

**Étude des phénomènes d'ondes de choc :  
applications aux sciences de l'ingénieur, aux  
phénomènes naturels et au domaine biomédical**



**Étudiants :**

**Laura COURET**

**Mustapha EDDAH**

**Léa LEFRANCOIS**

**Clara MORET**

**Margot SIRDEY**

**Antoine DOLLEANS**

**Livine GIRAMAHORO**

**Antonin MEUNIER**

**Coralie PETIT**

**Alizée TANTALE**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Abdellah HADJADJ**



Date de remise du rapport : 13/06/2016

Référence du projet : STPI/P6/2016 – 51 et 52

Intitulé du projet : Étude des phénomènes d'ondes de choc : applications aux sciences de l'ingénieur, aux phénomènes naturels et au domaine biomédical.

Type de projet : **recherches bibliographiques**

Objectifs du projet :

Notre projet se sépare en trois domaines très différents mais qui sont pourtant tous reliés par le phénomène d'ondes de choc. Notre objectif est de comprendre et d'expliquer sous quelle forme apparaît ce phénomène dans l'univers, l'industrie et le biomédical. Pour se faire nous avons étudié :

- L'historique : afin d'aborder de la meilleure manière possible notre sujet.
- La théorie : les outils indispensables pour comprendre certains phénomènes.
- Le domaine de l'univers : les différentes apparitions des phénomènes d'ondes de choc sur Terre et dans l'Espace.
- Le domaine de l'industrie : les contraintes dans l'aéronautique et la propulsion, et les dégâts liés aux phénomènes d'ondes de choc dans l'industrie.
- Le domaine biomédical : ses diverses applications et les machines utilisées.

Mots-clefs du projet : Onde de choc, explosion, thérapie, propagation.

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	8
3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS.....	9
3.1. Généralités.....	9
3.1.1. Les lois mathématiques des ondes de choc.....	9
3.1.2. Types d'ondes de choc.....	12
3.2. Ondes de choc dans le domaine industriel.....	14
3.2.1. Explosion.....	14
3.2.2. Aéronautique et propulsion.....	17
3.2.3. Moyens de prévention des effets des ondes de choc.....	21
3.3. Ondes de choc dans le domaine de l'univers.....	23
3.3.1. Les ondes de choc sur Terre.....	23
3.3.2. Les ondes de choc dans l'Espace.....	25
3.3.3. Les rencontres d'une onde de choc avec un obstacle.....	28
3.3.4. Les ondes de souffle (blast waves) et leurs applications dans l'Univers.....	33
3.3.5. L'énergie libérée lors d'une onde de choc.....	36
3.4. Ondes de choc dans le domaine biomédical :.....	38
3.4.1. L'historique.....	38
3.4.2. Machines à ondes de choc.....	39
3.4.3. Le principe d'action de la thérapie.....	43
3.4.4. Application des ondes de choc à l'esthétisme.....	46
3.4.5. La thérapie des ondes de choc et le sport de haut niveau :.....	50
4. Conclusions et perspectives.....	51
5. Bibliographie.....	52

## NOTATIONS, ACRONYMES

UVCE : Unconfined Vapour Cloud Explosion (Explosion Non confinée d'un Nuage de Vapeur)

BLEVE : Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (Explosion due aux Vapeurs en Expansion d'un Liquide en Ébullition)

NO : Monoxyde d'Azote

COX 2 : Cyclo-oxygénase

VEGF : Vascular Endothelial Growth Factor

PCNA : Proliferating Cell Nuclear Antigen

eNOS : endothelial Nitric Oxide Synthase

BMP : Bone Morphogenetic Protein

## 1. INTRODUCTION

Une onde correspond à la propagation d'une perturbation, sans transport de matière. L'onde de choc est, elle, accompagnée d'une vague de haute pression. Elle est très souvent associée à une transition brutale de la vitesse, de la pression et de la température. Elle a alors un caractère discontinu, et peut être modélisée par une fonction discontinue dépendant de l'espace et du temps, (à l'inverse d'une onde dite « classique » qui se propage progressivement). Ainsi, une onde peut être vue comme un champ.

Notre principal objectif est de comprendre où ce type d'onde peut exister, où il peut être appliqué (biomédical). Nous étudions dans notre projet l'effet d'une telle onde sur un milieu : ses dangers, ses bénéfices, sa propagation, ses sources, ses conséquences ... Initialement, nous ne connaissions que l'exemple classique d'une onde de choc : un avion passant le mur du son. Mais nous souhaitons désormais en découvrir d'avantage sur ce sujet qui est plus qu'intrigant. L'apprentissage de ce phénomène s'avère très complexe mais intéressant. Notre ultime but est en réalité d'en apprendre le plus possible sur les ondes de choc.

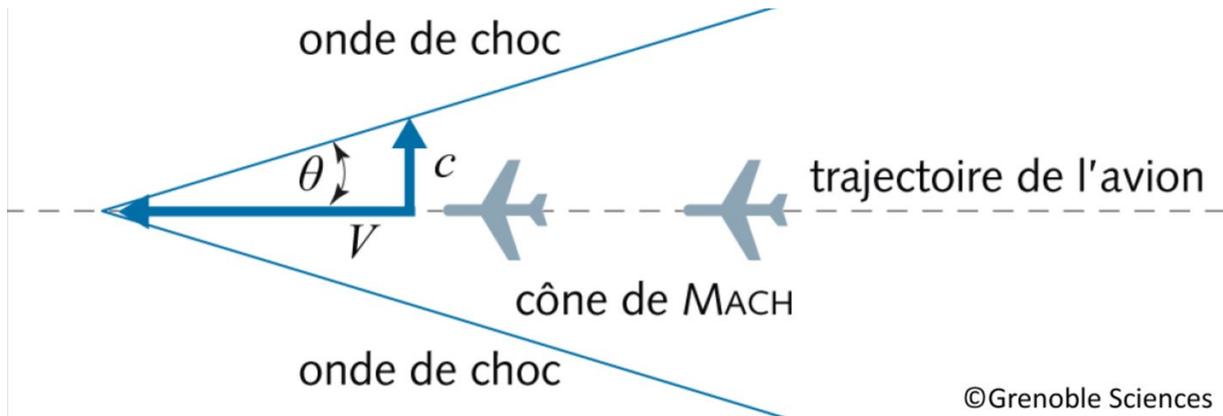
Le phénomène d'onde de choc a été remarqué grâce à des phénomènes naturels tels que les explosions. Il est reconnu depuis plus d'un siècle mais reste cependant très complexe.

Siméon Denis Poisson trouve, en 1808, une solution discontinue aux équations d'Euler (1755) vérifiant les équations de masse et de quantité de mouvement. Cette découverte confirme l'existence d'une onde à caractère discontinu. La théorie est par la suite vérifiée par Ernst Mach en 1876, grâce à la photographie d'une onde de choc produite par une balle de fusil.



*Illustration 1: Onde de choc produite par une balle de fusil*

Ce physicien est aussi à l'origine d'une donnée pertinente pour l'étude des ondes de choc : le nombre de mach ( $Ma$ ). Il correspond au rapport entre la vitesse locale d'un fluide et la vitesse du son. Enfin, c'est aussi à lui que l'on doit une image simplifiée mais pertinente d'une onde de choc : le cône de Mach.



*Illustration 2: Schéma du cône de Mach*

Lorsqu'un mobile dépasse la vitesse du son, une discontinuité est créée. L'intérieur du cône (dont l'extrémité est délimitée par le mobile) est perturbé par rapport à l'extérieur.

A la fin du XIXème siècle, Rankine et Hugoniot établirent les équations de l'onde de choc droite. Depuis ces découvertes, de nombreuses recherches sont effectuées sur ce vaste domaine. Elles ont notamment permis de comprendre la formation des étoiles et certains phénomènes d'explosion. Depuis peu, les ondes de choc sont aussi utilisées dans les domaines de l'industrie et du biomédical.

## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Ce projet P6 s'est étalé sur 13 semaines durant le deuxième semestre des STPI2 de l'année scolaire 2015-2016, le premier cours a eu lieu le 4 février et le dernier le 9 juin. Notre créneau horaire alloué au projet physique était le jeudi de 11h30 à 13h.

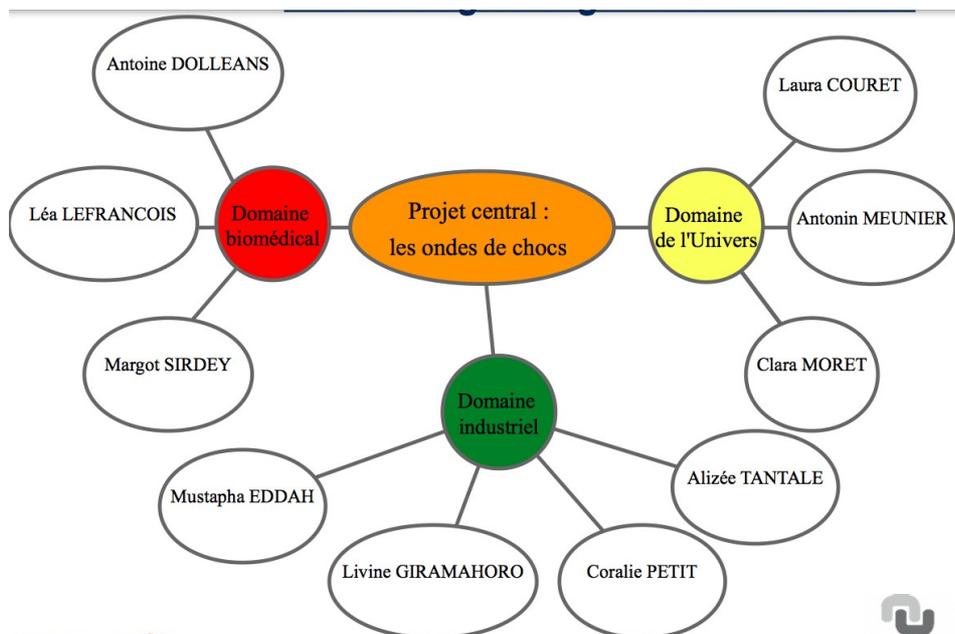
Comme mentionné précédemment, le travail demandé pour notre projet de physique a été de nature théorique. Nous n'avons pas fait d'expériences ou de recherches expérimentales compte tenu de la difficulté à « manipuler » des ondes de choc dans une salle de l'INSA. Nous nous sommes donc concentrés sur des recherches documentaires via Internet et un ouvrage prêté par notre professeur, ainsi que des livres empruntés à la bibliothèque de l'INSA.

Chaque séance s'organisait de la façon suivante : trois rapporteurs (un pour chaque domaine, soit un pour le domaine biomédical, un pour le domaine industriel, et un pour l'Univers) menaient une présentation orale des recherches abouties depuis la séance précédente. Les rapporteurs changeaient d'une séance à l'autre pour que chacun puisse prendre la parole, ce qui a permis une implication de tous les membres du groupe. Pour nous placer dans des conditions proches de celles de l'examen final, nous nous retrouvions dans un amphithéâtre.

D'un commun accord avec notre professeur encadrant, il a été convenu de ne pas se voir toutes les semaines, afin de nous permettre de mieux préparer chaque présentation. En effet, un délai d'une semaine ne représentait pas assez de temps pour approfondir au mieux nos recherches et pour nous regrouper afin d'organiser l'exposé oral à présenter le jeudi suivant. Ainsi, nous nous voyions toutes les deux ou trois semaines en fonction des travaux à accomplir. A la fin de chaque cours, notre professeur responsable de projet nous guidait sur les éléments à mettre en valeur et à approfondir, et sur ceux, au contraire, à oublier.

La dernière séance a été consacrée à une « soutenance blanche » afin de nous préparer au mieux à la soutenance finale, du 20 juin.

Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés :



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Généralités

##### 3.1.1. Les lois mathématiques des ondes de chocs

Dans cette partie, nous donnerons les différentes lois et relations mathématiques qui régissent le domaine des ondes de choc.

##### 1) Le cas d'un choc droit

Comme le montre le schéma suivant, lors d'un choc droit, le front de l'onde est orthogonal à l'axe de propagation.

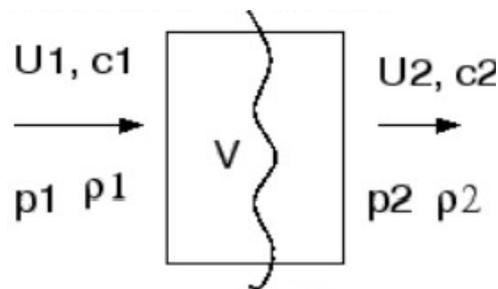


figure 1 : Schéma d'une onde de choc droite

On note  $v_1, c_1, \rho_1, p_1, M_1$  les grandeurs avant le choc et  $v_2, c_2, \rho_2, p_2, M_2$  les grandeurs après le choc. On considère les trois équations générales suivantes :

- Bilan de masse :  $\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$

- Bilan de quantité de mouvement :  $\rho_1 \times v_1^2 + p_1 = \rho_2 \times v_2^2 + p_2$

- Conservation de l'enthalpie totale:  $h_t = \frac{1}{2} v_1^2 + h_1 = \frac{1}{2} v_2^2 + h_2$

On note également  $r = \frac{R}{M}$  où R est la constante des gaz parfaits et M la masse molaire du gaz. De plus on a  $M = \frac{v}{c}$ . Tout d'abord on sait que  $h = C_p T$  et  $c = \sqrt{\gamma r T}$

eq 1.            donc  $h = \frac{C_p}{\gamma \times r} \times c^2 = \frac{c^2}{\gamma - 1}$

On en déduit les différentes équations de saut :

eq 2. 
$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{(\gamma-1)M_1^2+2}{(\gamma+1)M_1^2}$$
 relation de saut des vitesses

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2}$$
 relation de saut des masses volumiques

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_1^2-1)$$
 relation de saut des pressions

$$h_2-h_1 = \ln\left(1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1}(M_1^2-1)\right) - \gamma \ln\left(\frac{(\gamma+1)M_1^2}{(\gamma-1)M_1^2+2}\right)$$
 relation de saut d'enthalpies

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{c_2^2}{c_1^2} = \frac{(2+(\gamma-1)M_1^2)(2\gamma M_1^2+1-\gamma)}{(\gamma+1)^2 M_1^2}$$
 rapport des températures et célérités du son

$$M_2 = \sqrt{\frac{2+(\gamma-1)M_1^2}{2\gamma M_1^2+1-\gamma}}$$
 nombre de Mach après le choc

Cependant ces relations sont uniquement vérifiées lors d'un choc droit, une situation peu fréquente, c'est pourquoi nous devons nous intéresser au cas des chocs obliques.

## 2) Le cas d'un choc oblique

Un choc oblique peut-être schématisé comme ci-dessous :

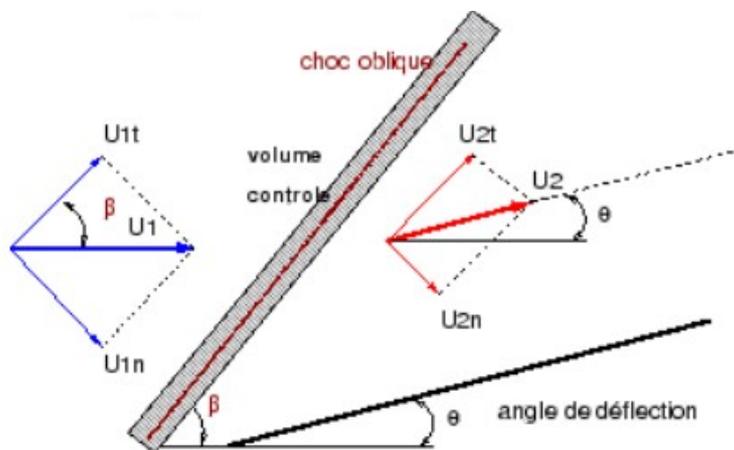


figure 2 : Schéma d'une onde de choc oblique

On note  $u_1, c_1, \rho_1, p_1, M_1$  les grandeurs avant le choc et  $u_2, c_2, \rho_2, p_2, M_2$  les grandeurs après le choc. On part une nouvelle fois des équations d'Euler :

- Bilan de masse :  $\rho_1 u_{n1} = \rho_2 u_{n2}$

- Bilan de quantité de mouvement selon la normale :  $\rho_1 u_{n1}^2 + p_1 = \rho_2 u_{n2}^2 + p_2$

- Bilan de quantité de mouvement selon la tangente :  $\rho_1 u_{n1} u_{t1} = \rho_2 u_{n2} u_{t2}$

- Conservation de l'enthalpie totale :  $h_t = \frac{u_{n1}^2 + u_{t1}^2}{2} + h_1 = \frac{u_{n2}^2 + u_{t2}^2}{2} + h_2$

On remplace  $u_{n2}$  et  $M_1$  par  $M_{n1} = M_1 \sin \beta$  et  $M_2$  par  $M_{n2} = M_2 \sin(\beta - \alpha)$ . On a alors les relations suivantes :

**eq 3.** 
$$\frac{u_{n2}}{u_{n1}} = \frac{(\gamma - 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta + 2}{(\gamma + 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta}$$
 relation de saut des vitesses normales

$$\frac{u_2}{u_1} = \sqrt{\left( \left( \frac{u_{n2}}{u_{n1}} \right)^2 - 1 \right) \sin^2(\beta) + 1}$$
 relation de saut des vitesses

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta}{(\gamma - 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta + 2}$$
 relation de saut des masses volumiques

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left( (M_1)^2 \sin^2 \beta - 1 \right)$$
 relation de saut des pressions

$$\frac{S_2 - S_1}{C_v} = \ln \left( 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left( (M_1)^2 \sin^2 \beta - 1 \right) \right) - \gamma \ln \left( \frac{(\gamma + 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta}{(\gamma - 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta + 2} \right)$$

: relation de saut d'enthalpies

**eq 4.** 
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{c_{2^2}}{c_{1^2}} = \frac{(2 + (\gamma - 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta)(2\gamma(M_1)^2 \sin^2 \beta + 1 - \gamma)}{(\gamma + 1)^2 (M_1)^2 \sin^2 \beta}$$

: rapport des températures et célérités du son

$$M_2 = \frac{1}{\sin(\beta - \theta)} \sqrt{\frac{2 + (\gamma - 1)(M_1)^2 \sin^2 \beta}{2\gamma(M_1)^2 \sin^2 \beta + 1 - \gamma}}$$
 nombre de Mach après le choc

### 3) Les relations de Rankine Hugoniot

Les relations de Rankine-Hugoniot sont des relations de saut entre les valeurs des grandeurs physiques caractérisant l'écoulement entre deux points. Elles correspondent à une transformation adiabatique. B correspond au champ magnétique associé au point. En partant du bilan de masse on a :

**eq 5.**

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$$

$$\rho_1 v_1^2 + P_1 + \frac{(B_1)^2}{8\pi} = \rho_2 v_2^2 + P_2 + \frac{(B_2)^2}{8\pi}$$

$$\left( \rho_1 \frac{v_1^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 + \frac{(B_1)^2}{4\pi} \right) v_1 = \left( \rho_2 \frac{v_2^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 + \frac{(B_2)^2}{4\pi} \right) v_2$$

### 3.1.2. *Types d'ondes de choc*

Une onde est la propagation d'une perturbation, qui produit sur son passage une variation des propriétés physiques locales du milieu. Cette variation doit être réversible, et la propagation de l'onde s'accompagne d'un transport d'énergie sans transport de matière comme pour les ondes sismiques. On parle d'onde de choc dans les cas très particuliers où l'on rencontre une transition brutale dans les grandeurs caractéristiques de la situation étudiée.

Les ondes de choc sont définies différemment selon leur domaine d'étude. En mécanique, une onde de choc est une surface de discontinuité des vitesses qui se crée dans les régions de l'atmosphère où la vitesse d'écoulement de l'air dépasse celle du son. L'onde de choc est alors une zone de transition d'épaisseur très faible, où se produisent des sauts de pression et de température qui expliquent l'effet destructeur de l'onde comme le bang sonique ou la détonation des explosifs. En électricité, une onde de choc est une onde électromagnétique de très courte durée (quelques dizaines de micro secondes) qui croît rapidement jusqu'à une valeur maximale de sa tension, puis décroît plus ou moins rapidement jusqu'à zéro.

Nous allons voir qu'il existe également différents types d'ondes de choc qui se différencient selon leurs propriétés. Il faut noter que pour décrire ces types d'ondes, nous utilisons les notions d'ondes supersoniques et subsoniques, expliquées dans la partie traitant les ondes de chocs dans l'industrie de ce rapport.

#### 1) Les différentes ondes de choc selon leur géométrie

Lorsqu'une onde de choc rencontre un obstacle, elle peut rester droite ou s'incliner.

- Choc droit

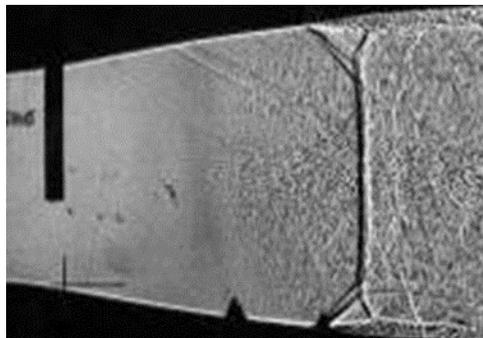


figure 3 : *Onde de choc droite*

Une de ces particularités est qu'il apparaît uniquement lorsque la vitesse de l'écoulement est supersonique.

- Choc oblique

Quand l'onde de choc s'incline, l'écoulement après le choc peut être subsonique ou supersonique. Le choc oblique représente également une diminution du nombre de Mach avec une augmentation de la pression, de la température et de la masse volumique.

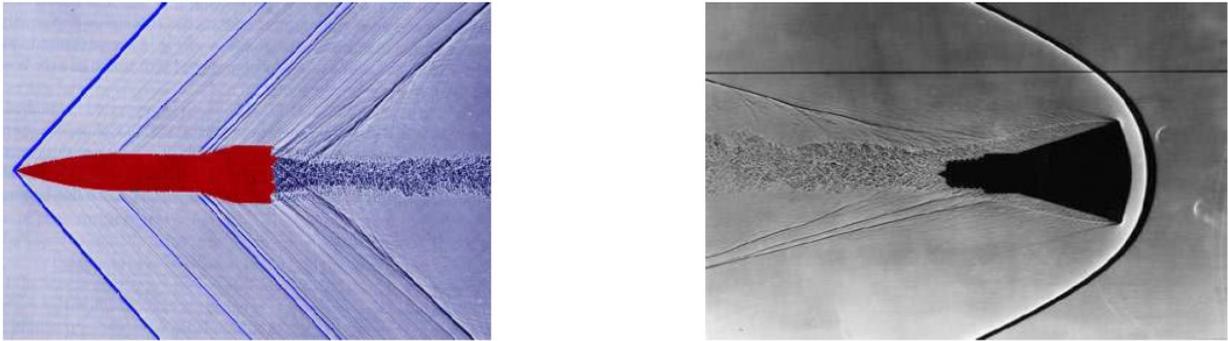


figure 4 : chocs obliques

## **2) Selon leur variation au cours du temps**

- Onde de choc stationnaire

Une onde de choc lorsqu'elle rencontre un obstacle peut également s'y accrocher : elle sera alors dite fixe par rapport au temps. L'onde de choc ne se propage plus, elle est localisée en un même point de la source ponctuelle.

- Onde de choc instationnaire

L'onde de choc est en mouvement, c'est-à-dire que la vitesse de l'onde varie au cours du temps comme c'est le cas pour une explosion.

## **3) Selon leur état**

- Onde de choc inerte

Le choc inerte n'entraîne ni détonation ni déflagration. Il a donc une faible réactivité. Il se propage même s'il est considéré comme au repos mais sa vitesse de propagation est plus faible que l'onde de choc réactive.

- Onde de choc réactive

Une onde réactive intervient dans un régime d'explosion où la substance condensée est transformée en produit de combustion gazeux. Elle se propage à plusieurs milliers de mètres par seconde et engendre en champ proche de la charge explosive une surpression pouvant aller jusqu'à plusieurs bars.

## 3.2. Ondes de choc dans le domaine industriel

### 3.2.1. *Explosion*

#### 1) Quelques définitions

##### Explosion :

L'explosion se caractérise par un déplacement de matière en combustion appelé front de flamme (c'est une fine zone dans laquelle se déroule la combustion ; elle sépare deux milieux : un milieu contenant le combustible et un milieu contenant les produits issus de la combustion) et par un déplacement de gaz frais appelé onde de choc. L'explosion est un phénomène au cours duquel des gaz sous pression sont libérés ou engendrés en un temps extrêmement court. (Dans les explosions homogènes, la réaction chimique a lieu simultanément dans tout le volume de l'explosif ; dans les explosions hétérogènes [déflagration et détonation], la réaction se propage de proche en proche dans l'explosif.)

##### Détonation :

Une détonation peut être à l'origine d'une explosion. Elle est la décomposition extrêmement rapide d'un explosif, qui se caractérise par la propagation d'une flamme, à une vitesse de plusieurs kilomètres par seconde (2 voire 3 km/s), d'une onde de pression dans la substance explosive. Elle est composée de deux ondes : une onde de choc qui augmente la pression et la température du milieu, permettant la naissance de l'onde de combustion. Ces dernières sont liées puisque l'onde de combustion entretient l'onde de choc. L'onde de choc et le front de flamme sont confondus ce qui a pour conséquence : une augmentation considérable de la pression (suivie d'une dépression), un déplacement de volume d'air très important et un bruit très élevé. (La combustion de l'explosif s'accompagne d'une onde de choc responsable des effets brisants de la détonation ainsi que de la détonation par influence, capable de provoquer à distance d'autres détonations de charges explosives).

##### Déflagration :

La déflagration est une combustion très vive qui se propage dans une substance explosive principalement par conductibilité thermique. La déflagration c'est quand le front de flamme se déplace plus lentement que l'onde de choc. La vitesse du front de flamme est subsonique, c'est-à-dire inférieure à la vitesse du son (340 m/s dans l'air à 20°C soit 12225 km/h). Une déflagration est moins puissante qu'une détonation.

#### **2) Une explosion : L'exemple de Feyzin (France), une industrie pétrolière, survenu le 4 janvier 1966**

Un incendie, provoqué par un véhicule circulant près du site alors qu'une importante fuite de gaz non contrôlée était en cours, a entraîné les explosions successives de deux sphères de stockage de propane. L'accident a fait 18 morts et 84 blessés, dont 49 ont été hospitalisés.

La catastrophe de Feyzin a eu lieu le 4 juin 1966 dans une raffinerie de pétrole qui appartenait au groupe pétrolier Elf, devenu aujourd'hui partie intégrante de Total-Fina-Elf. Rappelons que Feyzin est une ville située au sud de Lyon, troisième commune de France par sa population. La raffinerie avait été ouverte deux ans plus tôt et traitait environ 1,7 Mt de pétrole par an (source : site internet de l'institut pour l'histoire et la mémoire des catastrophes). Ajoutons un fait important : la raffinerie était située et est toujours située à quelques dizaines de mètres de l'autoroute A7.

Les événements ont commencé à 6h40 du matin, alors que des opérateurs étaient chargés d'effectuer un échantillonnage sur une des cuves sphériques de propane de 1200 m<sup>3</sup> remplie à 60%. D'une mauvaise manipulation des vannes par un opérateur a résulté une fuite de propane créant alors un nuage de gaz. Ce nuage a dérivé lentement jusqu'aux abords de l'autoroute qui fut par ailleurs fermée à la circulation à cause de la fuite. Mais le fait est que la départementale qui longe l'autoroute n'a quant à elle pas été fermée et c'est un véhicule en stationnement qui déclencha la combustion du nuage inflammable vers 7h15 du matin. Une minute après le début de l'UVCE, un chalumeau apparaît sous la sphère fuyante : c'est le premier effet domino dû à l'UVCE. Malgré les efforts des secours pour minimiser l'incendie, c'est environ une heure après le déclenchement du chalumeau qu'a lieu le BLEVE de la sphère. Rappelons qu'un BLEVE est une explosion de liquide stocké dans une enceinte confinée et soumis à une forte température et une forte pression. Nous étudierons le phénomène de BLEVE plus en détail dans la suite du rapport. On attribue à l'explosion de la première sphère la mort de 13 personnes. A ce moment-là de la catastrophe, une boule de feu dont la taille fut estimée à plus 400 mètres de hauteur et à 250 mètres de diamètre recouvrait la raffinerie. Vint ensuite un deuxième BLEVE sur une sphère voisine, ne causant pas de mort cette fois-ci.

Le bilan de la catastrophe est important pour l'époque : « 18 morts dont 11 sapeurs pompiers et 84 blessés sur 158 personnes présentes » et environ 1500 habitations ont été affectées par les ondes de choc (source : site internet de l'institut pour l'histoire et la mémoire des catastrophes).

D'importants dommages matériels ont été observés : « inflammation des réservoirs voisins et ouverture de plusieurs sphères de stockage, missiles dus aux BLEVEs retrouvés à plus de 700 m dont l'un de 48 t à 325 m, immense cratère à la place des deux sphères, 8000 m<sup>3</sup> (1 500 t) de produits pétroliers perdus. Le souffle de l'explosion est perçu jusqu'à Vienne (16 km au sud). » (source : site internet de l'institut pour l'histoire et la mémoire des catastrophes).

### **3) Le phénomène de BLEVE**

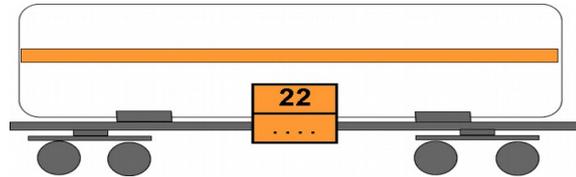
Le phénomène de BLEVE, c'est lorsque l'on transfère de la chaleur à un liquide, la température de celui-ci augmente jusqu'à son point d'ébullition pour former des bulles de vapeurs se développant sur les impuretés et les interfaces avec les solides. Lorsqu'il n'y a pas suffisamment de sites de nucléation (formation au sein d'un milieu donné de germes de transformation à partir desquels se développe une nouvelle structure physique ou chimique) dans le liquide, le point d'ébullition peut être dépassé sans qu'il y ait d'ébullition. C'est ce qu'on appelle un liquide surchauffé.

Une fois le liquide surchauffé et le réservoir fragilisé sous un effet thermique et/ou mécanique, ce liquide peut subir une vaporisation brutale, il apparaît alors une onde de surpression qui se propage, et qui provoque la fragmentation du réservoir, et éventuellement, la création d'une boule de feu si le produit est inflammable.

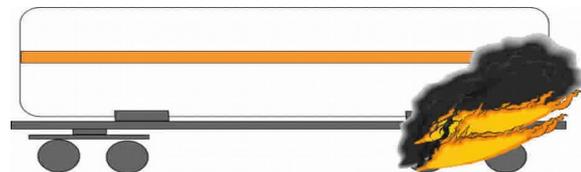
Exemple<sup>1</sup> : une citerne transportant un gaz liquéfié (phase gazeuse en haut, phase liquide en bas).



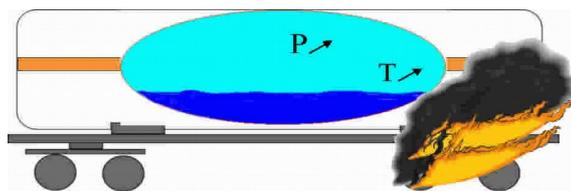
Étape 1 : Citerne transportant un gaz liquéfié avec un code danger 22 (gaz réfrigérant et asphyxiant).



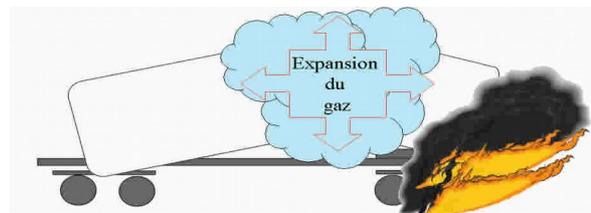
Étape 2 : Le réservoir est soumis à un rayonnement produit, par exemple, par un incendie ce qui aura pour conséquence de fragiliser sa paroi.



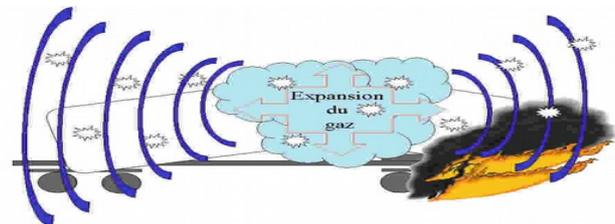
Étape 3 : L'élévation de la température du liquide entraîne un phénomène de vaporisation donc une augmentation de pression de la partie gazeuse.



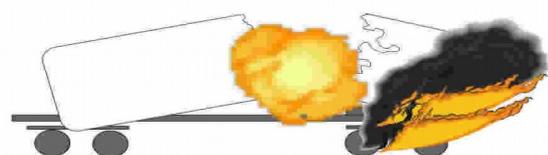
Étape 4 : La pression élevée à l'intérieur de la citerne et la fragilisation de la paroi vont entraîner la rupture de celle-ci et par conséquent une évaporation instantanée de tout le produit contenu dans la citerne.



Étape 5 : Cette évaporation instantanée provoque une onde de choc qui projette des « missiles ».



Étape 6 : Si le produit est inflammable et sous certaines conditions, il s'enflammera en formant une boule de feu.



1 Tiré de <http://iracle.chez.com/cours/Blevev.pdf>

#### **4) Les effets des ondes de choc et les risques lors d'un accident industriel**

Le phénomène d'onde de choc peut engendrer plusieurs types d'effets :

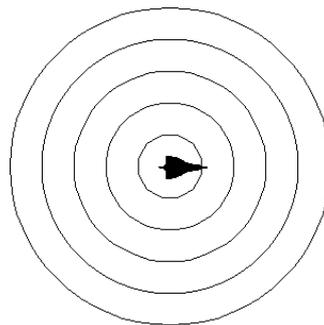
- les effets de surpression résultant d'une onde de choc (déflagration ou détonation) provoquée par une explosion, ce sont des effets mécaniques qui provoquent notamment des lésions aux tympans et aux poumons.
- les effets de projection provoqués par une onde de choc.

### **3.2.2. Aéronautique et propulsion**

#### **1) Ondes de choc lors du déplacement d'un avion**

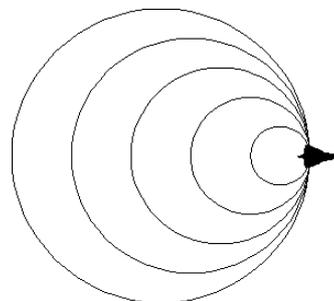
Lorsqu'un avion vole, il met en mouvement les particules d'air qu'il croise, produisant des ondes sonores.

En vitesse subsonique ( $V < \text{Mach } 1$ ), les ondes émises par l'avion se déplacent plus vite que l'avion et se propagent tout autour de l'appareil.



*figure 5 : Ondes de choc émises en vitesse subsonique*

En vitesse transsonique ( $V$  environ égale à Mach 1), l'avion rattrape les ondes qu'il émet. Elles s'accumulent devant le nez de l'appareil, perpendiculairement à sa trajectoire, et forment une sorte de mur à cause de la pression qui est alors très élevée (surpression), le fameux « mur du son ».



*figure 6 : Émission des ondes en vitesse transsonique*

En vitesse supersonique, l'avion va plus vite que le son. Il traîne derrière lui un cône de pression, d'autant plus étroit qu'il va vite. Le mur du son est perforé. On entend le « Bang sonique ».

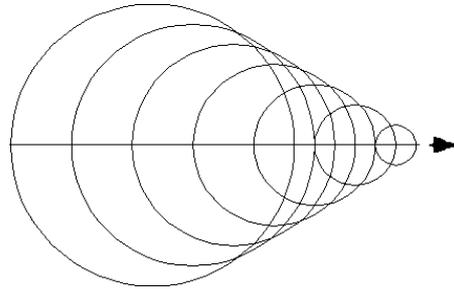


figure 7 : Émission des ondes en vitesse supersonique

Une vitesse proche de celle du domaine transsonique est à l'origine de phénomènes particuliers qui affectent la structure de l'avion. On dit alors que l'avion a atteint sa vitesse critique. Le vol ne redevient normal qu'à condition que le fuselage et la voilure soient convenablement adaptés à la formation du cône, c'est-à-dire que l'avant du fuselage doit être pointu, les bords d'attaque en lame de couteau et la voilure doivent être en forme de flèche. Cependant, aucun moyen n'a été trouvé pour contrer la détonation produite par le bang sonique.

Si les ondes de choc provoquées par les avions franchissant le mur du son sont très intenses, elles peuvent avoir de graves conséquences sur les personnes, les bâtiments et les récoltes au sol. C'est pourquoi les avions supersoniques ne sont autorisés à dépasser la vitesse du son qu'à haute altitude ou lorsqu'ils traversent de vastes étendues d'eau. Les avions modernes ont également des lignes plus élancées pour réduire les ondes de choc générées par le franchissement du mur du son.

La vitesse du son es calculée en fonction de sa température, avec la formule comme suit :

$$\sqrt{\gamma r T}$$

Avec  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  (capacités calorifiques à pression et volume constants)

$r = \frac{R}{M}$  , R constante universelle des gaz parfaits et M masse molaire du gaz considéré

T la température en kelvin

## 2) Ondes de choc et propulsion : La tuyère supersonique

L'onde de choc intervient également dans la propulsion. En effet lors de cette propulsion, un moteur cryogénique est d'abord alimenté par de l'oxygène et de l'hydrogène liquide ; ceux-ci sont brûlés dans une chambre à combustion. Les gaz dans la chambre à combustion peuvent atteindre de très hautes températures par exemple pour le moteur Vulcain d'Ariane ceux-ci peuvent aller jusqu'à 3300°C. Ce gaz est d'abord refroidi par de l'hydrogène liquide dans la chambre de combustion puis il sera ensuite accéléré dans une tuyère à détente afin de fournir la poussée nécessaire. La poussée fournie par un moteur fusée est calculé 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

Par exemple le moteur Vulcain a une poussée de 1125 kN soit 115 tonnes.

Il y a 3 comportements possibles pour une tuyère en fonction du rapport de la pression en chambre de combustion sur la pression ambiante. En effet si ce rapport est inférieur à une certaine valeur, dite optimale, il s'agit d'un régime de sous détente. Un moteur fusée est en régime de sous détente une fois que la propulsion a eu lieu et que la pression en chambre de combustion a diminué. Si ce rapport vaut la valeur optimale alors on est en régime adapté ; pour une fusée, ce régime est atteint une fois que la fusée est lancée et que la pression ambiante diminue. Les ondes de choc apparaissent quand ce rapport est supérieur à la valeur optimale on parle alors de régime de sur-détente car les gaz sont recomprimés dans la tuyère ou à la sortie de celle-ci. Ces ondes de choc créent alors un gradient de pression adverse et si la pression en aval continue à augmenter cela provoque le décollement des flux de la couche limite dans la tuyère à cause des ondes de choc qui se forment. On peut déterminer le seuil de pression grâce aux critères de décollement. C'est d'ailleurs le rôle des motoristes d'estimer ce seuil afin de maîtriser ou d'éviter le décollement des flux de la couche limite qui endommage la tuyère et le moteur. On trouve ces tuyères supersoniques sur les moteurs à réaction ou sur les moteurs fusée servant à lancer des missiles ou des lanceurs.

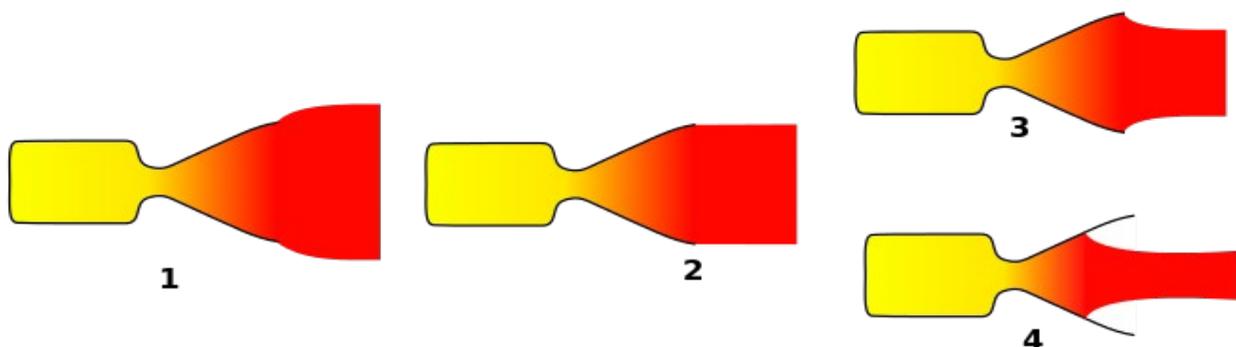


figure 8 : Régimes de fonctionnement d'une tuyère de moteur-fusée en fonction de l'écart entre la pression en chambre de combustion et la pression ambiante. De gauche à droite : 1/ Sous-détente des gaz en sortie de divergent ; 2/ Tuyère adaptée : régime optimal ; 3/ Sur-détente des gaz en sortie du divergent ; 4/ Sur-détente importante des gaz en sortie du divergent avec décollement du flux le long de la paroi du divergent

On voit sur le schéma ci-dessous comment évoluent T,P et v dans une tuyère supersonique.

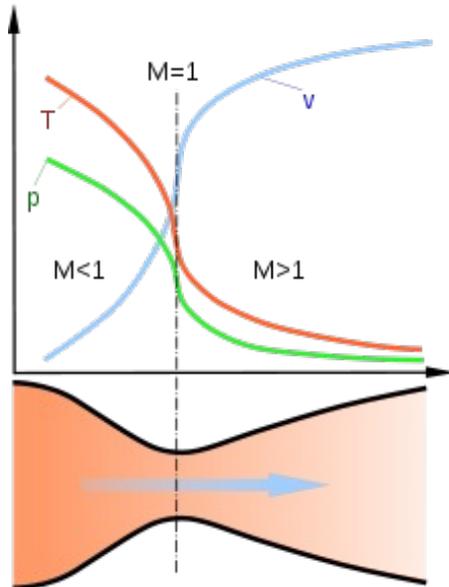


figure 9 : Schéma d'une tuyère montrant la conversion de l'énergie interne du gaz éjecté en énergie cinétique dans une tuyère supersonique.

Nous voyons bien grâce à ce schéma le principe de fonctionnement d'une tuyère : il prend en entrée des gaz sortant de la chambre de combustion à haute pression, 130 bar pour le moteur Vulcain, et températures pour les accélérer et fournir la poussée nécessaire au lancement de la fusée.

On peut calculer la vitesse d'un gaz en sorti de tuyère grâce à cette expression :

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

avec :

- $v_e$  = Vitesse des gaz à la sortie de la tuyère en m/s
- $T$  = Température absolue à l'entrée de la tuyère en kelvin
- $R$  = Constante universelle des gaz parfaits = 8314,5 J/(kmol·K)
- $M$  = Masse moléculaire du gaz en kg/kmol
- $\gamma$  =  $c_p/c_v$  : Coefficient adiabatique
- $c_p$  = Capacité thermique du gaz à pression constante
- $c_v$  = Capacité thermique du gaz à volume constant
- $p_e$  = Pression absolue du gaz en sortie de tuyère en Pa
- $p$  = Pression absolue du gaz à l'entrée de la tuyère en Pa

Par exemple pour le moteur Vulcain, les gaz en sortie de tuyère sont à 4km/s soit 14400km/h.

Dans la propulsion, nous avons souvent à faire à des ondes de choc car le régime adapté n'est pas possible lors du lancement. En effet étant donné que le lancement se fait à basse altitude le régime est nécessairement dans un régime de sur-détente à moins d'avoir une très longue tuyère. Par exemple le moteur Vulcain d'Ariane aurait nécessité une tuyère de 7m ce qui n'est pas compatible avec les performances globales car la structure doit être légère pour une meilleure propulsion.

### 3.2.3. *Moyens de prévention des effets des ondes de choc.*

Comme on a pu le voir dans les parties précédentes, une onde de choc est un phénomène physique généralement considéré comme indésirable, à cause des dommages qu'elle engendre.

En Maîtrise des Risques, dont le but est d'étudier les causes et effets des accidents (industriels ou non), afin de prévenir et limiter le mieux possible les dommages dans des cas futurs.

Lorsque l'exploitant d'une future installation industrielle, ou les autorités compétentes de la collectivité située aux alentours de l'usine, mènent une évaluation sur les risques d'accident majeur qui touchent l'installation, l'estimation des ondes de choc en cas d'explosion est un point majeur à considérer, en prenant en compte les effets de projectiles et les possibilités de réactions en chaîne.

Suite à cette évaluation, des mesures doivent être prises pour atténuer les effets de ces ondes de choc.

Pour ce faire, il existe deux moyens principaux, basés sur le même principe, qui est la réduction de la puissance de l'onde de choc lorsqu'elle touche des zones extérieures ou, au mieux, l'atténuation complète de l'onde de choc : l'éloignement et le confinement.

#### **1) Éloignement**

Cette méthode d'atténuation des effets des ondes de choc est assez simple à comprendre, en effet, il s'agit de calculer la puissance des ondes de choc qui peuvent être potentiellement produites en cas d'explosion des produits à risques. Grâce à ce calcul, on peut ensuite définir les diamètres des cercles dans lesquels les ondes de choc sont considérées comme trop dangereuses pour les populations et les biens, et d'éloigner les zones sensibles selon les résultats trouvés.

Cependant, comme les tables relatives aux puissances des ondes de choc n'existent pas pour tous les produits explosifs, on se sert de l'équivalence TNT (Trinitrotoluène). Cette méthode repose sur l'hypothèse selon laquelle il est possible de reproduire une explosion causée par n'importe quel produit en faisant exploser une masse donnée de TNT, et, par conséquent, reproduire les surpressions à l'identique.

Pour ce faire, on se sert de l'équation suivante, qui permet, connaissant l'énergie libérée par le combustible étudié après explosion et le « rendement » (qui désigne ici la capacité des flammes à produire des surpressions) de l'explosion de ce combustible, de calculer la masse de TNT nécessaire à cette approximation :

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

$a$  le rendement de l'explosion de gaz.

$M_{TNT}$  La masse de TNT recherchée

$E_{TNT}$  l'énergie libérée par 1 kg de TNT (environ 4690 kJ) et enfin

$E_{gaz}$  l'énergie que le combustible peut libérer.

On peut ainsi, grâce à cette formule et aux tables existantes sur le TNT, évaluer la décroissance de la surpression engendrée par l'explosion en fonction de la distance par rapport à l'épicentre, et ainsi avoir les précautions nécessaires vis à vis de la distance à mettre entre les produits et les zones sensibles.

## 2) Confinement

Une autre méthode plus efficace et moins « coûteuse » en espace (en effet, on ne peut se contenter d'isoler les industries afin d'éviter tout problème) consiste à confiner les produits explosifs afin de réduire considérablement la valeur des surpressions causées par l'explosion. Pour ce faire, on utilise des mousses aqueuses.

Une mousse aqueuse est composée de gaz emprisonné dans des cellules de liquide. Le diamètre de ces cellules est de l'ordre du millimètre.

Au passage d'une onde de choc, la mousse se fragmente, c'est-à-dire que les films formant la mousse se rompent, pour former un spray de minuscules gouttelettes de liquide qui se vaporisent sous l'effet de la chaleur apportée par l'onde de choc.

Suite aux changements de milieu de propagation que va subir l'onde de choc, sa vitesse et sa puissance seront fortement diminuées par la présence de la mousse. Un stockage de produits explosifs confinés par de la mousse aqueuse sera donc moins dangereux pour les zones sensibles situées aux alentours, comme on peut le voir en *Figure 10*.

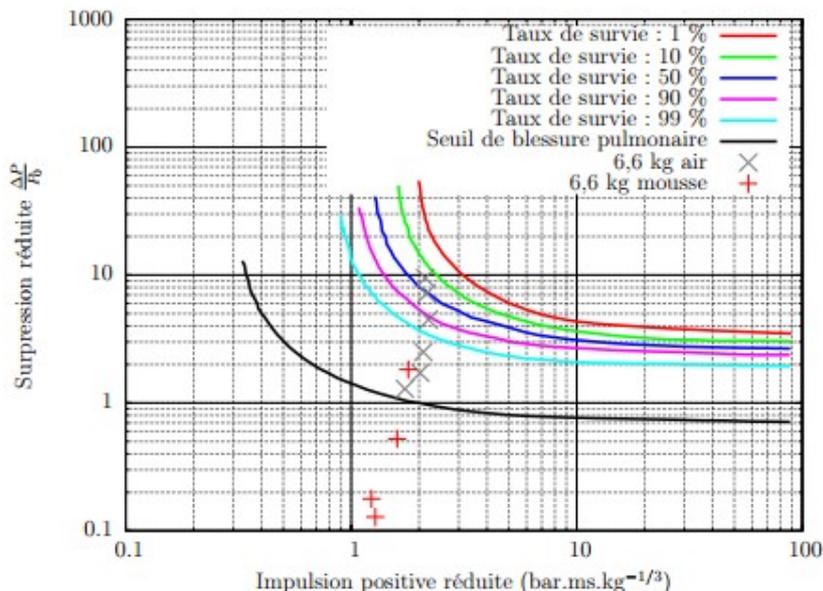


figure 10 : Diagramme de pression réduite en fonction de l'impulsion réduite d'une onde de choc

On voit bien que les blessures mortelles infligées par la détonation dans l'air deviennent moindres en présence de mousse. On peut donc très bien imaginer la raison pour laquelle la mousse peut être un moyen de prévention très efficace en milieu industriel et pourquoi on s'y intéresse depuis plus d'une trentaine d'années.

### 3.3. Ondes de choc dans le domaine de l'univers

Dans cette partie, nous nous sommes concentrés sur les différentes apparitions des ondes de choc dans l'Univers, donc sur Terre et dans l'Espace. Il nous a également semblé judicieux d'aborder les différentes rencontres des ondes de choc avec un obstacle, qui surviennent notamment dans l'Univers. De plus, nous nous sommes intéressés à un type d'ondes de choc en particulier, qui apparaît également dans la Nature : les ondes de souffle. Enfin, pour compléter notre étude, il nous a semblé intéressant de connaître l'énergie libérée lors d'une onde de choc.

#### 3.3.1. Les ondes de choc sur Terre



figure 11 : Orage volcanique au Japon en 2013

Le phénomène d'onde de choc dans la nature est souvent mal interprété, en effet cette onde ne provoque pas uniquement un simple bruit violent mais aussi une explosion. Il s'agit d'une onde de pression créée par la transition brutale de grandeurs d'état telle que la température, la pression et la masse volumique.

Nous avons choisi de décrire plus précisément les phénomènes d'éruption volcanique ainsi que du tonnerre dans le cadre des ondes de choc.

#### **1) Le phénomène des explosions volcaniques**

Une éruption volcanique est une explosion, c'est-à-dire la transformation rapide d'une matière en une autre matière ayant un volume plus grand, sous forme de gaz généralement. Plus cette transformation s'effectue rapidement, plus la matière résultante se trouve en surpression. L'onde de choc créée ensuite un souffle déflagrant ou détonant en fonction de la vitesse de l'onde (*voir partie industrielle*) qui est causé par une détente jusqu'à la pression atmosphérique (à l'équilibre).

Plus précisément, l'onde de choc créée par l'explosion engendre un pic de pression brutal pendant une certaine durée. Ce pic interprété par une succession de perturbations qui se propagent à une certaine vitesse est à l'origine du bruit d'explosion. Après le passage de l'onde de choc, il se produit une dépression (*voir 4. blast waves*).

Lors d'une éruption volcanique, les ondes de pression se propagent dans le nuage de poussières et de gaz au-dessus du cratère à une vitesse très élevée (détonante ou déflagrante). Au moment de l'explosion, les particules situées juste à l'entrée du cratère sont violemment déplacées et percutent leurs voisines. Un mouvement de déplacement leur est alors transmis, ces particules reviennent ensuite à leur place. Les particules voisines sont alors éjectées à leur tour et percutent de nouvelles particules et ainsi de suite.

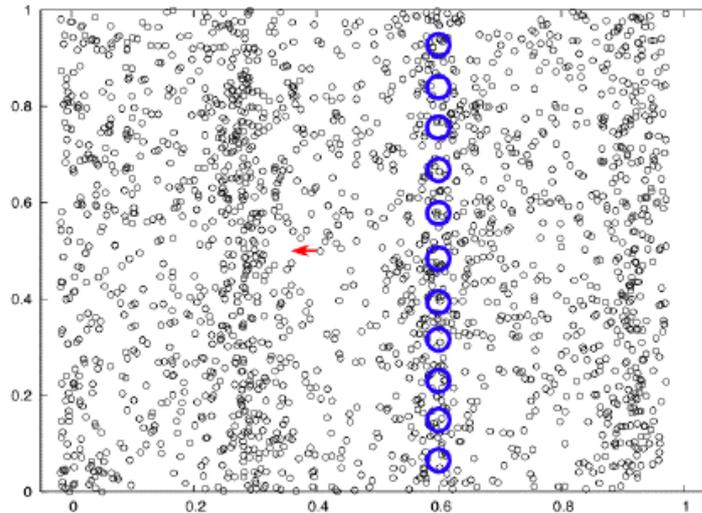


figure 12 : *Mouvement de déplacement des particules lors d'une éruption volcanique*

La perturbation se propage ainsi dans le nuage de poussières, créant des zones de forte pression et de faible pression et ainsi de faibles et fortes densités. La longueur d'onde (distance entre 2 pics de pression) est assez grande, ce qui permet de distinguer les zones où le nuage est comprimé par l'onde (zones plus foncées) et celles où le milieu se dilate (zones plus claires) (voir figure 2).

Les ondes de choc lors d'une éruption volcanique sont très énergétiques : l'air est extrêmement comprimé puis dilaté, puis comprimé et dilaté ainsi de suite... Ces changements d'état rapide de l'air affectent les propriétés de l'air comme l'humidité qui se condensera plus ou moins facilement ce qui rendra la zone plus ou moins opaque (voir figure 3).



figure 13 : *Éruption du volcan Calbuco au Chili*

Ainsi grâce à notre connaissance sur les types d'ondes, nous pouvons dire que lors d'une éruption volcanique, l'onde de choc est instationnaire et inerte. En effet, l'onde de choc se propage à vitesse non constante et est causée par un effet de pression important.

## **2) L'origine de la formation du tonnerre**

Le tonnerre représente une onde de choc de type acoustique (voir figure 4). En effet, le bruit du tonnerre est produit par la transition brutale de température de la masse d'air du nuage au cours d'un orage.

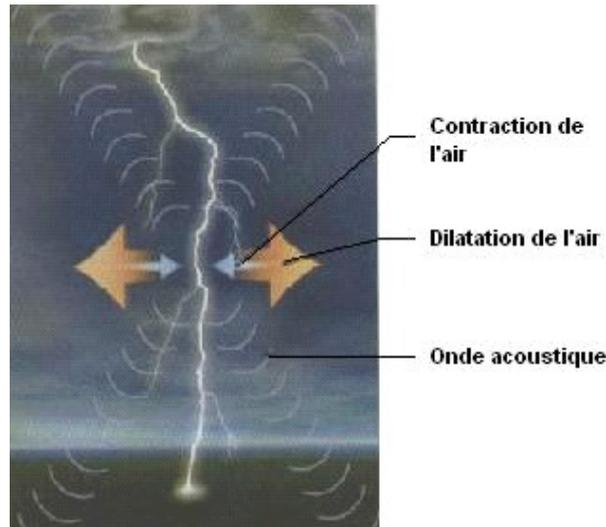


figure 14 : Représentation du mouvement de l'air lors d'un coup de foudre

Au moment du coup de foudre, l'éclair percute le sol. Le courant électrique qui circule dans l'éclair est alors comprimé par un champ magnétique porté par le courant de retour. Cette compression s'accompagne également d'une surpression et d'une augmentation de la température des gaz à l'intérieur de l'éclair. Le contact de l'air environnant et de la foudre, ayant à cet instant une température pouvant atteindre 30 000°C, provoque une dilatation puis une contraction de l'air. Une fois l'éclair passé, les gaz subissent une détente soudaine. L'onde de choc est générée par le mouvement de dilatation et contraction ainsi que la détente : ce qui forme ainsi une onde acoustique.

### **3.3.2. Les ondes de choc dans l'Espace**

Comme expliqué précédemment, une onde de choc est une onde qui apparaît la plupart du temps suite à un choc de haute intensité, comme pour une explosion.

Nous avons pour habitude de dire qu'une onde mécanique a besoin d'un milieu matériel pour se propager, c'est pourquoi il est légitime de se demander s'il existe des ondes de choc dans l'espace. La réponse est en fait positive, car les étoiles rejettent des gaz interstellaires, et ceux-ci sont suffisamment importants pour qu'une onde de choc puisse se propager.

En effet, lors d'un choc dans l'espace, il y a éjection de chaleur, de rayonnements, voire de matière. Ces éléments ne forment pas un milieu suffisamment dense à la propagation d'une onde sonore (c'est pour cela que nous n'entendrons jamais le son d'une explosion dans l'espace), mais suffisent pour les ondes de choc.

## 1) Quelques définitions

Dans un premier temps, nous allons définir quelques éléments de l'espace nécessaires à la compréhension des phénomènes détaillés le long de ce projet.

Tout d'abord, le plasma forme un des quatre états de la matière (les trois autres étant solide, liquide et gaz). On considère la matière comme étant du plasma lorsqu'elle est chauffée à une telle température que la matière devient partiellement ou totalement ionisée. Néanmoins, le plasma forme un milieu neutre, car il est composé d'ions positifs et d'électrons négatifs, qui interagissent les uns avec les autres.

Ensuite, une étoile est, selon futura-sciences, une "boule massive et lumineuse de plasma". Une étoile produit sa propre énergie, et est stable grâce à l'équilibre qui règne entre d'une part la gravité exercée sur l'objet céleste et d'autre part l'énergie lumineuse produite par les réactions thermonucléaires qui ont lieu au sein de l'étoile. La durée de vie d'une étoile n'est pas fixe et dépend directement de sa masse ; les plus massives étant celles qui durent le plus longtemps.

A présent, détaillons les différents types d'étoiles qui existent. On les classe en diverses catégories selon leur température et leur luminosité. Les plus petites sont les naines brunes, qui ne sont même pas considérées comme de "vraies étoiles" car elles sont si petites qu'aucune réaction thermonucléaire ne démarre au sein de leur noyau. Il y a ensuite, par ordre croissant de masse, les naines blanches dont la taille est sensiblement la même que celle de la Terre, les géantes bleues qui sont très chaudes, très massives et très brillantes, les supergéantes rouges qui ont une masse d'environ 20 fois celle du Soleil, les étoiles à neutrons, etc.

## 2) Les étapes de vie d'une étoile

On appelle étoiles jeunes les étoiles en formation. Celles-ci naissent par groupe allant de quelques dizaines à quelques centaines : on nomme cela un amas ouvert. Elles prennent forme dans un gigantesque nuage de poussière et de gaz mélangés : c'est la nébuleuse, que l'on peut observer en 1 sur l'illustration un peu plus bas.

Dans un premier temps, sous l'effet de la gravité, la nébuleuse se contracte et forme des paquets de matière plus ou moins importants et denses, observables en 2 sur l'image, à base d'hydrogène et de poussières interstellaires.

Ensuite, ces paquets deviennent de plus en plus denses et la température augmente progressivement. A ce stade, ces paquets sont surnommés des proto-étoiles, visibles en 3.

A l'étape 4 du schéma : après plusieurs millions d'années, lorsque la proto-étoile atteint une dizaine de millions de degrés, l'étoile s'allume et l'hydrogène et l'hélium initialement présents commencent à fusionner ensemble pour créer de nouveaux éléments. L'étoile est née, comme on peut l'observer en 5 dans l'image ci-dessous.

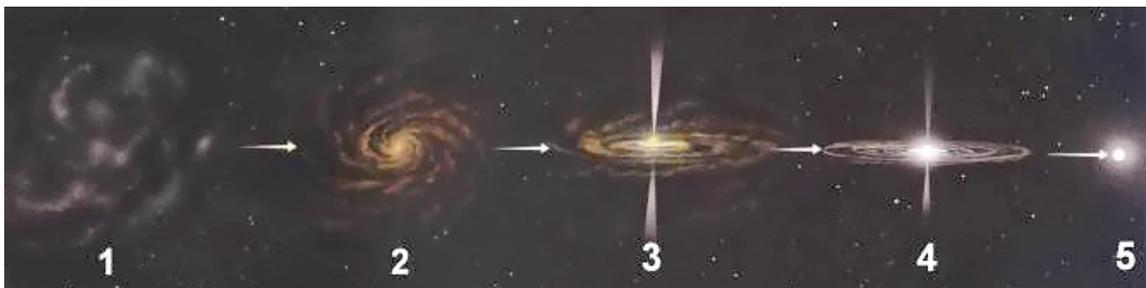


figure 15 : Les étapes de formation d'une étoile

Passons ensuite aux différentes étapes de vie d'une étoile. Une fois la période de contraction de la matière stellaire terminée, l'étoile consomme l'hydrogène situé dans son noyau central pendant une période allant de un million à plusieurs milliards d'années. Elle prend de l'ampleur et devient successivement une géante puis une supergéante.

A partir de ce moment, le devenir de l'étoile va différer en fonction de sa masse. On distinguera deux cas : les petites étoiles, c'est-à-dire les étoiles de masse inférieure ou égale au Soleil, et les grosses étoiles dont la masse est supérieure à celle du Soleil.

Étudions le premier cas : lorsque la petite étoile a consommé tous son hydrogène, elle va rejeter ses couches périphériques et se transformer en naine blanche. Au fil du temps, ces naines blanches vont devenir des naines noires, et on considérera alors que l'étoile est totalement morte. La fin de vie de l'objet céleste est alors plutôt tranquille.

Il en est d'un tout autre ressort pour les étoiles plus massives. En effet, celles-ci disposent de suffisamment d'hydrogène pour prolonger les réactions thermonucléaires. La température du cœur de l'étoile va alors fortement augmenter, ce qui va permettre de synthétiser du fer. Pour rappel, le fer est l'élément le plus stable et celui-ci ne peut pas fusionner. Ainsi, l'équilibre entre gravitation et réactions chimiques mentionnés en aval est rompu. La gravitation l'emporte et les couches externes de l'étoile commencent à dégénérer.

En parallèle, le cœur de l'étoile devient de plus en plus dur (la matière est alors définie comme presque incompressible) et la masse du cœur continue d'augmenter. Lorsque celle-ci atteint 1,44 fois celle du Soleil, il y a ce qu'on nomme un effondrement gravitationnel : les couches externes de l'étoile s'effondrent à une vitesse de 70 000 km/s et viennent s'écraser sur le cœur, qui est à ce stade, comme mentionné précédemment, presque incompressible. Ainsi, les couches sont freinées brutalement et "rebondissent". Ces rebondissements vont générer une onde de choc, qui va gagner en énergie grâce aux réactions entre les derniers éléments (hormis le fer) restants. Cela va permettre de produire une énergie mécanique totale immense, permettant à l'onde de choc de traverser les différentes couches de l'étoile.

Un premier pic de luminosité apparaît, c'est le signe que l'onde de choc est arrivée à la surface. L'étoile explose : c'est la supernova. Il y a alors dispersion des éléments chimiques. Ceux-ci vont permettre la contraction du milieu interstellaire un peu plus loin. L'onde de choc émanant de l'explosion favorise donc la formation de nouvelles étoiles car elle accélère la contraction de la matière dans une nébuleuse que l'on nommera "rémanent de supernova".

### **3) La supernova en détails**

Une supernova n'est pas seulement le terme utilisé pour désigner l'explosion d'une étoile massive. En effet, une supernova englobe l'ensemble des phénomènes qui ont mené à cette explosion. Celle-ci s'accompagne d'une augmentation rapide mais très intense de la luminosité de l'étoile. Depuis la Terre, on peut donc avoir l'impression qu'une supernova apparaît lorsqu'une étoile naît, alors que c'est en fait le contraire. A ce jour et depuis l'invention du télescope, aucune supernova n'a été observé dans notre galaxie, la Voie Lactée. Ceci s'explique par le fait que c'est un phénomène relativement rare : environ 1 toutes les 30 ans pour l'ensemble des galaxies et 1 à 3 fois par siècle pour la Voie Lactée.

Les supernovae sont reconnues pour être les cataclysmes les plus violents de notre Univers, c'est donc elles qui entraînent les ondes de choc les plus puissantes.

La supernova ASASSN-16lh (photographie ci-contre) est la supernova la plus impressionnante qu'on ait vu jusqu'à maintenant. Elle a été repéré le 14 juin 2015 dans une autre galaxie que la Voie Lactée, à environ 3,8 années lumières de notre planète Terre.



figure 16 : *Supernova ASASSN-16lh : explosion d'une étoile massive*

Les scientifiques estiment qu'elle est 570 fois plus lumineuse que le Soleil, beaucoup plus chaude et beaucoup plus puissante qu'une supernova lambda. A ce jour, on ne sait toujours pas expliquer ce qui a causé ce phénomène si intense. Néanmoins, le télescope Hubble devrait permettre d'en apprendre d'avantage. Les supernovas sont très intéressantes pour les chercheurs, car en explosant, les étoiles libèrent tout ce qu'elles ont synthétisé pendant leur vie et pendant l'explosion, ce qui donne des informations essentielles sur l'histoire de l'Univers.

Compte tenu du peu de cas observables, il est difficile de faire des moyennes quant à la vitesse de propagation d'une onde de choc, sa longueur d'onde, sa période, etc. En effet, la puissance de l'explosion dépend directement de la masse de l'étoile, et la masse d'une étoile varie du simple au double. Nous avons cependant une donnée chiffrée pour la supernova W44 qui a explosé à 10 000 années lumières de la Voix Lactée et dont les restes sont aujourd'hui observables dans la constellation d'Aquila. En effet, au terme de 20 ans de recherche, une équipe japonaise a pu déterminer que l'onde de choc résultante a voyagé à une vitesse de  $12,9 \pm 0,2$  km/sec. A ce jour, les chercheurs estiment que les ondes de choc résultantes d'une supernova ont pu se propager jusqu'à 100 km/sec.

### **3.3.3. Les rencontres d'une onde de choc avec un obstacle**

Lors de l'explosion d'un volcan ou d'une étoile, l'onde de choc résultante se propage dans toutes les directions. Cette onde peut donc rencontrer des obstacles : cela paraît évident sur Terre pour une éruption volcanique, mais ça l'est aussi pour une explosion d'étoiles car même si les objets célestes sont éloignés les uns des autres, l'onde de choc se propage à une vitesse telle (de 10 km à 100 km par seconde) qu'elle a le temps de rencontrer d'autres éléments de l'espace avant de s'atténuer.

L'interaction d'une onde de choc avec une surface rigide génère donc une onde réfléchiée et d'une onde réfractée, mais les perturbations qui en résultent dépendent de l'orientation, de la géométrie et de la taille de la structure rencontrée.

### 1) Les différents types d'incidence :

- Incidence normale

Lorsque l'onde de choc arrive à la surface d'un plan rigide dans la direction normale à celui-ci, des flux derrière l'onde sont stoppés et les pressions augmentent considérablement par rapport à celles en milieu libre. Pour l'étude des caractéristiques de la réflexion de l'onde de choc, il nous faut analyser plus en détail les variations des grandeurs au travers d'une onde de choc plane. Certaines variables comme la vitesse, la pression et la température sont discontinues au travers du front de l'onde de choc tandis que d'autres, comme la masse, la quantité de mouvement et l'énergie demeurent continues. D'un point de vue mathématique, l'onde de choc est considérée comme une surface de discontinuité se déplaçant à une vitesse supersonique dans le milieu environnant.

- Incidence oblique

On distingue deux cas concernant l'incidence oblique: la réflexion régulière ou la réflexion de Mach.

#### ➤ Réflexion régulière

Lors de l'interaction entre l'onde de choc et un plan, l'angle d'incidence peut varier de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . Le type de réflexion régulière dépend de l'angle d'incidence et de la puissance de l'onde de choc. La réflexion régulière se produit seulement si l'angle d'incidence est inférieur à un angle critique  $\alpha$ , dépendant du nombre de Mach du choc incident, qui est défini comme suit :  $M_i = u_i/a_i$

Avec :  $u_i$  : vitesse relative du gaz par rapport à l'état incident.

$a_i$  : vitesse du son devant le front d'onde incident.

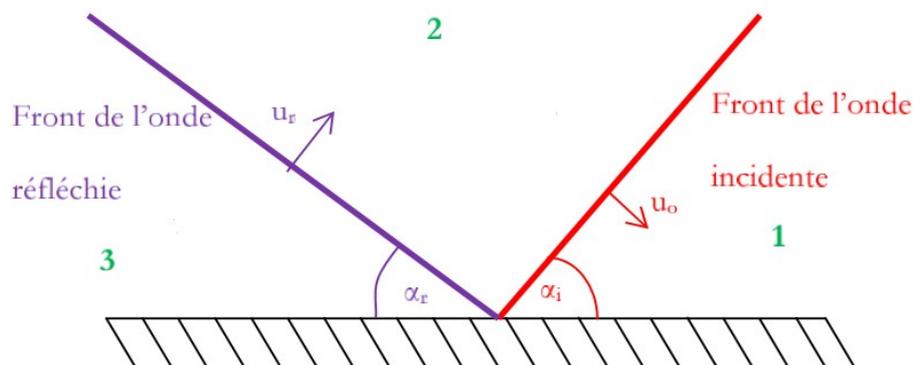


FIGURE 1.16 – Réflexion oblique régulière

figure 17 : Réflexion oblique régulière

#### ➤ Réflexion de Mach

Lorsque l'angle d'incidence  $\alpha_i$  est supérieur à l'angle critique  $\alpha_{cr}$ , la réflexion de Mach apparaît. L'interaction entre l'onde incidente et l'onde réfléchi forme l'onde de Mach. Ce phénomène est lié à l'incapacité de l'écoulement quittant le choc réfléchi à rester parallèle à la surface de l'obstacle. Le choc incident est progressivement rattrapé par le choc réfléchi. Le point d'intersection T de ces trois fronts de l'onde est appelé "point triple". Lorsque l'angle d'incidence atteint la valeur critique  $\alpha_{cr}$ , l'onde de Mach est générée à la surface du plan et se déplace le long du plan. Le point triple peut se déplacer d'une manière parallèle à la surface du plan. Il est possible de distinguer les quatre zones (1,2,3,4) de la réflexion de Mach dont les caractéristiques physiques sont différentes.

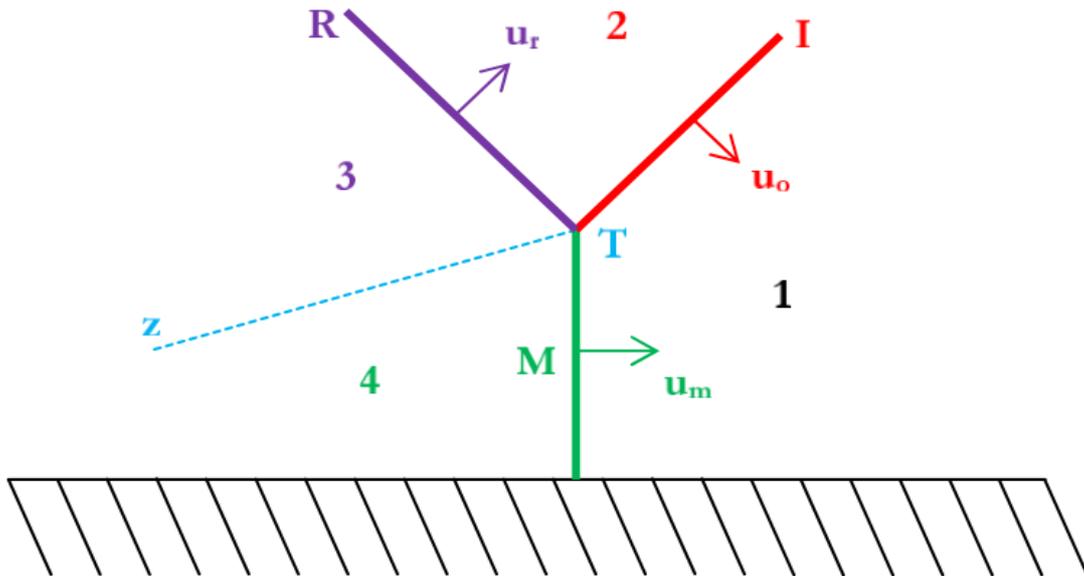


figure 18 : Réflexion de Mach

Le schéma ci-dessous montre l'angle d'incidence maximum en fonction du nombre de Mach et donc quel est le type de réflexion( régulière ou de Mach) qui en découle :

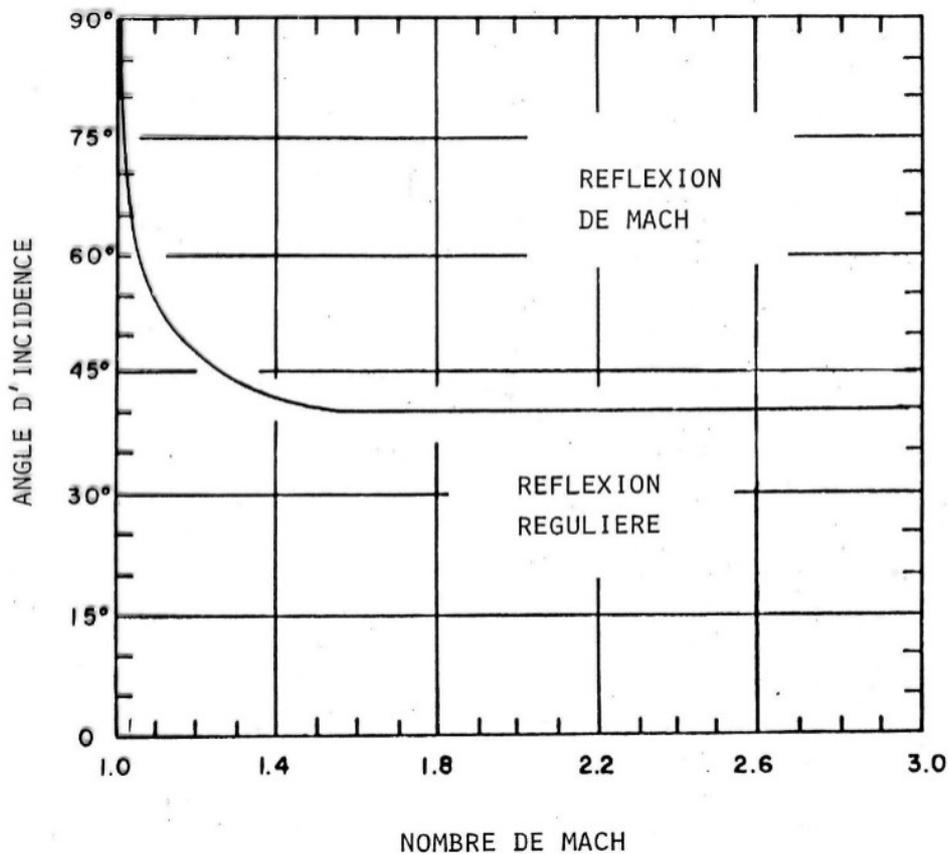


figure 19 : Angle d'incidence maximum en fonction du nombre de Mach

## 2) La diffraction d'une onde

La diffraction consiste en une modification de la trajectoire de l'onde au passage de l'obstacle. Celle-ci ne se produit que lorsque l'ordre de grandeur de la taille de l'obstacle est sensiblement le même que celui de la longueur d'onde.

Par exemple, pour une onde plane, on peut observer ce genre de perturbation :

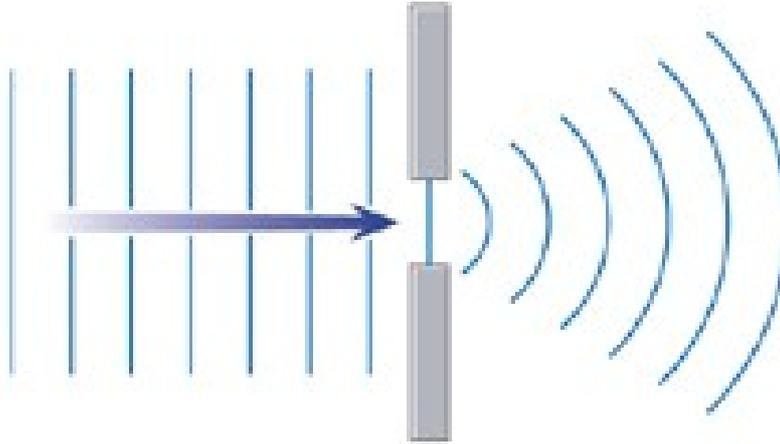


figure 20 : diffraction

On observe que l'onde, à l'origine plane, devient sphérique au passage de l'obstacle.

On observe aussi ce phénomène pour les ondes sphériques, où on peut observer ce genre de modifications :

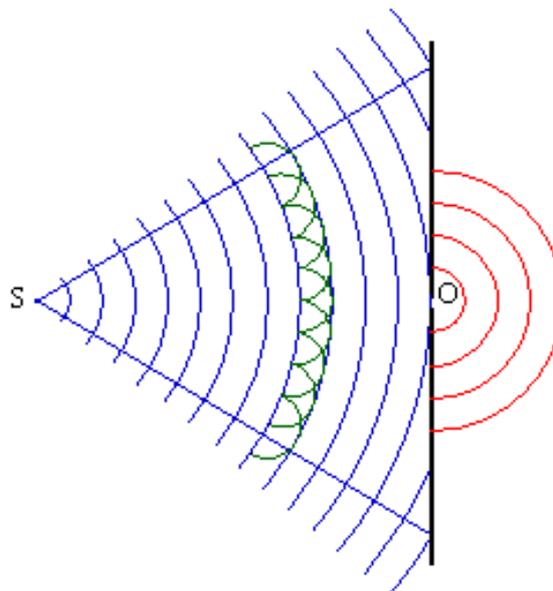


figure 21 : diffraction d'onde sphérique

L'onde sphérique reste sphérique après passage de l'obstacle, mais garde la même longueur d'onde.

### Phénomène de réfraction d'onde

Lors de la propagation d'une onde de choc, si celle-ci traverse des milieux différents, on peut observer le phénomène de réfraction. Cela va être le cas lorsque l'onde de choc résultante d'une explosion volcanique va passer de l'air (indice de réfraction  $n_{\text{air}}=1$ ) à l'eau (indice de réfraction  $n_{\text{eau}}=1,33$ ) par exemple. Expliquons ce qu'il se passe en détails.

La réfraction consiste en une modification de l'angle d'incidence entre le rayon de l'onde et la normale entre le milieu 1 (traversé en premier) et le milieu 2 (traversé en deuxième).

On peut par exemple observer ce genre de fléchissement :

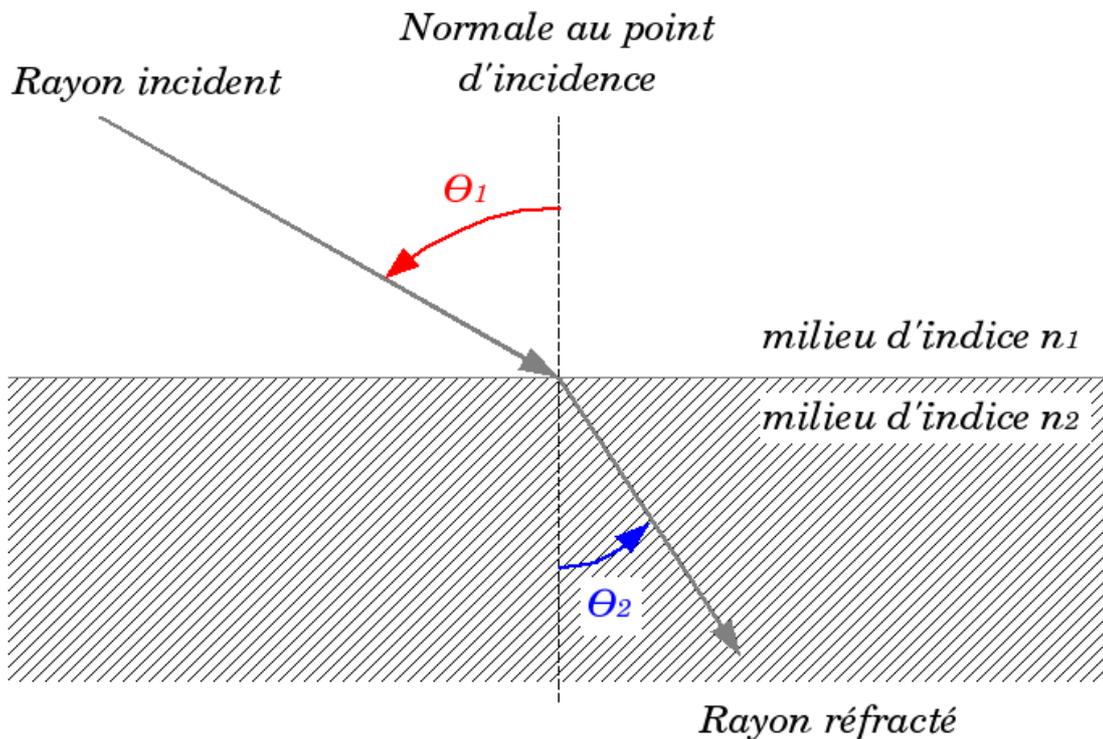


figure 22 : Schéma de réfraction d'après Wikipédia

La modification de fléchissement par rapport à la normale est régit par la loi de Snell-Descartes, que nous énonçons ci-dessous :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Avec  $n_1$  indice de réfraction du milieu 1 et  $n_2$  indice de réfraction du milieu 2.

On peut remarquer que plus  $n_2$  est grand, plus  $\theta_2$  sera petit et proche de la normale.

Ce phénomène s'applique aussi lorsque l'onde de choc percute un humain. En effet, l'onde change de milieu donc les conditions sont réunies pour que la réfraction ait lieu. Cela peut d'ailleurs provoquer des dégâts internes très graves sur le corps. De plus, la surpression accompagnant l'onde provoque des dégâts à l'oreille, pouvant entraîner la rupture du tympan par exemple. On nomme l'ensemble des effets sur l'organisme d'une explosion l'effet de souffle, ou blast.

### 3.3.4. Les ondes de souffle (blast waves) et leurs applications dans l'Univers

#### 1) Définition et formation d'une blast wave

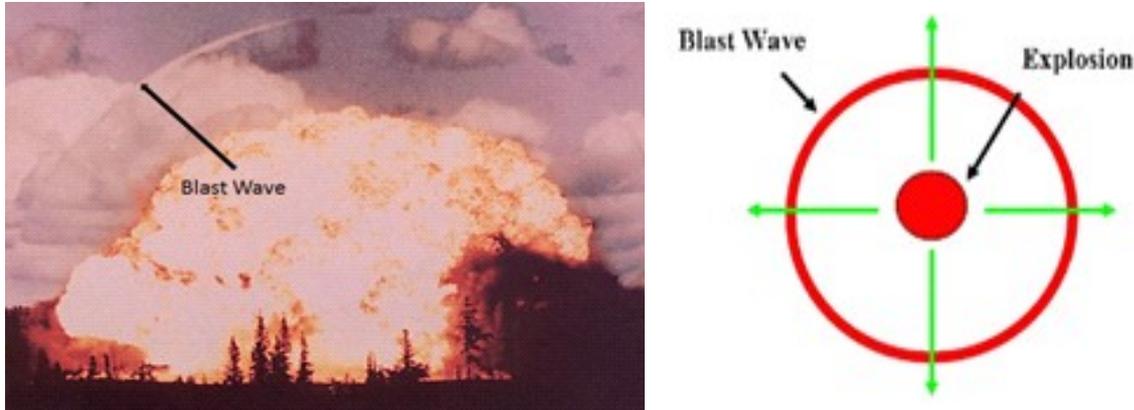


figure 23 : représentation et photo d'une onde de souffle

Une blast wave est formée à la suite de températures et de pressions très élevées au point où se produit une détonation. Cette onde de surpression est provoquée par le flux résultant du dépôt d'une grande quantité d'énergie dans un petit volume localisé. Le champ de ce flux peut être rapproché à une onde de choc principale suivi par un champ de flux subsonique. Lors de sa formation, l'onde de souffle est entourée d'une fine couche de résidus de gaz chauds ou encore « champ » plus connue comme le front hydrodynamique. Cette couche agit comme un piston en poussant et comprimant le milieu environnant.

Entre d'autres termes, une blast wave est une zone de pression étendue à une vitesse supersonique vers l'extérieur depuis le cœur de l'explosion. L'onde de souffle est suivie par un vent d'explosion (blast wind) de pression négative, qui aspire des particules de l'arrière vers le centre.

Les blast waves sont générées par des hauts explosifs détonants dans un champ libre c'est-à-dire sans surface avec lesquelles elle peut interagir, produisant des ondes de choc. Généralement, elles sont provoquées à la suite d'une explosion de type industrielle, mais elles sont également observables dans la nature lors de la formation des supernovas par exemple.

Il est possible de calculer la pression émise lors d'une blast wave en fonction du temps grâce à cette relation :

eq 6. 
$$P(t) = P_s e^{\frac{-t}{t^*}} \left( 1 - \frac{t}{t^*} \right)$$

$P_s$  représente le pic de pression et  $t^*$  est le temps où la pression rencontre l'axe horizontal, c'est-à-dire la pression juste avant la phase négative. On peut également représenter la pression en fonction du temps par ce graphique qui peut être divisé en 3 parties :

- Le pic de surpression : où la pression est maximale au moment de la détonation. Notons qu'avant ce pic, la pression augmente très abruptement depuis la pression atmosphérique.
- L'impulsion : après la détonation, les gaz s'étendent ensuite dans l'air ainsi la pression de la vague d'explosion diminue passant de la vitesse supersonique initiale à celle du son dans le milieu transmis. L'impulsion représente la zone sous la courbe de la phase positive de surpression.
- La dépression ou la phase négative : après que l'air de la vague de pression se soit étendu dans la vague d'explosion, créant ainsi un vide, la pression devient négative due à la bouffée d'air utilisée pour remplir ce vide derrière la vague d'explosion

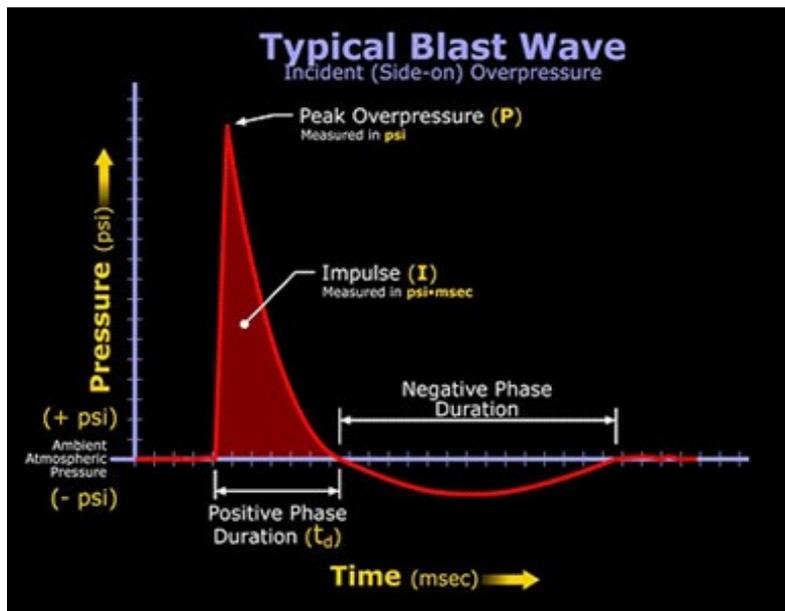


figure 24 : pression d'une onde de souffle en fonction du temps

## 2) Application d'une blast wave : la tige de Mach (Mach Stem)

La formation de la tige de Mach survient quand une onde de souffle est réfléchiée par la terre.

En effet, quand la vague d'explosion frappe la surface de la terre, elle est reflétée et la vague reflétée renforce et intensifie la vague primaire. Comme l'air environnant est déjà chauffé et compressé par la vague d'explosion incidente, la vague reflétée se déplacera beaucoup plus rapidement, et rattrapera ainsi la vague incidente. La fusion de ces 2 blasts waves forme un front d'onde combiné appelé la tige de Mach.

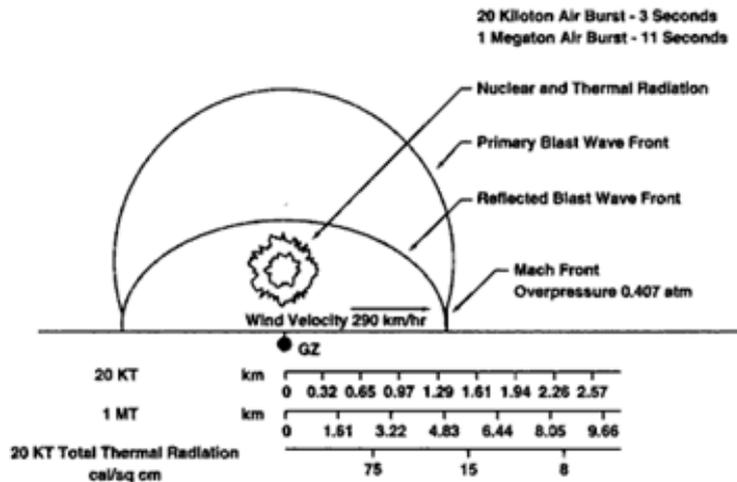


figure 25 : formation d'une tige de Mach

La région près du point zéro dans laquelle les deux types de blast waves sont séparées est la région de réflexion régulière. Cette région est une zone à haute pression qui s'étend de la terre à un certain point appelé le point triple qui se trouve au bord de l'onde de souffle. Dans cette zone, les pics de pressions peuvent être plusieurs fois plus hauts que le pic de pression du front de choc original.

### 3) Application en astronomie des ondes de souffle : solution Sedov-

#### Taylor

Léonid Sedov, physicien soviétique, qui durant la 2<sup>nd</sup> Guerre mondiale est parvenu à modéliser les phénomènes qui se produisent dans une onde de choc produite par une explosion violente, a trouvé une solution pour obtenir l'énergie source instantanée d'un choc pour un point d'explosion. Cette solution a été nommée « Sedov-Taylor similarity solution » valables pour les ondes de souffles (blast wave). Elle a notamment été appliquée pour quantifier les explosions des supernovas. L'expansion de la solution Sedov-Taylor représente la phase d'onde de souffle qui est une expansion adiabatique dans le cycle de vie d'une supernova. La température de la matière qui enveloppe la supernova diminue avec le temps, mais l'énergie interne de la matière est toujours 72 % de l'énergie initiale libérée. Cette solution permet aux astrophysiciens de prédire le comportement de restes de supernova.



figure 26 : photographie aux rayons X de l'expansion des débris d'une supernova

### 3.3.5. L'énergie libérée lors d'une onde de choc

Différentes méthodes permettent de calculer cette énergie :

- A partir d'une photographie d'une explosion

Une explosion cause la création d'une boule de feu qui représente une poche de gaz chaud en sous-pression qui au fur et à mesure de l'avancement de l'explosion s'étend dans l'atmosphère. Le rayon R de cette boule de feu dépend du temps écoulé depuis l'explosion, de la quantité d'énergie E libérée par la bombe et de la masse volumique  $\rho$  de l'air environnant. L'énergie est en J soit des  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ , la masse volumique en  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Cette formule est valable à une constante près, dictée par Geoffrey Taylor (1941) :

eq 7. 
$$R^5 = \left(\frac{E}{\rho}\right)t^2 \Rightarrow E = \frac{R^5}{t^2} \times \rho$$

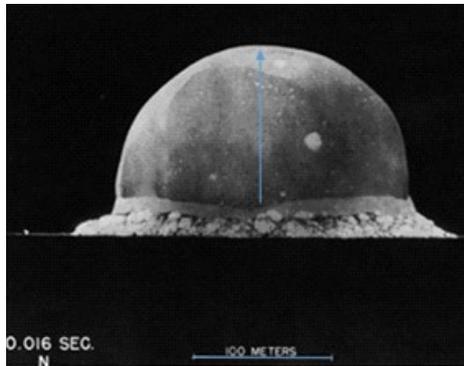


figure 27 : photographie de la supernova Trinity

Par exemple, avec la photo de cette bombe, on peut calculer sa puissance.

Echelle : 2,98 cm = 100 m    Rayon : 3,83 cm = 128 m

Temps :  $t = 0,016$  s     $\rho = 0,0001 \text{ kg}/\text{m}^3$  (densité de l'air au niveau de la mer)

On obtient une énergie de  $E = 1.3 \times 10^{10} \text{ J} = 13$  millions J.

Cette méthode est très peu précise mais permet d'avoir un ordre d'idée.

- A partir des propriétés de l'explosion (réaction chimique)

L'énergie volumique s'exprime en fonction de la variation totale d'enthalpie générée par la réaction et le volume molaire sous la forme :

eq 8. 
$$E_v = \frac{|\Delta H|}{n V_{mol}}$$

Avec  $\Delta H$  la variation totale d'enthalpie,  $V_{mol}$  : volume molaire, n nombre de moles du mélange (réaction). Si le mélange est constitué de gaz parfait, alors on peut écrire que :

eq 9. 
$$V_m = \frac{n_o R T_o}{P_o}$$

Avec  $n^\circ$  : quantité de gaz ( $n^\circ=1$ ),  $R = 8,315$  ;  $T^\circ$  température ambiante  $20^\circ\text{C}$ ,  $P^\circ=P_{\text{atm}}=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

eq 10. 
$$\Rightarrow E_v = \frac{|\Delta H|P_o}{nRT_o}$$

Or l'explosion en champ libre peut être exprimée par  $E = E_v \times \text{volume des gaz}$

eq 11. 
$$E = E_v \times \frac{4}{3} \pi R_o^3$$

- A partir de l'échelle VEI (indice d'explosivité volcanique)

Cette échelle a été inventée en 1982, par deux chercheurs Chris Newhall et Steve Self, dans le but de mesurer l'explosivité d'une éruption volcanique. L'indice d'explosivité volcanique est un nombre entier variant de 0 à 8 qui sert à classer les éruptions volcaniques explosives selon le volume des matériaux éjectés et la hauteur de la colonne éruptive.

L'indice 0 est utilisé pour les explosions très peu explosives et 8 pour les explosions colossales. L'échelle est ouverte, l'indice pourra prendre les valeurs supérieures à 8 si l'explosion étudiée est encore plus importante.

VEI	Ordre de grandeur de l'énergie libérée
2	$10^8 \text{ J}$
5	$10^{17} \text{ J}$
8	$10^{23} \text{ J}$

Cet indice permet également de faire le parallèle entre le degré de cette échelle et l'énergie de l'onde de choc résultante de l'explosion. Voici un tableau donnant un ordre de grandeur de l'énergie libérée par l'onde.

### 3.4. Ondes de choc dans le domaine biomédical :

#### 3.4.1. *L'historique*

Malgré sa découverte depuis les années 50, le terme d'onde de choc n'a fait son apparition en médecine qu'en 1980 pour traiter les calculs urinaires. Il est alors intéressant de comprendre cette nouvelle application, révolutionnaire pour cette époque. Les calculs urinaires sont des petits cailloux formés dans le rein ou dans l'uretère par la cristallisation de sels minéraux. Le traitement s'appelle : la lithotritie. La lithotritie extra corporelle consiste à envoyer des ondes de chocs à l'extérieur du corps en direction du calcul. Les ondes sont formées à partir d'un générateur et dirigées grâce à un système de détection radiographique ou échographique. Il s'agit en réalité d'une poche d'eau s'adaptant aux formes du patient et servant d'intermédiaire pour délivrer entre 3000 et 4000 impacts sur le calcul. Ainsi, il sera fragmenter et disparaîtra, au bout d'une ou plusieurs séances selon : sa nature, sa taille et sa localisation. Pareillement, il existe le procédé de la lithotritie intra corporelle (beaucoup moins répandu). Il est appliqué pour le cas de calculs uretéraux (calcul situé dans l'uretère). Cette méthode utilise un cathéter (petit tube souple) afin de pénétrer dans les voies urinaires.

Encore actuellement, ce traitement est réalisé puisque la maladie touche environ 10% de la population (avec un risque de récurrence de 50%).

Après cette découverte, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la façon dont les ondes de choc peuvent être utilisées sur le corps humain. Au début des années 90, ils ont étudié l'effet des ondes de choc sur les os, ou plus particulièrement sur les cas de retard de consolidation ou de pseudarthrose. Ce dernier terme désigne les « fausses » articulations qui peuvent se former à la suite d'une fracture.

En observant les résultats de la lithotritie, les scientifiques se sont aperçus que les tendons environnants retrouvaient un aspect normal après la lithotritie (alors qu'ils étaient bien souvent abîmés). Les spécialistes de la médecine du sport ont alors décidé d'appliquer ce traitement aux tendons et aux aponévroses (membrane enveloppant les muscles ou liant les muscles aux os). Aujourd'hui, ce soin s'est démocratisé et s'applique sur d'autres personnes que les sportifs de haut niveau.

#### Résumé de l'historique 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 de nouvelles applications en ostéo-articulaire sont régulièrement suggérées

### 3.4.2. Machines à ondes de choc

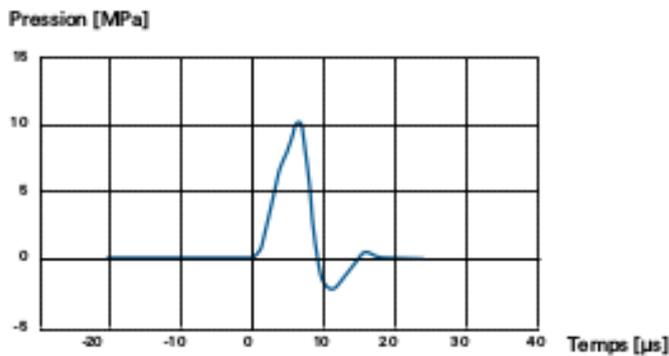


Figure 30 : Variation de pression d'une onde de choc

L'onde de choc est caractérisée par un changement soudain de pression et une haute amplitude non périodique. Il en existe 3 sortes dans le domaine des ondes thérapeutiques.

#### **1) Focus Shockwave Therapy : les ondes de chocs focalisées**

Il y a les ondes de chocs focales F-SWT( Focus Shockwave Therapy). Ces ondes sont de durée très courte, environ 3 nano secondes, mais sont très violentes et peuvent atteindre une profondeur de 12,5 cm. Une onde cylindrique divergente est générée puis est transformée en un onde sphérique convergente en utilisant un paraboloïde de rotation. L'énergie de ces ondes provient d'une source électromagnétique cylindrique et leur niveau d'énergie varie d'une intensité moyenne à élevée. De plus l'énergie maximale de l'onde est atteinte au niveau d'un point focal spécifique du corps.



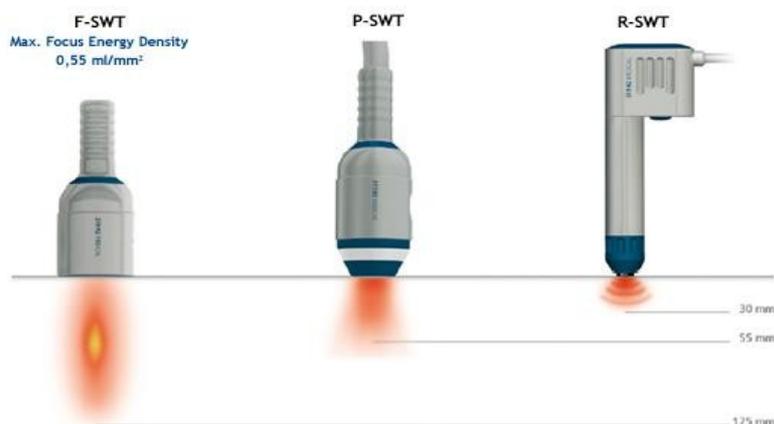
Figure 30 : Représentation de la F-SWT

## **2) Radial Shockwave Therapy : les ondes de chocs radiales**

Il y a les ondes de chocs radiales R-SWT (Radial Shockwave Therapy). Leur durée est d'environ 5 micro secondes, elles sont donc plus longues que les ondes focalisées mais plus atténuées. La profondeur de pénétration des ondes de chocs radiales est fonction du type d'applicateur utilisé et de la pression sélectionnée. Ces ondes sont transmises par un applicateur mécanique. L'onde de choc est générée au moyen d'un projectile à l'intérieur de l'applicateur qui est accéléré par l'air comprimé. De l'énergie potentielle est accumulée par le mouvement du projectile et son poids. Lorsque le projectile frappe le transmetteur d'impulsion, cette énergie potentielle se transforme en une énergie acoustique sous forme d'impulsion à ondes larges. Enfin lorsque l'onde est transmise à l'intérieur du corps du patient, elle diverge vers les zones à traiter.



*Figure 30 : Représentation de la R-SWT*



*Figure 31: Les différentes ondes thérapeutiques*



Figure 32: Différent applicateur pour la R-SWT

Pour les ondes de chocs radiales, 5 familles d'applicateurs sont adaptables sur une seule pièce à main. Les résultats seront complètement différents en fonction de la taille, masse, matériau, forme de l'applicateur, il joue donc un rôle important dans la R-SWT. Il est donc choisi en fonction de la pathologie et de la zone à traiter.

L'applicateur C15 :

- 15 mm de diamètre
- Pour tous types de tendinopathies
- Profondeur de pénétration de 0 à 40 mm
- Intensité : 9/10



L'applicateur DI15 :

- 15 mm de diamètre, émetteur de profond impact
- Pour des zones profondes, troubles chroniques, application de haute énergie
- Profondeur de pénétration de 0 à 60 mm
- Intensité : 7/10



L'applicateur D20-S :

- 20 mm de diamètre
- Pour muscles et tissus conjonctifs
- Profondeur de pénétration de 0 à 50 mm
- Intensité : 7/10



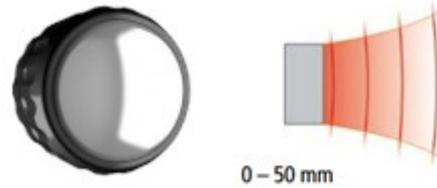
L'applicateur D20-T :

- 20 mm de diamètre
- Pour athlètes professionnels et application de haute énergie
- Profondeur de pénétration de 0 à 60 mm
- Intensité: 9/10



L'applicateur D35-S :

- 35 mm de diamètre
- Pour muscles, tissus conjonctifs et gros muscles
- Profondeur de pénétration de 0 à 50 mm
- Intensité:6/10



### **3) Planar Shockwave Therapy : ondes de chocs planaires**

Et enfin il y a les ondes de chocs planaires P-SWT (Planar Shockwave Therapy). L'onde n'est pas focalisée mais recouvre une certaine surface de la peau. L'appareil utilise un réflecteur parabolique pour rendre l'onde planaire. Le faisceau d'onde est distribué de manière presque parallèle formant un « tube ». C'est pourquoi cette onde est plus utilisée dans le cadre de troubles cutanées et ne se propage donc qu'à 3 cm de profondeur. Représentation de la P-SWT



*Figure 33 : Représentation de la P-SWT*

### **4) Utilisation des machines à ondes de chocs**

Les machines utilisent donc l'une de ses ondes de chocs thérapeutiques. Sur chaque machine, l'onde est produite par un choc dont l'utilisateur définit sa force 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. Ces machines sont simples d'utilisation pour les thérapeutes car tous les paramètres se règlent sur l'écran tactile de la machine mais aussi sur le pistolet . De plus la machine contient des programmes en fonction de chaque anomalie , mais elle contient aussi une encyclopédie thérapeutique facile d'utilisation qui permet de donner toutes les informations sur chaque programme. Le thérapeute peut aussi configurer de nouveaux programmes au sein de la machine s'il le souhaite. Ces machines sont très coûteuses , en effet leur prix peut dépasser les 10 milles euros.



Figure 34 : Machine à onde de choc

MODÈLE	BTL-5000 SWT Power	BTL-6000 SWT Topline Power	BTL-6000 SWT Topline	BTL-6000 SWT Easy
Interface utilisateur	Écran couleur tactile de 8,4 po	Écran couleur tactile de 5,7 po	Écran couleur tactile de 5,7 po	Interface à LED
Pression max.	jusqu'à 5 bars	jusqu'à 5 bars	jusqu'à 4 bars	jusqu'à 4 bars
Fréquence	1-22 Hz	1-20 Hz	1-15 Hz	1-15 Hz
Mode unique & mode continu	●	●	●	●
Mode rafale	●			
Mode de gradient d'intensité	●	●	●	
Programme préétablis	27	27	27	7
Encyclopédie	●	●	●	●
Encyclopédie avec images anatomiques	●	●	●	
Protocoles définis par l'utilisateur	100	100	100	

Figure 35 : Tableau récapitulatif des différentes machines

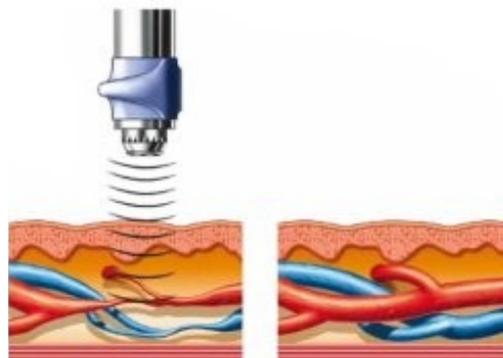
### 3.4.3. Le principe d'action de la thérapie

#### 1) Le mécanisme d'action :

La thérapie par onde de choc a été utilisée pour la première fois en 1980 afin d'éliminer des calculs rénaux sans provoquer de dommages à la peau et aux tissus du patient. Cette thérapie n'a pas pour but de désintégrer les tissus mais de provoquer un effet biochimique dans les tissus lésés suite à l'effet mécanique de l'onde de choc. Selon le kinésithérapeute Denis Briand que l'on a pu rencontrer, cela revient à endommager un peu plus les tissus pour forcer une surgénération, c'est comme faire un pas en arrière pour faire 2 en avant par la suite. Les principaux effets rencontrés vont être une accélération de la cicatrisation ainsi qu'une régénération tissulaire. Ceci a pour effet également d'augmenter la circulation sanguine et l'apport de CO<sub>2</sub>. Il s'agit d'une alternative à la chirurgie ou aux corticoïdes. Pour le Dr Joseph Laurans, chef du pôle médecine physique et réadaptation du Centre de rééducation et de réadaptations fonctionnelles (CRRF) Trestel-Lannion, « le recours aux ondes de choc est une technique déjà utilisée de longue date pour casser les calculs rénaux. La seule différence, c'est qu'ici, les ondes ne sont pas concentrées, mais rayonnantes, libérées directement au contact de la tête émettrice, afin de créer des microlésions sur l'ensemble du tendon et favoriser à la fois une cicatrisation de meilleure qualité et une augmentation de la vascularisation. On peut y recourir pour traiter notamment un tendon de l'épaule, du coude ou du pied».

Les deux types d'ondes de choc couramment utilisés sont les ondes de chocs focales et les ondes de choc radiales. Les ondes de chocs radiales vont être préférées puisqu'elles permettent de traiter une zone plus large. Le kinésithérapeute Denis Briand avoue qu'il change très rarement l'embout de traitement. Il préfère utiliser les ondes de chocs radiales quitte à traiter une zone plus large et faire une séance supplémentaire. La tendinopathie reste la pathologie la plus fréquemment soignée. Le tendon est une structure solide, élastique et résistante qui relie le muscle à l'os ou plusieurs muscles entre eux. Ils agissent comme des ressorts. La tendinopathie apparaît lors de l'inflammation d'un tendon. Dans le cas d'une tendinite lié au sport, il s'agit d'une trop forte sollicitation du tendon. Dans l'autre cas, il peut s'agir d'une tendinite dégénérative, c'est-à-dire un vieillissement du tendon qui va moins bien s'étirer. Dans les cas, il faut traiter le tendon avant la rupture.

A la suite du traitement, une diminution de la douleur apparaît rapidement. En effet, grâce à l'action mécanique des ondes de choc sur les tissus, un processus de cicatrisation est relancé. On peut remarquer un effet mécanique tout d'abord avec l'onde de choc puis un effet biochimique lorsqu'elle a percuté les tissus cellulaires. Diverses réactions biologiques vont avoir lieu par la suite. L'augmentation de la perméabilité cellulaire va permettre de stimuler la division cellulaire mais également de stimuler les cellules souches : ce sont des cellules indifférenciées qui ont la capacité d'engendrer des cellules spécialisées par différenciation cellulaire. Au niveau de la zone de traitement, la libération de monoxyde d'Azote (NO) avec un effet vasodilatateur va jouer un rôle important dans l'angiogenèse, c'est-à-dire dans la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins à partir de vaisseaux préexistants.



*Figure 36 : Effet vasodilatateur d'une onde de choc*

L'activité de la substance P, médiateur de la douleur va être quant à elle réduite. Ainsi, la réduction de sa concentration va diminuer la douleur ainsi que le risque de développement d'un œdème. Les ondes de choc permettent également de diminuer l'activité des médiateurs de l'inflammation, tels que la COX 2, ce qui permet d'induire un effet anti-inflammatoire. De plus, la libération par l'organisme d'endorphines, et de substances inhibitrices de la douleur va permettre de diminuer la douleur à court terme (24h à 48h). Cependant, les effets à long terme sont recherchés. Ainsi, il est nécessaire de répéter cette thérapie pendant environ 5 à 6 semaines pour remarquer une augmentation de la vascularisation locale et cicatrisation améliorée grâce à la formation de nouvelles fibres de collagène d'excellente qualité. Le collagène est une protéine qui a pour fonction de donner aux tissus une résistance mécanique à l'étirement. Cette protéine est nécessaire pour processus de réparation des structures endommagées ligamentaires et myosquelettique.

**2)Description d'une étude expérimentale démontrant l'efficacité de la thérapie :**

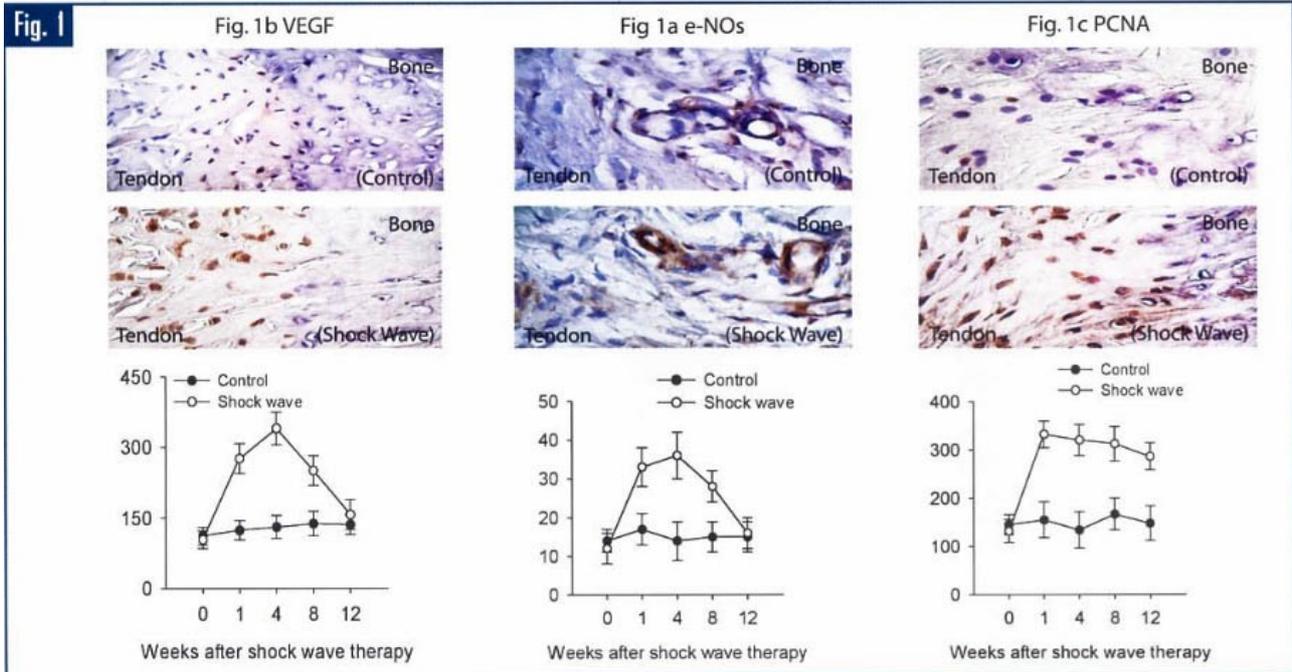


Figure 37: Évolution des protéines VEGF, PCNA et de l'enzyme eNOS en fonction des séances

Ci-dessous, nous pouvons analyser les résultats d'une étude menée sur 50 lapins néo-zélandais au niveau du tendon d'Achille. La patte droite du lapin recevait un traitement par onde de choc alors que la patte gauche recevait simplement un traitement simulé sans onde de choc. Le traitement par onde de choc était constitué de 500 impulsions à 14 kV. Des relevés de résultats ont été effectués dès le début, puis après 1 semaine, 4, 8 puis enfin 12 semaines. out d'abord, nous pouvons remarquer une augmentation importante du nombre de vaisseaux sanguins (neo-vessel) entre les semaines 4 et 12 alors qu'aucune augmentation n'est à remarquer du côté du traitement simulé. De plus, une augmentation importante des protéines VEGF et PCNA, ainsi que de l'enzyme eNOS est remarquable à partir de la première semaine jusqu'à la semaine 8 avant un léger retour à la normal. La VEGF est notamment une protéine associée au déclenchement de la formation de nouveaux vaisseaux sanguins nécessaire à la croissance de nouveaux tissus. Nous pouvons également remarquer une diminution de la substance P, qui comme expliqué précédemment est associé à l'expression de la douleur. Les ondes de chocs permettent donc de libérer de nombreuses substances permettant notamment d'améliorer l'apport sanguin ainsi que la création de nouveaux vaisseaux sanguins.

### 3) Avantages et inconvénients :

Cette thérapie dispose donc de nombreux avantages. Tout d'abord, concernant son taux de succès, après de deux ou trois séances, 80 % des patients indiquent ne plus ressentir de douleurs ou bien ils ressentent une douleur nettement plus faible. Ce taux de réussite est équivalent chez le sportif ou la personne sédentaire. Un des avantages non négligeables de cette thérapie est qu'il s'agit d'un examen non invasif, c'est-à-dire qu'aucune effraction de la peau n'est nécessaire. Il s'agit d'une très bonne alternative à la chirurgie en étant un traitement ambulatoire ne nécessitant pas d'anesthésie ni de médication. Par ailleurs, les ondes de choc peuvent être utilisées pour de nombreux traumatismes et contractures. Des plus fréquents comme les tendinopathies jusqu'à un claquage ou bien une déchirure. Toutefois, il existe des contradictions, il ne faut pas présenter de troubles de la coagulation ou avoir un traitement anticoagulant. Cette thérapie est également déconseillée pour les femmes enceintes ainsi que pour les enfants en période de croissance. De plus, cette thérapie entraînant notamment une néogénèse : la formation de nouvelles cellules, cette thérapie est contre-indiquée aux personnes souffrant de cancer. À savoir, il est possible de ressentir une certaine douleur lors du traitement, cette dernière varie de tout ou rien selon le patient. Cependant, la douleur sera plus prononcée pour un traitement près d'une zone osseuse que pour un traitement d'une déchirure musculaire. Dans le cas, où la patient ne supporte pas les ondes de chocs ou bien que ces dernières sont inefficaces, une alternative consiste à effectuer un Massage Transversal Profond (MTP).

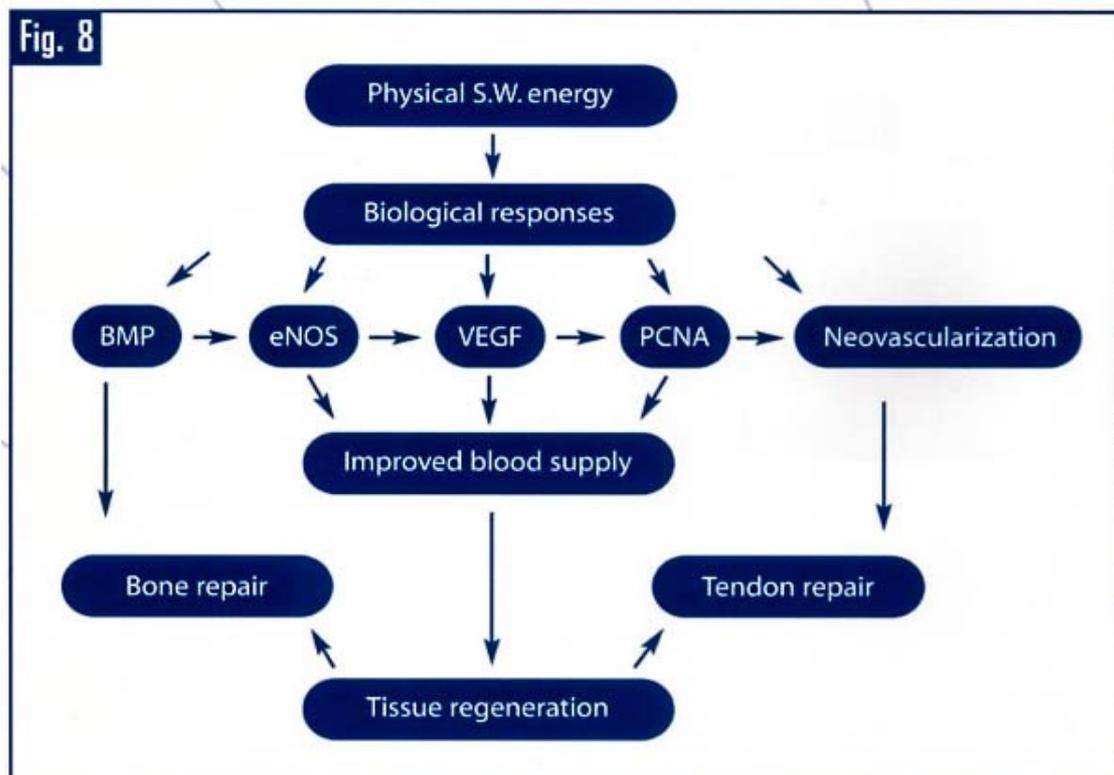


Figure 38: Schéma général de la thérapie par ondes de choc

### 3.4.4. Application des ondes de choc à l'esthétique

Les ondes de choc dans le domaine de l'esthétique ne sont pas destinés à résoudre les problèmes de poids. Elles ont le plus souvent pour but d'éliminer les amas de graisse ou de cellulite localisés, tels que la « culotte de cheval », des déformations de la silhouette au niveau des genoux, des hanches ...

Cette thérapie est aussi utilisée pour améliorer l'aspect et la qualité de la peau (cas de la « peau d'orange » par exemple).

Parfois, le traitement par ondes de choc est utilisé pour un raffermissement du derme et de l'épiderme au niveau du visage. Il peut aussi être utilisé pour un traitement de l'abdomen ou du triceps.

Les ondes de choc ont plusieurs effets : à la fois défibrosant, lipolytique et favorisent la restructuration du collagène.

Le traitement par ondes acoustiques visent à :

- relancer la micro-circulation des vaisseaux sanguins qui est parfois ralentie dans les zones de cellulite (cela dépend du type de cellulite)
- assouplir le tissu conjonctif\*\* épaissi de la cellulite et réduire la fibrose\*\*\*. En d'autres termes, il s'agit de réduire la couche de peau qui recouvre les organes.

Tout cela va entraîner à termes, une diminution globale du volume de la peau et une amélioration de sa qualité.

L'effet lipolytique des ondes acoustiques va permettre l'élimination des lipides.

La restructuration du collagène est un phénomène important, puisque c'est une protéine présente dans le tissu conjonctif qui évite l'étirement des tissus. Ainsi cela donnera un aspect plus ferme à la peau et permettra aussi une résorption des corps gras. Plus précisément, les impulsions acoustiques engendrent la prolifération des fibroblastes : cellules du tissu conjonctif qui produisent le collagène.



Figure 39 : Effet des ondes de choc sur le tissu adipeux

\*\* Transformation de certains tissus à cause d'une augmentation du tissu conjonctif

\*\*\* Tissu qui protège les organes

Ce schéma représente la peau d'un patient avant et après l'application des ondes de chocs. A gauche, nous pouvons observer des amas de graisse conséquents et très compacts. Après plusieurs séances, nous voyons une modification de l'aspect de la peau : plus lisse. Surtout, les ondes de choc ont un effet mécanique : la graisse s'est dispersée : diminution et espacement « boules » graisseuses.

Une séance pour une réduction de graisse localisée dure 10 à 15 minutes. Il est tout d'abord indispensable de mettre un gel de contact entre les applicateurs et la peau. Puis la séance se déroule en deux temps. Le premier consiste à insérer un sérum physiologique au niveau de la zone à traitée et un anesthésique local. Le second temps est l'application des ondes de choc. L'énergie envoyée par ces ondes est adaptée à chaque patient. Voici un aperçu de la machine utilisée :



Applicateur		Zone	Pression en bars	Fréquence en hz	Nb d'impulsions	Fréquence de traitement	Nb de séances
<b>D-Actor Titane D20-T</b>		Faces internes Faces externes cuisses	1,8 à 3	14 à 16	4 000 à 4500 par face	1 à 2 fois / semaine	6 à 10
<b>V-Actor V40 (en option)</b>		Faces internes Faces externes cuisses	2 à 3	25 à 35	lissage pendant 60 à 90 sec par côté	1 à 2 fois / semaine	6 à 10
<b>Deep Impact DI15</b>		vergetures	1,4 à 2	12 à 16	1 000 à 1 200 coups / cm de vergeture	1 fois par semaine	6 à 10

Figure 40: Guide pour appliquer les ondes de choc

Tableau d'indications : tête à utiliser, pression, fréquence et nombre d'impulsions à appliquer en fonction de la zone visée.

Attention il est cependant interdit d'appliquer les ondes de choc au niveau de la tête, des poumons, sur les vaisseaux ou encore sur la colonne vertébrale.

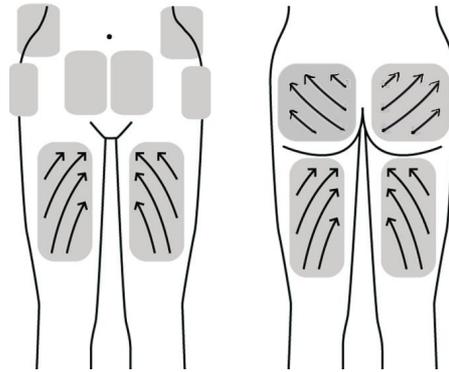


Figure 41 : Sens d'application des ondes de choc pour les cuisses et les fessiers

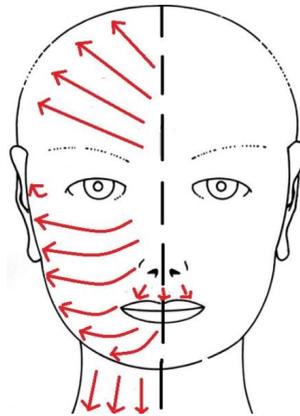


Figure 42: Sens d'application des ondes de choc pour le visage

Afin de mieux comprendre l'utilisation des ondes de choc à des fins esthétiques, voici quelques résultats :



Figure 43 : Traitement sur le visage (à gauche: avant ; à droite: après l'application des ondes)



*Figure 44: Traitement sur le visage après une séance (nette différence entre l'oeil droit: traité, et l'oeil gauche: non traité)*

Dans les traitements sur le visage que l'on peut observer ci-dessus, dès la première séance on observe une différence entre l'oeil droit et gauche du patient.

### **3.4.5. La thérapie des ondes de choc et le sport de haut niveau :**

La thérapie extracorporelle par onde de choc est utilisée depuis de nombreuses années pour les sportifs de haut niveau. Cependant, ces débuts ont été assez difficiles. En effet, le professeur Heinz Lohrer, directeur médical de l'Institut de médecine du sport de Francfort (SMI) admet dans un entretien livré à la revue « ondes de choc aujourd'hui » que : « À l'époque, un certain scepticisme régnait à l'égard de cette nouvelle méthode thérapeutique chez toutes les personnes concernées, moi y compris. La première réaction des athlètes a toutefois été très positive » L'Institut de médecine de Francfort suit chaque année plus de 7000 sportifs. Selon Heinz Lohrer, le traumatisme le plus couramment soigné grâce aux ondes de choc est la tendinopathie, c'est-à-dire l'inflammation d'un tendon et plus particulièrement le tendon d'Achille ou ceux situés dans la région de l'épaule.

Nous avons pu entrer en contact avec Simon Beaufiles, masseur et kinésithérapeute au sein de l'équipe de France de cyclisme. À la question : « utilisez-vous les ondes de chocs et si oui, quels en sont les avantages ? » Il a répondu qu'il utilisait effectivement les ondes de choc pour traiter essentiellement des tendinopathies ou les contractures chez les coureurs cyclistes. Il nous a avoué que cette thérapie était très efficace et qu'elle apportait un réel plus. Par ailleurs, à la question : « Les utilisez-vous afin d'améliorer la récupération ? » Il nous a répondu que non et qu'il ne connaissait à l'heure d'aujourd'hui aucune étude concernant ce sujet. C'est ainsi que la thérapie par onde de choc s'est imposée dans le monde du sport. Le kinésithérapeute Denis Briand nous a révélé pour sa part que les sportifs ne constituaient pas l'essentiel de sa clientèle : environ 1/4 sont sportifs. Cette thérapie est notamment utilisée dans les sports « à risque » tel que le tennis ou bien au sein du football professionnelle mais s'est également imposée dans toutes les sports. Permettant de diminuer la prise de médicaments, cette thérapie ne risque pas de perturber les contrôles antidopage.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, nous pouvons dire que ce projet physique a été très instructif. En effet, il nous a permis d'enrichir nos connaissances et d'en acquérir de nouvelles, que ce soit dans le domaine scientifique ou sur l'aspect humain de ce travail.

Tout d'abord, même si nous avons déjà tous entendu parler d'ondes de choc avant le début de ce projet, nous étions loin de comprendre le phénomène précisément. Nous nous sommes rendu compte que nous rencontrons les ondes de choc dans de multiples situations. Au terme de l'étude de trois domaines en particulier (biomédical, industriel et univers), nous pouvons maintenant nous exprimer sur les ondes de choc en général, mais aussi sur leurs conditions d'apparition, leur utilisation et leurs contraintes.

De plus, nous sommes tous d'accord pour dire que ce projet a été instructif concernant l'organisation du travail en équipe. Effectivement, travailler à 10 sur un seul et même projet a été compliqué certaines fois. Pour maintenir un bon fil conducteur et assurer une cohérence entre nos travaux respectifs, il était nécessaire que tout le monde soit au courant de ce que chacun faisait précisément. C'est un véritable plus pour notre avenir car, en tant que futurs étudiants en département et futurs ingénieurs, nous serons évidemment amenés à travailler dans des conditions similaires à celles que nous avons vécu depuis le mois février.

Néanmoins, nous avons rencontrées quelques difficultés sur l'ensemble du projet. Parfois, nous avons été confrontés à un manque de connaissances en mathématiques et en physique. Par exemple, les relations de Rankine-Hugoniot (présentées en Partie 1) font appel à des outils que nous ne maîtrisons pas, c'est d'ailleurs pour cette raison que la démonstration n'apparaît pas dans ce rapport. Aussi, il s'est avéré que les informations sur notre sujet n'étaient pas si nombreuses, que ce soit sur Internet ou dans les livres. La principale raison de ce manque d'informations est qu'il reste encore des zones d'ombre sur les ondes de choc, puisqu'il s'agit de phénomènes relativement difficiles à étudier.

Pour finir, nous nous sommes demandé quelles seraient les perspectives d'évolution futures de ce sujet. Comme expliqué précédemment, les ondes de choc peuvent être subites (dans la propulsion par exemple, où l'on cherche, dans ce cas, à les atténuer) ou utilisées de façon positive par des soins sur les humains. Que ce soit hier ou aujourd'hui, plusieurs projets de recherche sur les ondes de choc ont été menés pour essayer de transformer ce qui apparaît comme contraignant en des avantages et applications concrètes. Il serait donc intéressant de renseigner sur ces projets : on pourrait expliquer les raisons (très certainement physiques et mathématiques) qui les ont empêché d'aboutir, ou étudier les pistes de recherches actuelles et à venir.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

### [1] Généralités

- Réflexions sur la physique : [http://www.lerepairedesciences.fr/reflexions/questions\\_cours\\_fichiers/onde\\_choc.htm](http://www.lerepairedesciences.fr/reflexions/questions_cours_fichiers/onde_choc.htm)
- Définition des ondes de choc : <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=8171> (valide à la date du 25/02/2016)

### Illustrations :

Figure 1 : [http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO\\_HTML/node48.html](http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO_HTML/node48.html)

Figure 2 : [http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO\\_HTML/node51.html](http://ufrmeca.univ-lyon1.fr/~buffat/COURS/AERO_HTML/node51.html)

Figure 3 : <http://perso.ensta-paristech.fr/~ortiz/DFR/Voies/chapIVmf201.pdf>

Figure 4 : <http://perso.ensta-paristech.fr/~ortiz/DFR/Voies/chapIVmf201.pdf>

### [2] Ondes de choc dans le domaine industriel :

- Les origines des ondes de choc : <http://bigbenber.over-blog.com/article-quelques-explications-sur-la-formation-d-une-onde-de-choc-51574752.html> (valide à la date du 02/06/2016).
- Combustion : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/combustion/3-la-detonation/> (valide à la date du 16/03/2016 ).
- Le mur du son, explication du phénomène : <http://tpe-m-d-s.jimdo.com/i-le-mur-du-son-un-phénomène-physique-aérodynamique/2-explication-du-phénomène/> (valide à la date du 21/04/2016 )
- Mur du son : <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/murduson.htm> (valide à la date du 21/04/2016).
- Le fait de franchir le mur du son provoque-t-il une explosion ? : <http://www.larecherche.fr/savoirs/autre/fait-franchir-mur-du-son-provoque-t-il-explosion-jean-tour-01-12-2002-81439> (valide à la date du 21/04/2016).
- Théorie des chocs et simulations : <http://hmf.enseiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/962> (valide à la date du 17/03/2016)
- Pierre-Emmanuel SAUVAN, «Etude des phénomènes physiques associés à la propagation d'ondes consécutives à une explosion et leur interaction avec des structures, dans un environnement complexe. » Thèse Université d'Orleans, 2012
- Un peu d'aéronautique : <http://accrodavion.be/Accrodavions/astronautique1.html> (valide à la date du 28/04/2016)
- Le moteur vulcain : [http://www.capcomespace.net/dossiers/espace\\_europeen/ariane/ariane5/moteur\\_vulcain.htm](http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/ariane5/moteur_vulcain.htm) (valide à la date du 28/04/2016)
- Ergol : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ergol> (valide à la date du 04/05/2016)

Risques industriels (origine du risque industriel) :

- [http://www.hauts-de-seine.gouv.fr/content/download/920/5547/file/DDRM92\\_5\\_techno\[1\].pdf](http://www.hauts-de-seine.gouv.fr/content/download/920/5547/file/DDRM92_5_techno[1].pdf)
- [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ecologie/pdf/MaqlD\\_RisqIndus\\_v2007\\_tbd.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/ecologie/pdf/MaqlD_RisqIndus_v2007_tbd.pdf)
- <http://www.finistere.gouv.fr/content/download/3772/24532/file/DDRM%202012%20-%20Partie%203%20-%20Les%20Risques%20Technologiques.pdf>

#### Exemple Feyzin :

- <http://www.risquesmajeurs.fr/feyzin-ville-pilote-en-mati%C3%A8re-de-gestion-des-risques-majeurs>

#### Risques pour le personnel :

- <http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-industriel>
- <http://www.risques.gouv.fr/risques-technologiques/accident-industriel>

#### Prévention contre les effets des ondes de choc :

Emilie Del Prete. Choc et onde de souffle dans les mousses aqueuses. Etude expérimentale et modélisation numérique. Milieux fluides et réactifs. Université de Rouen, 2012.

- <http://www.agence-nationale-recherche.fr/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse\\_\(physique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse_(physique))
- [www.risquesmajeurs.fr/le-risque-industriel](http://www.risquesmajeurs.fr/le-risque-industriel)
- <http://www.ineris.fr/centredoc/4.pdf>

#### Illustrations

Figure 5: <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/murduson.htm>

Figure 6: <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/murduson.htm>

Figure 7: <http://philippe.boeuf.pagesperso-orange.fr/robert/physique/murduson.htm>

Figure 8: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuy%C3%A8re>

Figure 9: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tuy%C3%A8re>

Figure 10 : Emilie Del Prete. Choc et onde de souffle dans les mousses aqueuses. Etude expérimentale et modélisation numérique. Milieux fluides et réactifs. Université de Rouen, 2012.

#### [3] Domaine de l'Univers

##### Les ondes de choc sur Terre

- <http://sweetrandomscience.blogspot.fr/2012/05/les-ondes-de-choc-du-volcan.html> (valide à la date du 25 mai 2016)
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/qr/d/meteorologie-origine-tonnerre-5948/> (valide à la date du 25 mai 2016)
- [http://www.deule-climat.net/cours\\_orages.htm](http://www.deule-climat.net/cours_orages.htm) (valide à la date du 25 mai 2016)
- <https://egouvernaire.wordpress.com/2013/04/15/raijin-le-dieu-du-tonnerre-et-des-eclaires/> (valide à la date du 25 mai 2016)

##### Les ondes de choc dans l'Univers

- <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/actu/d/astronomie-telescope-wise-capture-onde-choc-infrarouge-26594/> (valide à la date du 19 mars 2016)
- <http://www.astronoo.com/fr/articles/onde-de-choc.html> (valide à la date du 19 mars 2016)
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/dico/d/univers-etoile-3730/> (valide à la date du 25 avril 2016)
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/sante/infos/dico/d/medecine-plasma-2871/> (valide à la date du 25 avril 2016)
- [http://lewebpedagogique.com/astronomie/files/Les-Etoiles\\_-\\_naissance-vie-et-mort.pdf](http://lewebpedagogique.com/astronomie/files/Les-Etoiles_-_naissance-vie-et-mort.pdf) (valide à la date du 25 avril 2016)
- <http://www.actuhightech.com/high-tech/asassn-16lh-supernova-plus-impressionnante-jamais-identifiee-6217.html> (valide à la date du 11 mai 2016)
- <http://rpgkool.free.fr/proto-etoile.html> (valide à la date du 21 mai 2016)

#### Les rencontres d'une onde de choc avec un obstacle

- [http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr\\_gateway/home\\_energy/introduction\\_to\\_wavesrev6.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr_gateway/home_energy/introduction_to_wavesrev6.shtml) (valide à la date du 31 mai 2016)
- [http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/Optique/microscopie\\_fichiers/interdi3.gif](http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/Optique/microscopie_fichiers/interdi3.gif) (valide à la date du 31 mai 2016)

#### Les ondes de souffle et leurs applications

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Blast\\_wave](https://en.wikipedia.org/wiki/Blast_wave) (valide à la date du 26 mai 2016)
- [http://www.grahamwindows.com/?page\\_id=4537](http://www.grahamwindows.com/?page_id=4537) (valide à la date du 26 mai 2016)
- <http://fas.org/nuke/guide/usa/doctrine/dod/fm8-9/1ch3.htm> (valide à la date du 26 mai 2016)

#### L'énergie libérée lors d'une onde de choc

- <https://sciencetonnante.wordpress.com/2014/01/27/comment-estimer-la-puissance-dune-bombe-atomique-a-partir-dune-photo/> (valide à la date du 11 mai 2016)
- <http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-l-echelle-vei--une-mesure-d-intensite-des-eruptions-volcaniques-6279.htm> (valide à la date du 11 mai 2016)
- <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/risques-naturels/html/2/21/211/2112.html> (valide à la date du 11 mai 2016)

#### Illustrations

Figure 11 : <https://egouvernaire.wordpress.com/2013/04/15/raijin-le-dieu-du-tonnerre-et-des-eclaires/>

Figure 12 ; <http://sweetrandomscience.blogspot.fr/2012/05/les-ondes-de-choc-du-volcan.html>

Figure 13 : [http://www.huffingtonpost.fr/2015/04/23/photos-volcan-calbuco-chili\\_n\\_7125448.html](http://www.huffingtonpost.fr/2015/04/23/photos-volcan-calbuco-chili_n_7125448.html)

Figure 14 : [http://www.deule-climat.net/cours\\_orages.htm](http://www.deule-climat.net/cours_orages.htm)

Figure 15 : <http://rpgkool.free.fr/proto-etoile.html>

Figure 16 : <http://www.actuhightech.com/high-tech/asassn-16lh-supernova-plus-impressionnante-jamais-identifiee-6217.html>

Figure 17 : Illustration tirée d'une thèse présentée par **Duy-Hung DUONG** de l'Université d'Orléans sur *L'Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*

Figure 18 : Illustration tirée d'une thèse présentée par **Duy-Hung DUONG** de l'Université d'Orléans sur *L'Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*

Figure 19 : Illustration tirée d'une thèse présentée par **Duy-Hung DUONG** de l'Université d'Orléans sur *L'Etude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*

Figure 20 :  
[http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr\\_gateway/home\\_energy/introduction\\_to\\_wavesrev6.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/ocr_gateway/home_energy/introduction_to_wavesrev6.shtml)

Figure 21 :  
[http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/Optique/microscopie\\_fichiers/interdi3.gif](http://www.lerepairedessciences.fr/sciences/Optique/microscopie_fichiers/interdi3.gif)

Figure 22 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9fraction>

Figure 23 : <http://www.z-beamlet.sandia.gov/research/blast.html> et  
[https://simple.wikipedia.org/wiki/Blast\\_injury](https://simple.wikipedia.org/wiki/Blast_injury)

Figure 24 : [http://www.grahamwindows.com/?page\\_id=4537](http://www.grahamwindows.com/?page_id=4537)

Figure 25 : <http://fas.org/nuke/guide/usa/doctrine/dod/fm8-9/1ch3.htm>

Figure 26 : <http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/space/superluminous-supernova-is-570-billion-times-brighter-than-the-sun-pushes-limits-of-known-physics/>

Figure 27 : <https://sciencetonnante.wordpress.com/2014/01/27/comment-estimer-la-puissance-dune-bombe-atomique-a-partir-dune-photo/>

[3] Domaine du Biomédical

L'Histoire:

- <http://www.passeportsante.net/fr/Maux/Problemes/Fiche.aspx?doc=lithiase-urinaire-pm-traitements-medicaux-des-calculs-renaux-pierres-aux-reins> valide à la date du 25 février 2016

#### Le principe d'action de la thérapie

- <http://www.chirurgie-orthopedique-paris.com/vous-allez-beneficier-dun-traitement-par-ondes-de-choc/> (Valide à la date du 8 mars 2016)
- <http://www.shockwave-france.com/onde-de-choc-tendinite-r20122.html> (Valide à la date du 14 avril 2016)
- <http://www.shockwave-france.com/public/1092/telechargement/6-les-ondes-de-choc-aujourd-039-hui-4-2015.pdf> (Valide à la date du 14 avril 2016)
- [http://www.elitemedicale.fr/media/documentations/EMS/Dolorclast\\_EMS\\_doc\\_general\\_e\\_ondes\\_de\\_choc\\_radial.pdf](http://www.elitemedicale.fr/media/documentations/EMS/Dolorclast_EMS_doc_general_e_ondes_de_choc_radial.pdf) (Valide à la date du 14 avril 2016)
- <http://www.ondesdechoc.eu/download.php?FNAME=1262768399.upl&ANAME=Biological%20mechanisms%20of%20ESWT%20-%20Wang.pdf> (Valide à la date du 17 mai 2016)

#### Machine à ondes de choc :

- <http://www.shockwave-belux.com/applicateurs-th.html>
- <http://www.shockwave-france.com/>
- <http://www.btlmed.fr/produits-therapie-ondes-de-choc-btl-6000-swt-topline>

#### Application des ondes de choc à l'esthétisme :

- Shockwave France, <http://www.shockwave-france.com/public/1092/telechargement/protocoles-esthetiques.pdf>, valide à la date du 5 mai 2016.
- Vidéo Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=qjupus-fZ5c>, valide à la date du 25 février 2016.
- Shockwave France, <http://www.shockwave-france.com/public/1092/telechargement/protocoles-esthetiques.pdf>, valide à la date du 5 mai 2016
- Association Française de Médecine morpho-Esthétique et anti-âge, (AFME). <http://www.afme.org/actes-me/cellulite-actes-me/liporeduction-par-ondes-de-choc/>, valide à la date du 5 mai 2016.

#### Illustrations :

Figure 28 : <http://www.shockwave-belux.com/applicateurs-th.html>

Figure 29 : <http://www.shockwave-france.com/>

Figure 30 : <http://www.btlmed.fr/produits-therapie-ondes-de-choc-btl-6000-swt-topline>

Figure 31 : <http://www.shockwave-belux.com/applicateurs-th.html>

Figure 32 : <http://www.shockwave-france.com/>

Figure 33 : <http://www.btlmed.fr/produits-therapie-ondes-de-choc-btl-6000-swt-topline>

Figure 34 : <http://www.shockwave-belux.com/applicateurs-th.html>

Figure 35 : <http://www.btlmed.fr/produits-therapie-ondes-de-choc-btl-6000-swt-topline>

Figure 36 : [http://files.btlnet.com/product-document/adf6937c-6f5d-4b0b-a24f-acab75e96259/BTL-shockwave\\_CAT\\_FR206\\_adf6937c-6f5d-4b0b-a24f-acab75e96259\\_original.pdf](http://files.btlnet.com/product-document/adf6937c-6f5d-4b0b-a24f-acab75e96259/BTL-shockwave_CAT_FR206_adf6937c-6f5d-4b0b-a24f-acab75e96259_original.pdf) (page 4)

Figure 37 : <http://www.ondesdechoc.eu/download.php?FNAME=1262768399.upl&ANAME=Biological%20mechanisms%20of%20ESWT%20-%20Wang.pdf> (page 6)

Figure 38 : <http://www.ondesdechoc.eu/download.php?FNAME=1262768399.upl&ANAME=Biological%20mechanisms%20of%20ESWT%20-%20Wang.pdf> (page 10)

Figure 39 : <http://www.afme.org/actes-me/cellulite-actes-me/liporeduction-par-ondes-de-choc/>

Figure 40 : <http://www.afme.org/actes-me/cellulite-actes-me/liporeduction-par-ondes-de-choc/>

Figure 41 : <http://www.afme.org/actes-me/cellulite-actes-me/liporeduction-par-ondes-de-choc/>

Figure 42 : <http://www.afme.org/actes-me/cellulite-actes-me/liporeduction-par-ondes-de-choc/>

Figure 43 : <http://www.tepoc.fr/traitements-du-visage.html>

Figure 44 : <http://www.tepoc.fr/traitements-du-visage.html>