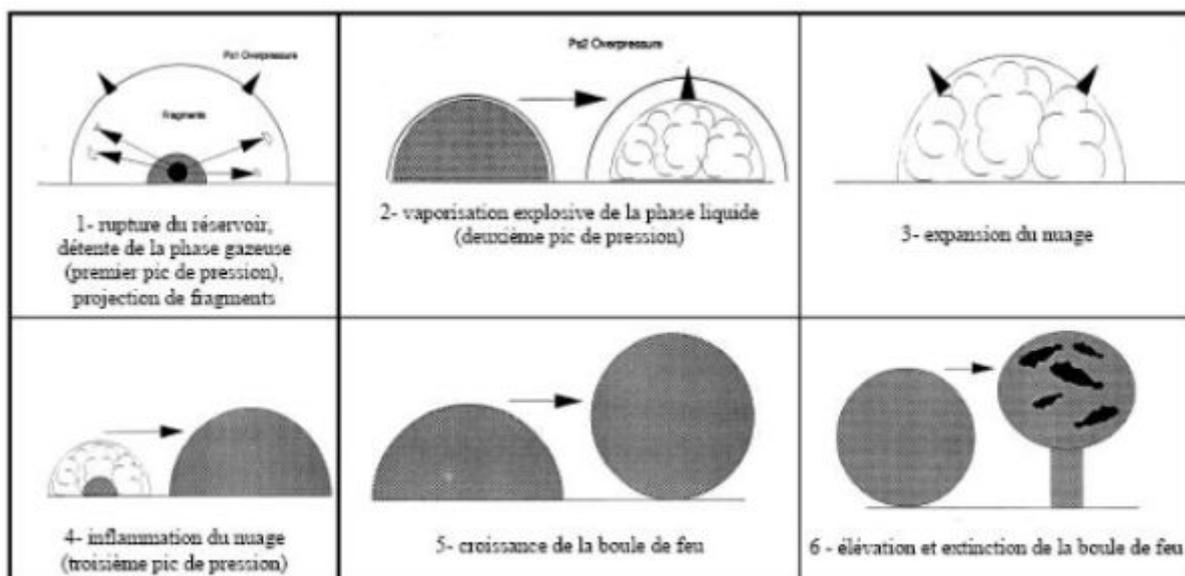


Figure : Étape de développement d'un bleve "chaud"

Les effets du BLEVE se manifestent de trois manières différentes :

- Effet de surpression : la formation et la propagation d'une onde de choc,
- Effet missile : la projection de fragments à des distances très importantes,
- Effet thermique : La formation d'une boule de feu de très grande ampleur dans le cas d'un gaz liquéfié inflammable.

Lors de ce phénomène de vaporisation violente, l'apparition d'une onde de choc s'explique par le fait que le volume massique de la vapeur est de plusieurs centaines de fois supérieur à celui du liquide, ce qui engendre une détente violente.

Peu d'expérimentations scientifiques ont été réalisées sur ce phénomène à cause de son ampleur et de sa dangerosité. Néanmoins, en 1998, un institut de recherche allemand (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) a effectué une expérience grandeur nature à l'aide d'une citerne ferroviaire contenant du propane, d'une importante quantité de fioul pour simuler un incendie et de nombreux instruments de mesure.

La nappe de fioul a été enflammée, entourant la citerne d'un rideau de flamme et engendrant un phénomène de BLEVE avec une boule de feu.

Des observations sur les effets de surpression ont été faites lors de cette expérience.

Avant l'éclatement de la citerne, la pression à l'intérieur augmente de manière linéaire. L'explosion caractérisant le phénomène de BLEVE a été suivie par une onde de surpression enregistrée par différents capteurs. Ces enregistrements présentent trois pics de surpression, correspondant à des ondes de choc, qui ont été interprétés comme les conséquences de l'éclatement pneumatique du réservoir, de la vaporisation instantanée de la phase liquide puis de la combustion explosive du produit rejeté.

Néanmoins, il est difficile de mesurer avec précision les niveaux de surpression atteints lors de cette expérimentation.

Il existe deux types de BLEVE : le BLEVE froid et le BLEVE chaud. On peut distinguer ces deux types de BLEVE avec une température du gaz liquéfié plus faible pour le BLEVE dit froid, accompagnée dans ce cas d'une faiblesse mécanique prononcée du réservoir ainsi que des effets de pressions réduits. Dans le cas d'un BLEVE dit chaud, la température du gaz liquéfié est bien plus élevée et engendre donc une dépressurisation plus violente.

L'une des caractéristiques du phénomène de BLEVE est qu'il peut conduire à une réaction en chaîne : le premier BLEVE peut en entraîner un autre et ainsi conduire à une succession d'explosions dévastatrices.

Il est possible de quantifier l'énergie qui est libérée par l'explosion lors d'un phénomène de BLEVE. Cette énergie est communément assimilée à l'énergie d'éclatement pneumatique :

$$E = \frac{\Delta P \times V}{\gamma - 1}$$

avec :

$\Delta P$  : surpression dans le réservoir

$V$  : volume du réservoir

$\gamma$  : rapport des capacités calorifiques du gaz liquéfié.

### 3.4.2. Conséquences d'une onde de choc dans un environnement industriel

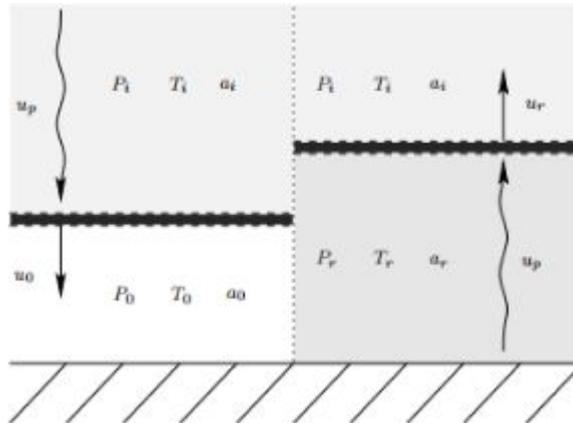
Une onde de choc formée lors d'une explosion et se propageant dans un milieu industriel peut avoir des conséquences directes à la fois sur les structures et sur les personnes présentes.

Les dommages que l'onde de choc peut engendrer sur les structures dépendent directement des caractéristiques de cette onde :

- la nature de l'explosion
- la durée de l'explosion
- l'intensité de l'onde de choc lorsqu'elle rencontre la structure

mais dépendent aussi du type de bâtiments et de ses caractéristiques.

Lorsqu'une onde de choc rencontre une surface rigide, la pression va augmenter de manière très significative et l'onde peut être réfléchi et diffractée. Pour une incidence normale il suffit d'utiliser les équations de Rankine Hugoniot dans le cas d'une onde de choc incidente et d'une onde de choc réfléchi pour décrire la réflexion.  $u_p$  représente la vitesse particulaire,  $a$  la vitesse du son,  $u_0$  la vitesse front d'onde incident et  $u_r$  la vitesse du front d'onde réfléchi.



$$\left(\frac{u_p}{a_i}\right)^2 = \left(\frac{u_p}{a_0}\right)^2 \times \left(\frac{a_0}{a_i}\right)^2$$

$$\left(\frac{u_p}{a_i}\right)^2 = \frac{\frac{2}{\gamma} \left(\frac{P_r}{P_i} - 1\right)^2}{(\gamma + 1) \frac{P_r}{P_i} + (\gamma - 1)}$$

Figure : Réflexion normale d'une onde de choc

A partir des deux équations précédente on peut écrire:

$$\frac{P_r}{P_0} = \frac{\frac{P_i}{P_0} \left[ (3\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} - (\gamma - 1) \right]}{(\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} + (\gamma + 1)}$$

Le coefficient de réflexion est représenté par le rapport des surpressions:

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta P_i} = \frac{(3\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} + (\gamma + 1)}{(\gamma - 1) \frac{P_i}{P_0} + (\gamma + 1)}$$

Pour une incidence oblique on aura une réflexion régulière ou une réflexion de Mach. La réflexion est dite régulière si l'angle d'incidence est inférieur à un angle critique qui dépend du nombre de Mach. Ce nombre de mach est le rapport entre la vitesse relative du gaz pour l'onde incidente  $u_i$  et la vitesse du son du front d'onde incident  $a_i$ :

$$M_i = \frac{u_i}{a_i}$$

Dans le cas d'une réflexion régulière l'angle réfléchi est déterminé à partir de l'angle d'incidence et du coefficient de réflexion. On a une réflexion de mach lorsque l'onde de

choc réfléchi se propage plus rapidement que l'onde incidente. Ces deux ondes fusionnent pour former une onde de choc appelé onde de mach ou pied de mach.

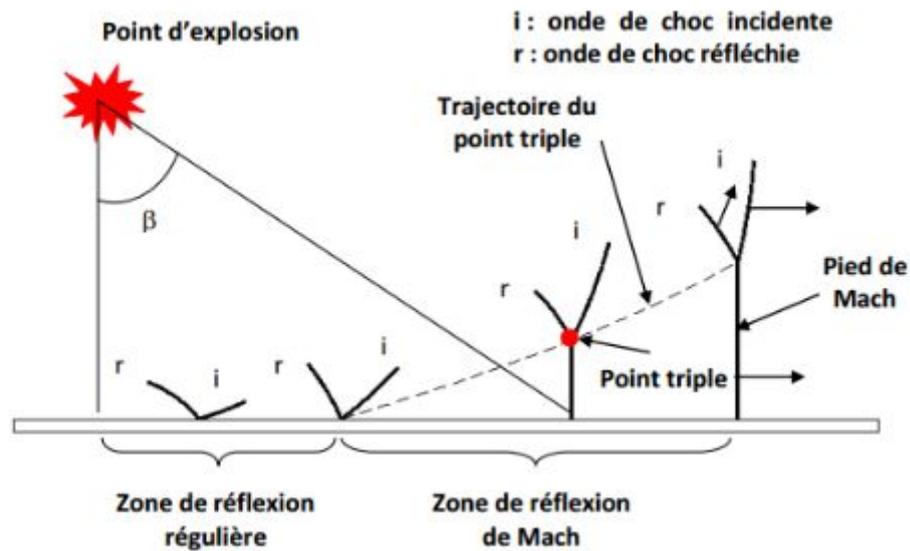


Figure : Création d'une onde de Mach

Si l'on étudie la réflexion sur un mur droit on constate que le coefficient de réflexion sera, dans le cas d'une réflexion de Mach, maximale si la pression incidente est inférieure à 2 bar. Pour une réflexion normale à la surface cette pression doit être supérieure à 2.

Les conséquences de la propagation d'une onde de choc sur des personnes sont doubles. D'une part, les effets de surpression engendrent des dommages directs sur le corps humain, notamment des lésions sur les tympans ou le système pulmonaire. D'autre part, l'onde de choc détruit les structures qu'elle rencontre et projette à des distances importantes des objets qui peuvent être parfois de grande taille et qui peuvent provoquer la mort des personnes aux alentours. Cette seconde conséquence est plus meurtrière que la première lors d'un accident industriel.

### 3.4.3. Quantification des conséquences d'une onde de choc

Dans le cadre de l'étude et de la maîtrise des risques industriels, il est indispensable de pouvoir quantifier les phénomènes liés aux accidents industriels, notamment les phénomènes de surpression.

Pour quantifier les ondes de choc, différentes méthodes sont utilisées : l'équivalent TNT, la modélisation analytique des déflagrations sphériques, la méthode multi-énergie, la

méthode CAM...

Les méthodes basées sur l'équivalent TNT sont celles qui sont le plus utilisées dans le monde afin de prévoir les conséquences d'une onde de choc lors d'un accident industriel et c'est donc cette méthode que nous avons étudiée.

Il est donc possible d'estimer assez précisément les dommages causés par le souffle de l'explosion en utilisant la méthode de l'équivalent TNT. L'équivalent de la masse TNT consiste à considérer que l'explosion d'une masse de carburant se comporte comme une explosion d'une certaine masse de charge TNT. Cette masse de TNT est obtenue par la formule suivante :

$$m_{TNT} = \eta \frac{m \cdot \Delta H_c}{E_{TNT}}$$

$m_{TNT}$  : masse équivalente TNT

$\eta$  : rendement de l'explosion empirique

$m$  : masse d'hydrocarbure

$\Delta H_c$  : énergie de l'explosion du gaz inflammable

$E_{TNT}$  : énergie explosion TNT.

À partir de cette masse équivalente TNT et de la distance du point d'explosion  $r_0$  on peut calculer la distance réduite  $Z_c$  :

$$Z_c = \frac{r_0}{m_{TNT}^{1/3}}$$

La distance  $Z_c$  a été introduite dans cette méthode de quantification afin de bénéficier d'une grandeur représentant une distance correspondant à n'importe quelle nature d'explosion.

Il suffit alors de lire la valeur de surpression correspondante à la distance réduite sur le graphique ci-dessous. Enfin, selon la surpression trouvée on obtient une estimation des dommages subis. Par exemple pour une surpression de entre 4.8 et 6.9 kPa les dommages vont être mineurs pour les structures du bâtiment.

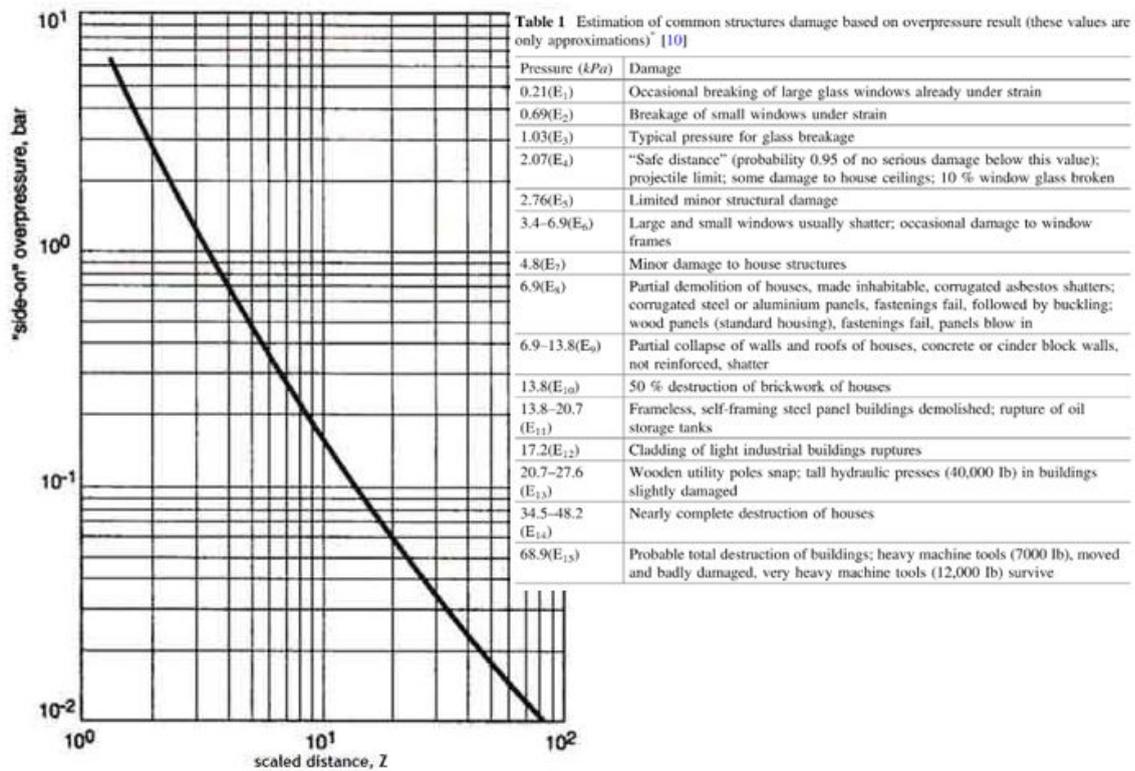


Figure : Hopkinson-scaled TNT charge blast.

Ce calcul est valable pour une onde de choc se propageant dans un milieu non confiné. Dans un milieu semi confiné tel qu'un tunnel où la charge est située à l'extrémité fermée on peut calculer l'effet de l'onde de choc en utilisant cette même méthode mais on y ajoutant un facteur de concentration d'énergie, appelé ECF. Ce facteur est le rapport entre le volume de la sphère de l'onde de choc émise et le volume du confinement :

$$ECF = \frac{V_{sphère}}{V_{tunnel}} = \frac{2/3 \pi r_0^3}{A r_0}$$

$r_0$  : distance du centre de l'explosion

A : section du tunnel

Pour un milieu semi confiné,  $Z_c$  devient donc :

$$Z_c = \frac{r_0}{ECF \cdot m_{TNT}^{1/3}}$$

Au delà des méthodes de quantification utilisées par l'industrie et d'un point de vu plus théorique, il existe des modèles qui permettent de modéliser le comportement de certains paramètres qui interviennent lors d'une explosion.

Ainsi, le modèle de Taylor-Sedov décrit l'évolution d'une onde de choc produite par une forte explosion en fonction du temps. Ce modèle fournit, à travers la théorie de l'explosion isotrope ponctuelle, une équation de l'énergie libérée par une explosion au cours du temps :

$$\varepsilon_0 = E \times t^\alpha \quad \text{avec } 0 \leq \alpha \leq 3$$

On peut considérer deux cas qui sont traduits par cette équation :

- si l'énergie est libérée instantanément par l'explosion, on a alors  $\alpha = 0$
- si l'énergie est libérée progressivement, on a  $\alpha > 0$ .

### 3.4.4. Réduction des ondes de choc

Nous avons vu que les ondes de choc constituaient un phénomène particulièrement dangereux, notamment en milieu industriel. C'est pourquoi les installations industrielles mettent en place des dispositifs dans le but de réduire l'impact des ondes de choc. En l'absence de dispositifs de réduction des ondes de choc, un des risques existants est le déclenchement d'autres explosions sous l'effet de l'onde de surpression.

L'un des moyens utilisés pour réduire les effets des ondes de choc est l'utilisation de mousse aqueuse. La mousse a pour particularité d'être un milieu diphasique, on a donc une phase gazeuse et une phase liquide. Le gaz est isolé dans des bulles de liquide qui sont de l'ordre du mm de diamètre.

Grâce aux mousses on peut aisément réduire la vitesse de l'onde d'un facteur supérieur à deux en comparaison à sa vitesse dans l'air. C'est le changement de milieux qui provoque cette dissipation d'énergie et donc une décélération de l'onde. Lorsque l'onde de choc atteint la mousse, la mousse se rompt en gouttelettes liquides.

Il existe différentes mousses caractérisées par leur foisonnement. Le taux de foisonnement est le rapport entre le volume de la mousse et le volume de liquide. Il représente aussi l'inverse de la fraction volumique de liquide.

$$F = \frac{V_{mousse}}{V_{liquide}} \approx \frac{1}{\alpha_L}$$

Prenons un exemple concret de l'effet de la présence ou non de mousse. Le graphique ci-dessous permet d'estimer le taux de survie d'une personne en fonction de la surpression et de l'impulsion subit. Ainsi une personne qui reçoit une onde de souffle de 10 bar et une

impulsion de 2 bar à une probabilité de survie de 50% (courbe bleu).

Maintenant si l'on reprend cette même charge mais que celle-ci se retrouve confinée par une mousse de foisonnement égale à 120, la surpression ne sera plus que de 2 bar. On est entre la courbe de seuil de blessure pulmonaire et la courbe correspondant à un taux de survie de 99%. La personne ne doit avoir que des blessures pulmonaires.

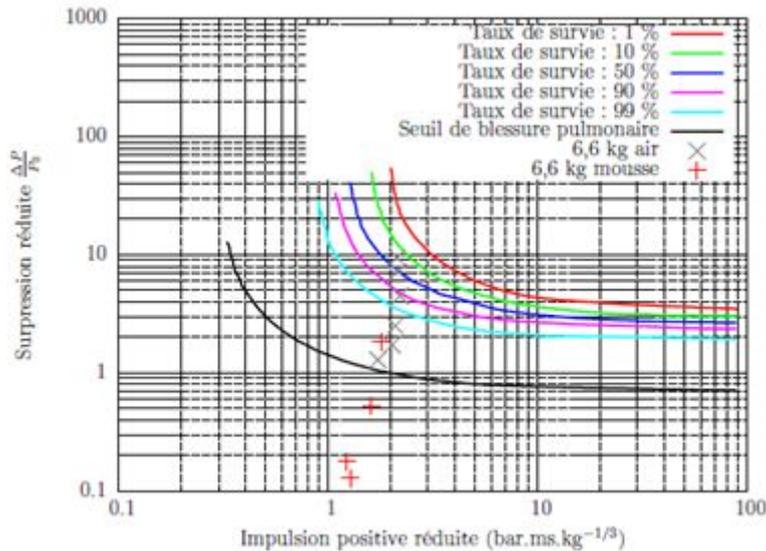


Figure : Diagramme empirique de la pression réduite en fonction de l'impulsion réduite d'une onde de souffle définissant le taux de survie et le seuil de blessure pulmonaire.

Un autre moyen de protection est l'utilisation de merlon. Le merlon est une barrière physique qui va permettre d'atténuer l'onde de choc. Il est possible d'atténuer encore plus l'onde de choc en ayant plusieurs merlons sur le parcours; l'onde sera réfléchi plusieurs fois.

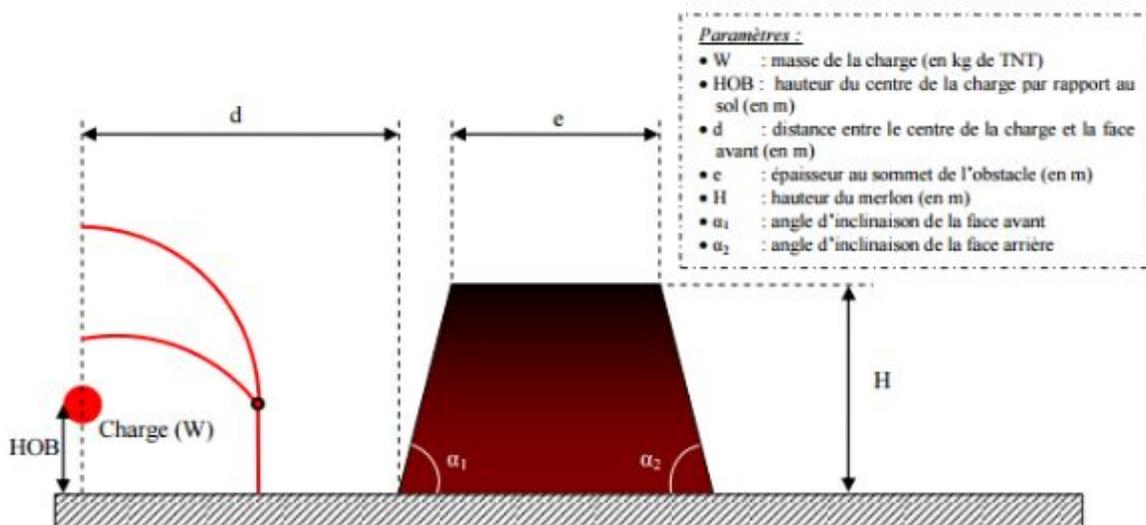


Figure : Configuration d'un merlon.

L'efficacité de la barrière va dépendre de ses dimensions, de l'angle d'inclinaison de la paroi, de la distance entre la charge et l'obstacle et de la masse de la charge. En effet si celle ci est mal dimensionné on peut obtenir l'effet inverse c'est à dire une amplification de l'onde.

Par exemple, Allein a mis en évidence en 1994 l'inefficacité de certaine barrière. On prend une charge TNT de masse 37Kg positionné au niveau du sol. Si le merlon a une épaisseur au sommet nul, une hauteur de 1.5 m et une pente de 45° alors l'onde est amplifié. Dans ce cas sur la face avant du merlon une partie de l'onde de choc est réfléchié. Sur la face arrière il y a détente de l'onde incidente. Dans ces conditions le nombre de Mach du front d'onde est conservé, avec un angle d'incidence de 45° en aval il peut y avoir formation d'une onde si le nombre de Mach du front d'onde est supérieur ou égale à 1.3. Il y a donc réflexion sur le sol et une possibilité d'apparition d'un nouvelle onde appelé onde de mach dont la surpression est plus élevé. Norbert Gebbeken a constaté en 2010 qu'une onde qui rencontre une façade parabololoïde donne un coefficient de réflexion moins important que pour une façade droite.

L'OTAN recommande une épaisseur minimale de 0.5 m au sommet du merlon. Ceci permettrait une double détente, alors qu'avec une épaisseur nul il n'y aurait qu'une détente. L'onde incidente est donc atténuée et il n'y a pas d'onde réfléchi à l'aval du merlon.

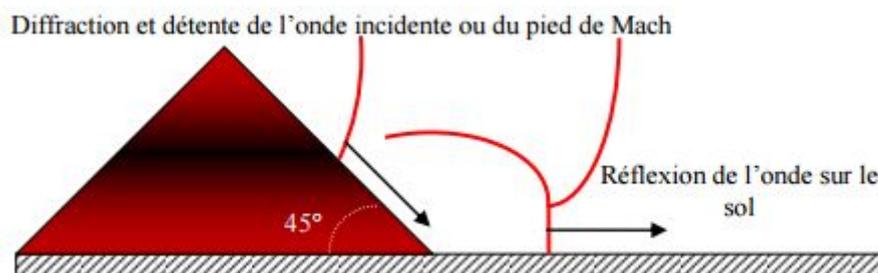


Figure : Hypothèse du régime d'écoulement après un obstacle

Ces techniques d'atténuation de la propagation des ondes de choc sont très utilisées dans l'industrie, notamment dans les zones de stockage de produits explosifs, pour éviter des explosions en série qui peuvent être dévastatrices.

## 4. Conclusion

Grâce à ce projet, nous avons pris connaissance d'un phénomène physique qui était inconnu pour l'ensemble des membres du groupe. Même si c'est un phénomène relativement répandu, son fonctionnement nous était inconnu. Au cours de nos recherches, nous avons pu comprendre les conditions de formation d'une onde de choc, la façon dont elle se propage ainsi que ses effets bénéfiques ou destructeur sur son environnement.

Ce projet nous a permis de développer l'esprit du travail en équipe, d'autant que nous étions neuf à travailler sur un même sujet. Il était important d'avoir une bonne organisation au sein du groupe pour être efficace, cohérent et pour avancer rapidement sur le projet. L'organisation était néanmoins simplifiée puisque nous étions répartis par groupe de trois pour chaque domaine étudié. Ce travail effectué sur l'organisation d'un projet est d'autant plus intéressant qu'il est une composante de notre formation d'ingénieur.

Cependant, nous avons tout de même rencontré des difficultés dans ce projet, avec pour commencer le manque d'information. En effet, il nous a été très compliqué de trouver beaucoup d'informations bibliographiques sur un sujet aussi précis que sont les ondes de choc, que ce soit dans les livres de la bibliothèque universitaire ou même sur Internet. En effet, les documents trouvés présentaient souvent le phénomène d'une manière trop simplifiée ou trop complexe. De plus, ce sujet nous a posé des problèmes à cause de la complexité de certaines formules théoriques, de par leur abstraction et le fait qu'elles utilisent des outils mathématiques que nous ne maîtrisons pas encore.

Ce sujet possède de nombreuses perspectives d'avenir car les ondes de choc possèdent encore de nombreuses parties incomprises pour lesquelles les scientifiques n'ont pas encore trouvé de réponses. Cela laisse donc de nombreuses possibilités pour de futurs thèses ou recherches, notamment dans les domaines étudiés lors de ce projet.

Enfin, ce sujet nous a été à tous très utile car nous nous sommes séparés par groupe pour travailler sur la partie correspondante à nos poursuites d'étude. Cela nous laisse donc des perspectives d'approfondissement de ce sujet, dans des domaines différents pour chacun de nous, pour les années à venir.

# 5. Bibliographie

## [1] Introduction

- Illustration:  
[https://www.researchgate.net/figure/264625998\\_fig1\\_Figure-1-Typical-blast-wave-pressure-time-history](https://www.researchgate.net/figure/264625998_fig1_Figure-1-Typical-blast-wave-pressure-time-history)

## [3.1] Lois mathématiques

- Ondes de choc droites:  
<http://perso.ensta-paristech.fr/~ortiz/DFR/Voies/chapVmf201.pdf>
- Ondes de chocs obliques:  
<http://perso.ensta-paristech.fr/~ortiz/DFR/Voies/chapVmf201.pdf>
- Etude de la propagation des ondes de choc en milieu confiné à géométrie complexe: [ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/baptiste.julien\\_3573.pdf](ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/baptiste.julien_3573.pdf)
- Propagation d'une onde de choc en présence d'une barrière de protection:  
[ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/sebastien.eveillard\\_3331.pdf](ftp://ftp.univ-orleans.fr/theses/sebastien.eveillard_3331.pdf)  
[http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO\\_HTML/node48.html#equ4.4](http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO_HTML/node48.html#equ4.4)

## [3.2] Les ondes de choc : Application biomédicale

- Qu'est-ce qu'une thérapie par Ondes de Choc ?:  
<http://www.shockwave-france.com/ondes-de-choc-r20121.html>
- La technique de la lithotritie extracorporelle:  
<http://www.urofrance.org/nc/science-et-recherche/base-bibliographique/article/html/a-technique-de-la-lithotritie-extracorporelle.html#toc-3>
- Les ondes de choc, comment ça marche ?  
<http://blogdukine.fr/les-ondes-de-choc-comment-ca-marche/>
- Effet thérapeutique des ondes de choc:  
<http://pes-moselle.fr/yutz/onde-de-choc-kinesitherapie/>
- Ondes de choc : Pathologies osseuses:  
<http://medical-athletics.eu/th-rapies/ondes-de-choc/odc-et-pathologies-osseuses.html>
- Ondes de choc pour l'urologie  
<https://www.storzmedical.com/fr/specialite/urologie/apercu-des-produits/duolith-sd1-ultra.html>
- Une nouvelle indication pour les ondes de choc radiales: l'esthétique corps et visage:  
<https://jeromeaugerkine.com/content/une-nouvelle-indication-pour-les-ondes-de-choc-radiales-lesth%C3%A9tique-corps-et-visage>

- Des ondes de choc acoustiques pour éliminer la cellulite:  
<http://www.multiesthetique.fr/articles/des-ondes-de-choc-acoustiques-pour-eliminer-l-a-cellulite>

### [3.3] Ondes de choc dans l'aéronautique

- Aérodynamique et mécanique du vol :  
[http://www.aerobigorre.org/bia/download/tome\\_2\\_aerodynamique\\_mecanique\\_du\\_vol.pdf](http://www.aerobigorre.org/bia/download/tome_2_aerodynamique_mecanique_du_vol.pdf)  
<http://lafuseetpe.e-monsite.com/pages/fonctionnement-fusee.html>
- Réacteur Olympus 593 - Technique :  
<http://spotaero.blogspot.fr/2015/02/rolls-royce-snecma-olympus-histoire.html>  
<https://books.google.fr/books?id=E-5ga8mAhPYC&pg=PA51&lpg=PA51&dq=ondes+de+chocs+entr%C3%A9e+d%27air+r%C3%A9acteur+du+concorde&source=bl&ots=oTGnSCZKUB&sig=OuP4Rmf4AA6zcENqiFspILBPHLo&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiHgszcxsfTAhWHnBoKHcnDAY8Q6AEISjAl#v=onepage&q=ondes%20de%20chocs%20entr%C3%A9e%20d'air%20r%C3%A9acteur%20du%20concorde&f=false>  
<http://accrodavion.be/Accrodavions/>
- Disque de Mach:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Disque\\_de\\_Mach](https://fr.wikipedia.org/wiki/Disque_de_Mach)  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00551205/document>
- Tuyère:  
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuy%C3%A8re>
- Tuyère de laval:  
[http://wikimonde.com/article/Tuy%C3%A8re\\_de\\_Laval](http://wikimonde.com/article/Tuy%C3%A8re_de_Laval)

### [3.4] Les ondes de choc et la maîtrise des risques industriels

- INERIS: Explosions:  
[http://www.ineris.fr/centredoc/explosion\\_FS.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/explosion_FS.pdf)
- Le BLEVE: Phénoménologie et modélisation des effets thermiques:  
<http://www.ineris.fr/centredoc/50.pdf>
- Les phénomènes dangereux associés aux GPL dans les établissements de stockage hors raffineries et pétrochimie :  
<http://www.ggm.drire.gouv.fr/environnement/projetHC/ReglementationICPE/EDD/fiche3Uvce.pdf>
- Etude de la propagation des ondes de choc en milieu confiné à géométrie complexe: [http://ftp.univ-orleans.fr/theses/baptiste.julien\\_3573.pdf](http://ftp.univ-orleans.fr/theses/baptiste.julien_3573.pdf)
- Etude des phénomènes physiques associés à la propagation d'ondes consécutives à une explosion et leur interaction avec des structures, dans un environnement complexe:  
[ftp.univ-orleans.fr/theses/pierre-emmanuel.sauvan\\_2670.pdf](ftp.univ-orleans.fr/theses/pierre-emmanuel.sauvan_2670.pdf)

- Choc et onde de souffle dans les mousses aqueuses. Etude expérimentale et modélisation numérique:  
[https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790819/file/these\\_emilie\\_del\\_prete.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00790819/file/these_emilie_del_prete.pdf)

#### Informations générales

- INERIS: Les effets d'un phénomène dangereux et leur incidence sur les structures:  
[http://www.spppi-paca.org/arkotheque/client/spppi\\_paca/\\_depot\\_arko/articles/370/spppi-paca-19-06-14-effets-consequence-sur-les-structures-ineris\\_doc.pdf](http://www.spppi-paca.org/arkotheque/client/spppi_paca/_depot_arko/articles/370/spppi-paca-19-06-14-effets-consequence-sur-les-structures-ineris_doc.pdf)
- Propagation d'une onde de choc en présence d'une barrière de protection:  
[https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00952259/file/sebastien.eveillard\\_3331.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00952259/file/sebastien.eveillard_3331.pdf)
- Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe:  
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00717411/document>
- Modélisation des phénomènes d'ondes explosives:  
<https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/acbaf656-0c43-4d9b-bb2f-bd4d67a60d0f>

# ANNEXES

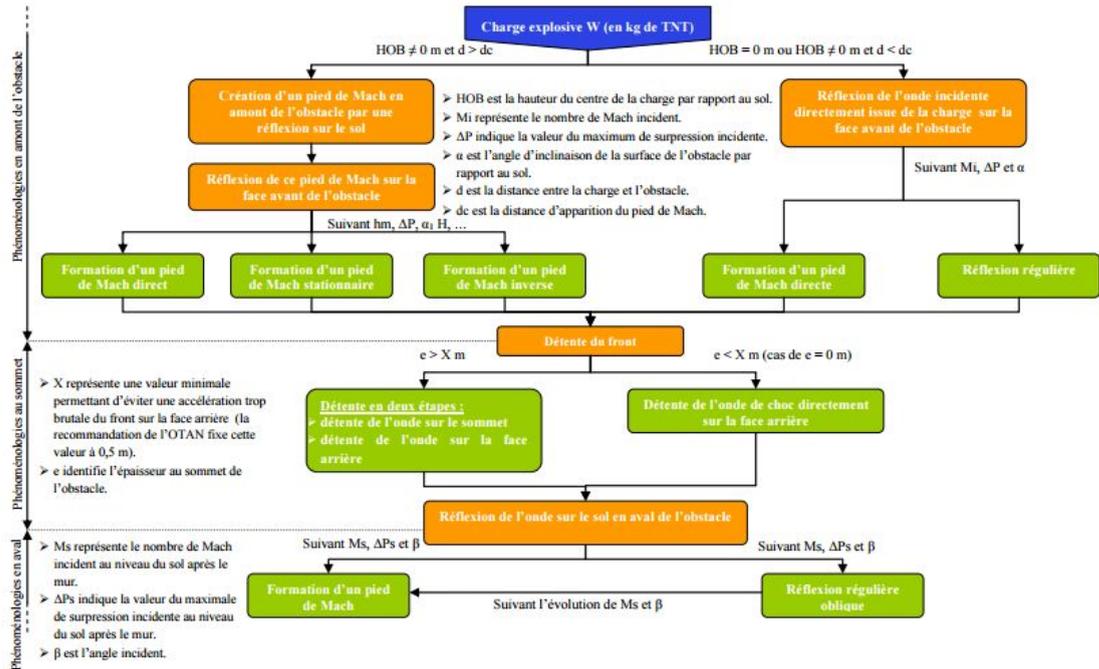


Figure 41 : Diagramme des phénomènes physiques présents lors de l'interaction d'une onde de choc avec une barrière de protection