

ONDES DE CHOC EN SCIENCES DE L'UNIVERS



Etudiants :

Inès ADAMS **Barbara MARIE**

Djoumo AMADOU **Julien OSTOR**

Mickael FRAISSE **Rémi PATIN**

Enseignant-responsable du projet :

Abdellah HADJADJ

Date de remise du rapport : 15/06/2011

Référence du projet : STPI/P6-3/2011 N°4.

Intitulé du projet : **Ondes de choc en sciences de l'univers.**

Type de projet : Recherche bibliographique.

Objectifs du projet: Connaitre les phénomènes d'onde de chocs dans leurs diversités

-Etude historique.

-Détermination des lois théoriques.

-Programmation d'une reproduction du simulateur de la NASA.

-Connaitre l'utilisation humaine des ondes de choc.

Mots-clefs du projet :

Thérapie par onde de choc, choc oblique, explosion d'étoile.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	5
2. Méthodologie/Organisation du travail.....	6
3. Travail réalisé et résultats.....	7
3.1 Ondes de choc et explosions.....	7
3.2 Ondes de choc en sciences de l'univers.....	14
3.3 Ondes de choc dans le domaine biomédical et nutritionnel.....	29
4. Conclusions et perspectives.....	39
5. Bibliographie.....	40
6. Annexe : Programme de la reproduction du simulateur de la NASA.....	43

1. INTRODUCTION

Une onde de choc est une onde, donc une perturbation du milieu qui se déplace dans l'espace et varie au cours du temps, elle peut donc être décrite mathématiquement par un champ, c'est à dire une fonction de l'espace et du temps. Sa particularité réside dans le fait que cette perturbation est une transition discontinue entre deux milieux, alors que les autres ondes opèrent cette transition progressivement.

Historiquement, les ondes de chocs ont tout d'abord été observées par l'homme lors d'explosions.

Dans un premier temps, Leibniz a énoncé le principe selon lequel la nature ne peut pas faire de sauts, c'est-à-dire qu'il pensait que les transitions ne pouvaient subir de discontinuité comme dans le cas des ondes de chocs, qui étaient alors inconnues.

En 1808, Poisson trouva une solution discontinue aux équations d'Euler qui traduisent la conservation de la masse et de l'énergie.

En 1876, Ernst Mach découvrit que un mobile se déplaçant créait une onde de choc lorsque sa vitesse dépassait la célérité du son, il nomma ainsi « nombre de Mach » le rapport v/c (vitesse du mobile sur célérité du son, c'est pour cela qu'on dit qu'un avion volant à la vitesse du son se déplace à Mach 1).



Un avion dépassant le mur du son : il engendre un cône de Mach

Il découvrit aussi qu'une particule ponctuelle se déplaçant à une vitesse supérieure à la célérité du son produisait une onde de choc dont la surface était un cône ayant pour sommet la particule et dont l'angle diminuait à mesure que la vitesse augmentait.

Rankine et Hugoniot découvrirent chacun, respectivement en 1870 et 1887 les premières équations d'une onde de choc (l'onde de choc droite).

Enfin, Ludwig Prandtl découvrit en 1908 que l'apparition d'une onde de choc est liée à une augmentation de l'entropie lors de la compression qui fait passer du subsonique ($v < c$) au supersonique ($v > c$).

Toutes ces découvertes et celles plus récentes permettent, entre autres, de comprendre les phénomènes d'explosions sur terre et la formation des étoiles. Aujourd'hui l'Homme tente de maîtriser ces ondes énergétiques pour les utiliser à des fins biomédicales.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Afin d'obtenir un travail régulier de chacun, nous avons constitué des groupes de travail.

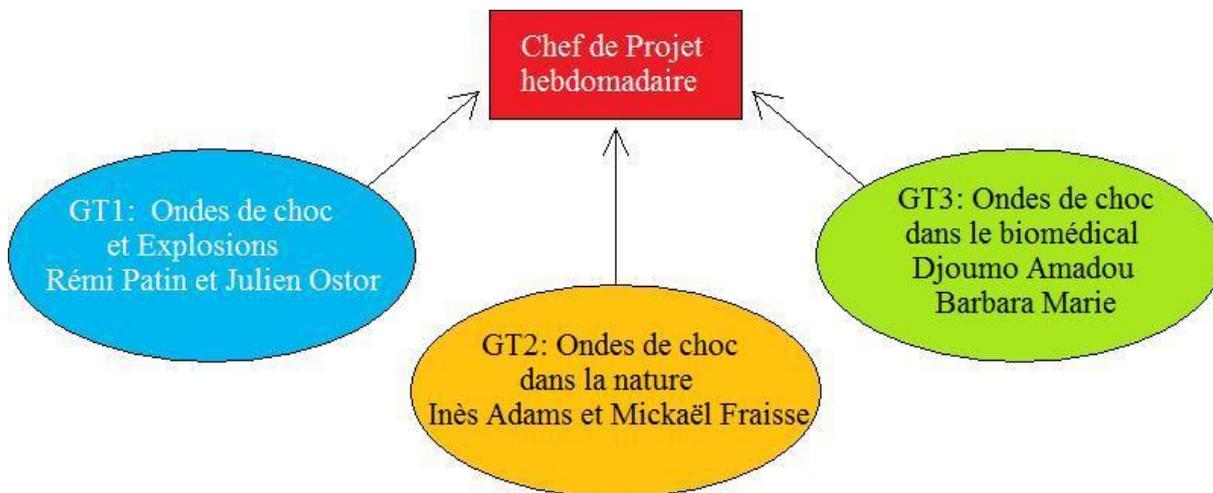
Ainsi, nous avons travaillé en binôme durant ce projet de physique :

-GT1(Groupe de Travail): Julien OSTOR et Rémi PATIN ont traité le thème : Ondes de choc et explosions.

-GT2 : Inès ADAMS et Mickael FRAISSE ont traité le thème : Ondes de choc dans la nature.

-GT3 : Djoumo AMADOU et Barbara MARIE ont traité le thème : Ondes de choc dans le biomédical et le nutritionnel.

Chaque semaine un chef de projet était désigné et nous devons lui indiquer l'avancement de nos recherches. Par ailleurs, en début de séance, nous présentions devant l'enseignant responsable nos résultats afin qu'il puisse rectifier nos erreurs. En fin de séance nous faisons un bilan pour savoir le travail à produire pour le cours suivant.



Organigramme de travail durant le projet

3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Ondes de Choc et Explosions

3.1.1 Premiers exemples d'une onde de choc et définition d'une explosion

a) Onde de choc hypothétique se propageant à la surface de l'eau

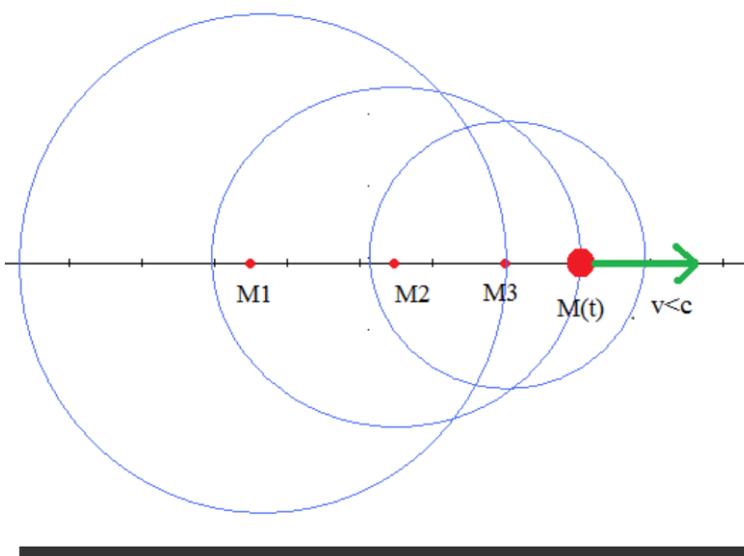
Si on se plaçait à un point fixe et que l'on observait le passage d'une vague, qui est une onde qui modifie la hauteur de la surface de l'eau, on pourrait décrire cette hauteur par une fonction $h(x,y,t)$.

Au point d'observation, on pourrait voir la hauteur de l'eau qui augmente, puis qui diminuerait progressivement. Si cette onde avait été une onde de choc, on aurait relevé une discontinuité de la fonction h , c'est-à-dire que h serait passée subitement de la hauteur initiale à la hauteur maximale sans intermédiaire.

b) Avion supersonique créant un cône de Mach – Rapport entre explosion et onde de choc

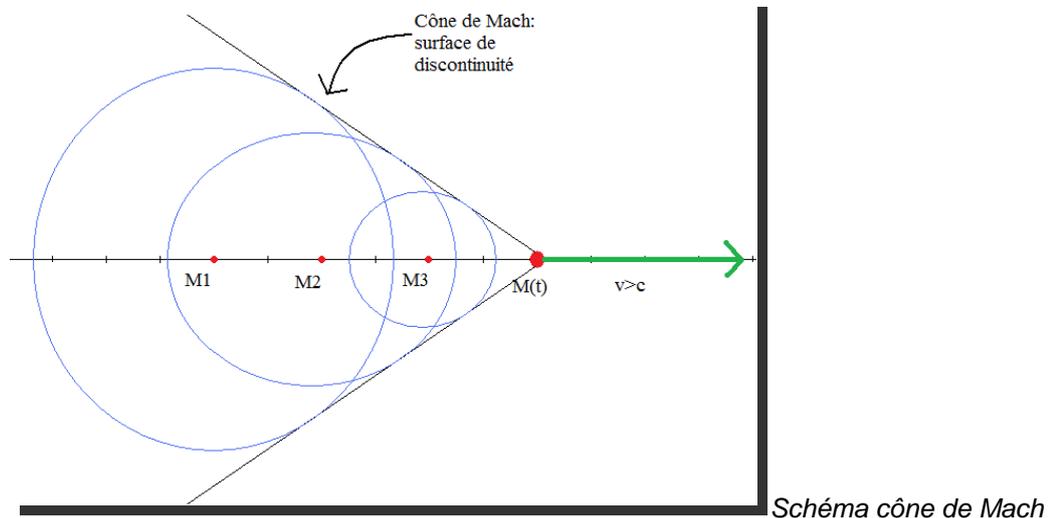
Une explosion est une transformation rapide d'une matière en une autre matière ayant un volume plus grand. Généralement, il s'agit d'une réaction chimique dont les réactifs sont des solides ou des liquides et dont certains produits sont des gaz.

Reprenons l'exemple de l'avion. Dans un premier temps, celui-ci se déplace à une vitesse inférieure à celle du son. L'avion émet lui-même un son sur son passage à chaque instant, donc des ondes de pression, dont il est la source. Les points M représentent certains points de passage de l'avion et sont chacun le centre d'un cercle, qui représente l'onde émise par l'avion lors de son passage en ce point. $M(t)$ est la position de l'avion à l'instant observé.



Trajectoire d'un avion et ondes émises

Ici, le champ de pression $P(x,y,z,t)$ est continu en tout point de l'espace car les ondes de pressions successives émises par l'avion qui se déplace sont émises dans toutes les directions. Voyons maintenant la même figure lorsque l'avion se déplace plus vite que le son :



L'avion se déplace plus vite que l'onde de pression qu'il émet, donc il dépasse le front de sa propre onde aussitôt qu'il l'a émise. Ainsi, l'ensemble des ondes de pression produite par l'avion en chaque point de son déplacement est exactement contenue dans le cône de Mach, et à l'extérieur de ce cône, aucune perturbation n'est ressentie, c'est pourquoi ce cône est une surface de discontinuité du champ de pression $P(x,y,z,t)$. Ce cône représente le front de l'onde de choc.

Dans le cas d'une explosion à détonation, c'est à dire une explosion où les particules de gaz sont éjectées à une vitesse supérieure à celle du son, chaque particule se comporte comme l'avion supersonique précédent : elle émet une onde de pression en se déplaçant dans l'air et crée son propre cône de Mach. La superposition de tous les cônes de Mach dus à chaque particule forme le front d'onde de choc de l'explosion.

3.1.2 Équations de saut lors d'un choc droit

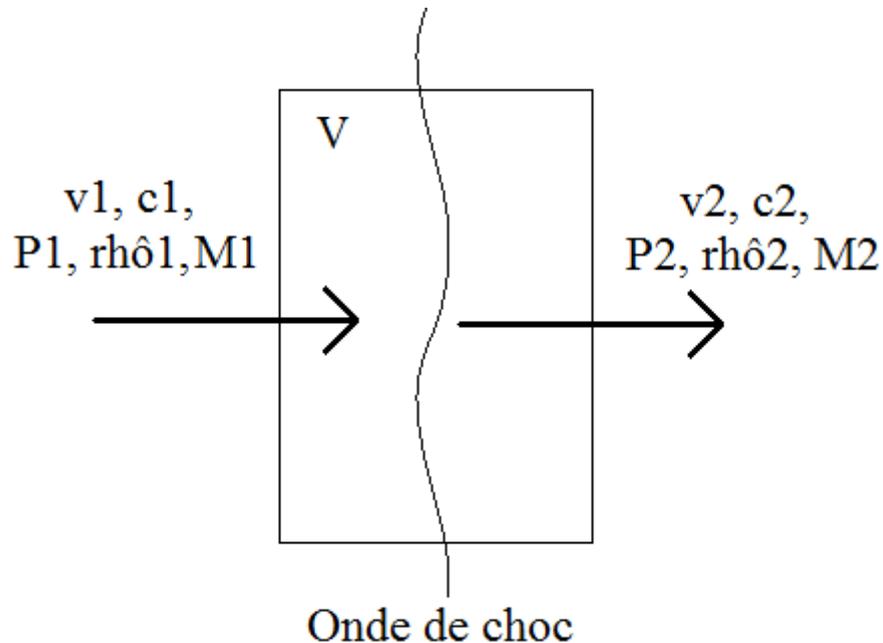
Le choc droit est un choc considéré unidimensionnel (se propageant selon un axe), donc dans un repère lié au déplacement du choc, on peut étudier simplement les variables qui décrivent le système. Le front de l'onde de choc est orthogonal à l'axe de propagation. Dans un élément de volume V où il se produit un tel choc, le fluide subissant ce choc est décrit par sa vitesse d'écoulement v , sa pression p , sa masse volumique ρ , et la célérité c du son dans ce fluide.

La célérité du son varie en fonction du fluide dans lequel il se propage car, $c = \sqrt{\rho r T}$ où T est la température, et celle-ci augmente lors d'un choc car il y a compression du fluide, donc c est

une grandeur modifiée par le choc. $r = \frac{R}{n}$ Où R est la constante des gaz parfaits et n la quantité de matière du gaz.

On peut exprimer les variations subies lors du choc par toutes les grandeurs caractéristiques

du fluide en fonction du nombre de Mach: $M = \frac{v}{c}$



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 part des équations d'Euler:

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

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

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

Or $h = C_p T$ et $c = \sqrt{\gamma r T}$ donc $h = \frac{C_p}{\gamma r} c^2 = \frac{c^2}{\gamma - 1}$.

Ainsi, les équations sont exprimées avec les variables décrivant le fluide, et on montre que:

$$- \frac{v_2}{v_1} = \frac{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}{(\gamma + 1)M_1^2} \quad (\text{saut de vitesses});$$

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

$$- \frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1) \quad (\text{saut de pression});$$

$$- h_2 - h_1 = \ln\left(1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1}(M_1^2 - 1)\right) - \gamma \ln\left(\frac{(\gamma + 1)M_1^2}{(\gamma - 1)M_1^2 + 2}\right) \quad (\text{saut d'enthalpie});$$

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

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

Lorsque $M_1 \rightarrow +\infty$ on a $\frac{v_2}{v_1} \rightarrow \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} = \frac{1}{6}$ $\frac{\rho_2}{\rho_1} \rightarrow \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} = 6$ $M_2 \rightarrow \sqrt{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}} \approx 0,34$

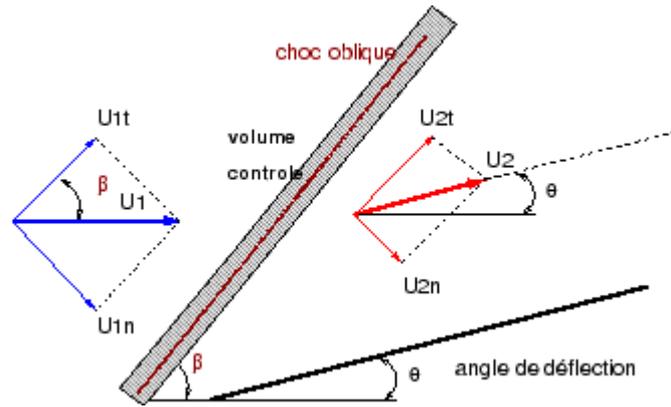
mais le rapport des pressions et des températures tendent vers l'infini.

-

3.1.3 Équations de saut lors d'un choc oblique.

Ici encore, on va montrer qu'on peut exprimer les variations subies lors du choc par toutes les grandeurs caractéristiques du fluide en fonction du nombre de Mach: $M = \frac{u}{c}$ (u représente la vitesse de la particule étudiée).

On note $\vec{u}_1, c_1, \rho_1, p_1, M_1$ grandeurs avant le choc et $\vec{u}_2, c_2, \rho_2, p_2, M_2$ des grandeurs après le choc.



Étude analytique d'un choc oblique

On décompose les vecteurs vitesses selon un vecteur normal \vec{n} et un vecteur \vec{t} tangentiel au front de l'onde de choc. Ces vecteurs forment donc une base orthonormée du plan et on a:

$$\vec{u}_1 = u_{n1}\vec{n} + u_{t1}\vec{t} \text{ et } \vec{u}_2 = u_{n2}\vec{n} + u_{t2}\vec{t}$$

On part des équations d'Euler:

- Bilan de masse: $\rho_1 u_{n1} = \rho_2 u_{n2}$ (1)

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

- Bilan de quantité de mouvement selon la tangente: $\rho_1 u_{n1} u_{t1} = \rho_2 u_{n2} u_{t2}$ (3)

- Conservation de l'enthalpie totale: $h_t = \frac{u_{n1}^2 + u_{t1}^2}{2} + h_1 = \frac{u_{n2}^2 + u_{t2}^2}{2} + h_2$ (4)

En divisant (3) par (1), on obtient $u_{t1} = u_{t2}$, donc la composante tangentielle de la vitesse ne change pas lors d'un choc oblique.

En simplifiant (4) par $\frac{u_{t1}^2}{2}$ on voit que $u_{n1} = u_1 \sin \beta$ et $u_{n2} = u_2 \sin(\beta - \theta)$ vérifient les équations du choc droit.

Pour obtenir les équations de saut du choc oblique, il suffit donc de remplacer \vec{u}_1 par u_{n1} , \vec{u}_2 par u_{n2} , et M_1 par $M_{n1} = M_1 \sin(\beta)$ et M_2 par $M_{n2} = M_2 \sin(\beta - \theta)$ dans les équations du choc droit, ce qui donne (après un peu de calculs):

- $\frac{u_{n2}}{u_{n1}} = \frac{(\gamma - 1)M_1^2 \sin^2 \beta + 2}{(\gamma + 1)M_1^2 \sin^2 \beta}$ (saut de vitesses normales);

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

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

- $\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_1^2 \sin^2 \beta - 1)$ (saut de pression);
- $\frac{S_2 - S_1}{C_v} = \ln \left(1 + \frac{2\gamma}{\gamma+1} (M_1^2 \sin^2 \beta - 1) \right) - \gamma \ln \left(\frac{(\gamma+1)M_1^2 \sin^2 \beta}{(\gamma-1)M_1^2 \sin^2 \beta + 2} \right)$ (saut d'enthalpie);
- $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 = \frac{(2 + (\gamma-1)M_1^2 \sin^2 \beta)(2\gamma M_1^2 \sin^2 \beta + 1 - \gamma)}{(\gamma+1)^2 M_1^2 \sin^2 \beta}$ (rapport des températures et célérités 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).
- $\theta = \beta - \arccos \left(\frac{u_1}{u_2} \cos \beta \right)$ (angle de déflexion).

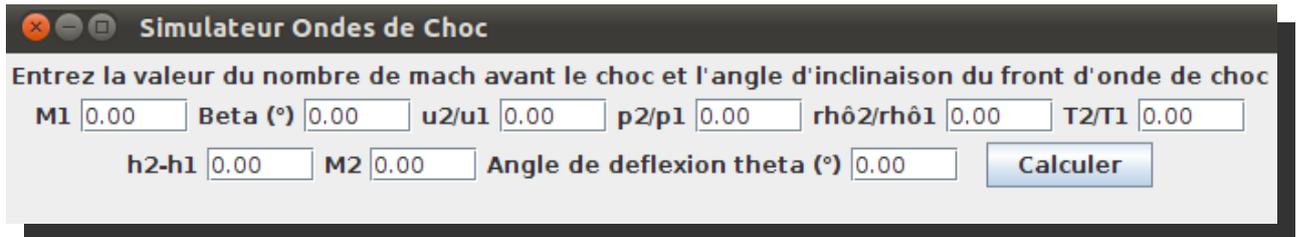
3.1.4 Développement d'un simulateur de chocs oblique

Afin de mettre en application les résultats théoriques que nous avons établis précédemment, nous avons décidé de développer un programme informatique codé en langage Java qui nous permettrait, en entrant les données relatives à un choc droit ou oblique, de calculer les valeurs des sauts de toutes les grandeurs cinétiques et thermodynamique du fluide choqué.

Concrètement, ce programme consiste en une fenêtre dans laquelle l'utilisateur entre le nombre de Mach en amont du choc M_1 , ainsi que l'angle d'inclinaison du front d'onde de choc avec la trajectoire de la particule β choquant le fluide.

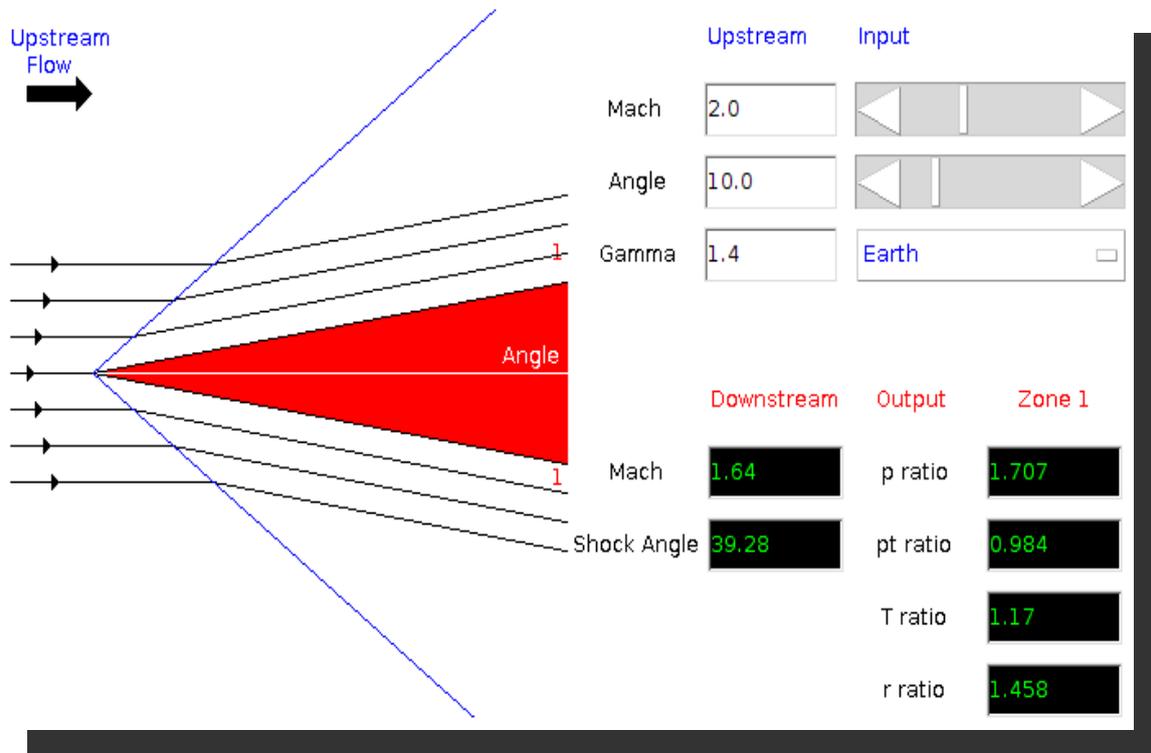
Le programme affiche alors les valeurs des sauts de vitesse, de pression, de température, masse volumique ainsi que la variation d'enthalpie du fluide ayant subi l'onde de choc créée par la particule, et également le nombre de Mach de la particule en aval du choc ainsi que l'angle de déflexion θ subie par la trajectoire de cette même particule.

Si les données entrées par l'utilisateur sont fausses (par exemple un nombre de Mach amont négatif ou bien un angle β nul ou strictement supérieur à 90°), le programme affiche un message d'erreur correspondant. Le cas $\beta = 90^\circ$ correspond à un choc droit.



Nous avons pu comparer certains de nos résultats à un simulateur similaire présent sur le site internet de la NASA, qui calcule les sauts de vitesse, pression, température, masse volumique et l'angle de déflexion de la trajectoire en fonction du Mach amont et de l'angle d'inclinaison du front d'onde.

On constate que notre programme donne les mêmes résultats arrondis à 10^{-2} près tout en calculant en plus de ces grandeurs la variation d'enthalpie et le Mach aval.



Voir le code de notre programme en ANNEXE.

3.2. Ondes de choc en sciences de l'univers

3.2.1 Ondes de choc hydrodynamiques et ondes de choc magnétohydrodynamiques

a) Ondes de choc hydrodynamiques :

Premièrement, une onde de choc garde la propriété de base d'une onde : c'est une perturbation se propageant dans un milieu sans transport de matière mais avec transport d'énergie. Par ailleurs, une onde de choc est un processus thermodynamiquement irréversible car dissipatif d'énergie. En effet, la différence fondamentale entre une onde de choc et une onde sonore réside dans le fait que dans le cas d'ondes sonores, le milieu de propagation revient à son état d'équilibre initial une fois l'onde passée.

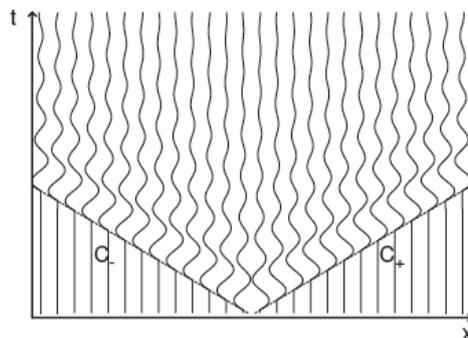
Une onde de choc accélère, chauffe et comprime le fluide sur son passage.

Perturbation de pression négligeable devant la pression de la conduite

Dans un premier temps regardons ce qu'il se passe lorsqu'on prend par exemple une conduite dans laquelle nous créons une perturbation de pression négligeable devant la pression de la conduite (modèle 1 dimension).

On considère un gaz parfait au repos dans cette conduite et on crée à l'instant $t=0$ une étincelle par exemple.

Le schéma ci-dessous représente les lignes d'univers (en traits pleins) des particules du gaz de la conduite dans laquelle se propage une perturbation de pression générée au milieu de la conduite à $t = 0$ ainsi que les caractéristiques C_+ et C_- . Ces dernières représentent le chemin de propagation des perturbations, autrement dit la direction du mouvement de l'onde acoustique, la direction du voyage du son.



Les caractéristiques C_+ qui se propagent à vitesse $+c$, et les caractéristiques C_- qui se propagent à vitesse $-c$ dans le référentiel de la conduite. On constate que les zones de compression du gaz sont des zones où le gaz est mis en mouvement dans le sens de propagation de l'onde. Inversement, dans les zones de dépression ou de raréfaction du gaz, les particules de gaz se déplacent en sens contraire de l'onde.

On remarque que l'entropie du gaz reste constante donc que la propagation de pression est isentropique c'est-à-dire adiabatique et réversible. Il n'y a donc aucune dissipation d'énergie.

Cas d'une forte variation de pression

On considère maintenant une variation ΔP non négligeable devant la pression P_0 du gaz.

Une forte surpression entraîne un mouvement oscillatoire du gaz à une vitesse Δc non négligeable devant la vitesse du son.

-Il se forme donc des régions de compression :

$V_{\text{particule}} = + \Delta c$: la particule évolue dans le sens de la propagation de l'onde.

-Et des zones de détentes du gaz :

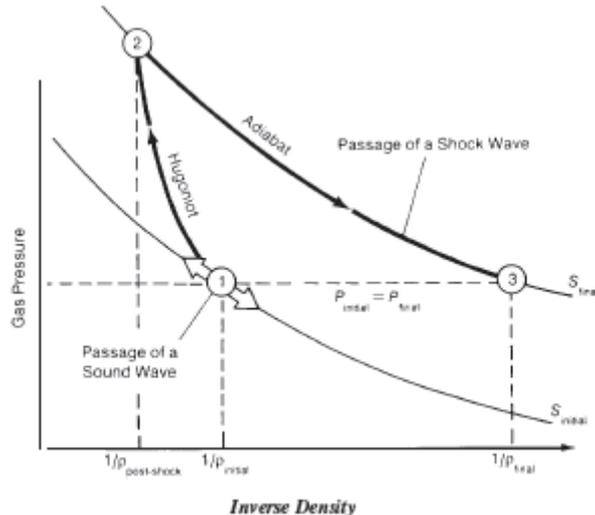
$V_{\text{particule}} = - \Delta c$: la particule recule.

Par conséquent, les zones de dépression se propagent moins rapidement que les zones de surpression. On obtient un phénomène de saut et une discontinuité se forme spontanément dans chaque période de l'onde sonore. Au final, c'est cette différence de vitesse de propagation des régions de détente et de surpression d'une période de l'onde qui entraîne la déformation progressive du profil du front d'onde.

Comme les zones de compression rattrapent les zones de détente, il apparaît dans le front d'onde une discontinuité de la pression, de la densité et de la vitesse du gaz. Il y a donc un écrêtage de l'onde et diminution de son amplitude donc une perte d'énergie. Car en effet si le front d'onde sonore intense présente une discontinuité cela implique que le gaz subit une compression irréversible en traversant la discontinuité.

Remarque: on peut ajouter que de manière générale, une discontinuité doit se former spontanément dans toutes parties du gaz dans lesquelles la pression diminue dans le sens de la propagation de l'onde sonore.

Les zones de compression continuant à rattraper les zones de détente dans les parties continues du profil de chaque période d'onde, l'écrêtage de l'onde se poursuit pendant sa propagation jusqu'à un amortissement complet de l'onde.



Après avoir traversé la discontinuité le gaz se détend le long d'une isentropique pour retrouver la pression moyenne du gaz : sa température est cependant plus grande et sa densité plus faible qu'avant la traversée de la discontinuité. **Il y a donc une dissipation d'énergie et une augmentation de l'entropie du gaz.** L'onde a finalement cédé une partie de son énergie au gaz.

Remarque : Les grandeurs physiques sont conservées à travers la surface de discontinuité. La surface de discontinuité étant supposée infiniment fine, elle ne peut accumuler ni matière, ni impulsion, ni énergie. Ces grandeurs physiques doivent donc être conservées à travers la surface

de discontinuité. Les lois fondamentales régissant l'écoulement à travers la surface de discontinuité sont la conservation de la matière, de l'impulsion et de l'énergie.

Formation d'une onde de choc

Maintenant pour produire une onde de choc, nous allons installer un piston au milieu de la conduite et le mettre en mouvement. Prenons comme référentiel le front de choc. Le front de choc sépare le milieu pré-choc (celui du gaz au repos) du milieu post-choc du gaz choqué.

En traversant le front de choc, les particules de gaz sont accélérées instantanément à la vitesse du gaz situé derrière le front de choc. Le front de choc se déplaçant à vitesse supersonique, le milieu choqué est donc obligatoirement subsonique dans le référentiel du front de choc. Par conséquent l'écoulement du gaz pré-choc est supersonique. Le gaz pré-choc arrive sur le front de choc sans s'y attendre et donc l'adaptation du gaz aux conditions physiques du milieu choqué se fait brutalement et de manière discontinue.

On remarque donc que dans ce référentiel, la vitesse d'une particule avant le choc est plus grande qu'après le choc. Concernant l'accélération du gaz choqué, dans le référentiel du front de choc le gaz apparaît freiné (la vitesse est divisée par 4) par le choc, et non accéléré. Cela n'est qu'une question de référentiel car dans le référentiel du gaz pré-choc, le gaz est accéléré à la vitesse :

$V'_2 = V_s - V_2 = \frac{3}{4} V_s$, V_s représentant la vitesse du choc et V_2 étant la vitesse des particules avant le choc.

Si maintenant on s'intéresse au bilan énergétique, dans le référentiel du front de choc, le gaz a perdu en traversant le front de choc les 15/16 de l'énergie cinétique qu'il avait dans le milieu pré-choc. Les 6/32 V_s^2 qui semblent manquer pour assurer la conservation de l'énergie ont en fait été consommés par le travail des forces de pression du gaz freiné, lors de sa mise à l'équilibre de pression avec le gaz post choc. Nous retrouvons ici le fait que c'est le flux d'enthalpie et non le flux d'énergie qui est conservé à travers la surface de discontinuité.

Pour ce qui est de l'entropie de part et d'autre du front de choc, dans le référentiel du gaz pré-choc, le gaz choqué augmente à la fois son énergie cinétique et son énergie interne. En effet l'énergie cinétique par unité de masse acquise par le gaz choqué est égale à son énergie interne par unité de masse. Donc l'entropie du gaz augmente après le passage du choc.

Qu'est-ce qui physiquement accélère, comprime et chauffe le gaz ?

Plaçons-nous maintenant dans le référentiel du gaz pré-choc. Il est désormais plus facile de comprendre les processus physiques à l'oeuvre dans l'accélération et le chauffage du gaz choqué car le gaz pré-choc a initialement, dans ce référentiel, une énergie cinétique nulle et une énergie interne négligeable. L'énergie qu'il va acquérir lui est donc entièrement fournie par le choc.

En bref, lors de sa traversée du front de choc, tout élément fluide est :

- comprimé car sa pression interne initiale P_1 est plus faible que la pression P_2 du gaz qui va l'entourer dans le milieu post-choc,
- accéléré car la force de pression P_2 exercée sur sa face aval vis à vis de l'écoulement est supérieure à la pression P_1 exercée sur sa face amont,
- chauffé par le travail de compression des forces de pression exercées par le gaz post-choc.

L'impulsion et l'énergie nécessaires à l'accélération du gaz choqué sont fournies par les forces de pression présentes immédiatement derrière le front de choc.

Qu'est-ce qui conduit l'onde de choc ?

Le fait que la pression post choc P2 soit bien plus grande que la pression pré-choc P1 n'est pas un effet parmi d'autre du passage du choc mais bien la cause unique qui donne naissance et conduit l'onde de choc. En effet cette variation de pression est générée par le mouvement d'un piston dont le milieu post-choc transmet les variations de pression.

Réflexion et transmission du choc à travers un saut de densité :

Quand l'onde de choc change de milieu de propagation, que l'onde de choc entre dans un milieu plus dense ou moins dense, l'onde de choc se décompose systématiquement en une onde de choc réfléchie, qui remonte le flot post-choc de l'onde incidente, et une onde de choc transmise, qui se propage dans le milieu dense. La discontinuité initiale entre les deux phases perdure et est mise en mouvement.

b) Ondes de choc magnétohydrodynamiques(MHD)

i) Généralités :

L'existence de champ magnétique peut modifier profondément la structure des ondes de choc. Les ondes de choc magnétohydrodynamiques (MHD) sont des ondes de choc qui, en plus des lois de la dynamique des gaz, respectent les lois de l'électromagnétisme de Maxwell.

Le gaz est souvent plongé dans un champ magnétique non négligeable. Ces ondes de choc sont observées à la fois dans le milieu interplanétaire, dans le milieu interstellaire et dans les régions de formation d'étoiles. Dans l'étude des ondes de choc MHD, l'état d'ionisation du gaz est un facteur important car le champ magnétique interagit directement avec les particules chargées du gaz mais seulement indirectement avec le gaz neutre via les collisions entre particules chargées et particules neutres.

La présence d'une onde de choc va donc déformer les lignes de champs magnétiques et rendre possible la création d'ions ou la formation de certaines molécules. Dans le cas où un champ magnétique transverse est présent dans le milieu pré-choc, une part de l'énergie cinétique incidente du choc est conservée dans le nuage après refroidissement du gaz, sous forme d'énergie magnétique. Par exemple on peut imaginer qu'un choc soit suffisamment rapide pour dissocier H₂ (énergie de dissociation 4,7 eV), mais pas assez pour ioniser significativement H (énergie d'ionisation 13.6 eV).

Un gaz ionisé plongé dans un champ magnétique est susceptible de véhiculer différents types d'ondes magnétohydrodynamiques ou ondes MHD. A la différence des ondes sonores qui sont compressives et isotropes, les ondes MHD sont compressives ou non compressives, et leur célérité dépend de l'orientation des lignes de champ magnétique par rapport à leur direction de propagation.

Nous pouvons dissocier deux grands types d'ondes MHD :

Choc MHD mono-fluide (choc J) : Si le gaz est suffisamment ionisé par l'onde de choc, le couplage collisionnel entre les particules chargées et les particules neutres sera suffisamment fort pour que ces particules se comportent comme un seul fluide couplé au champ magnétique. Celles-ci détiennent des propriétés semblables aux ondes hydrodynamiques.

Ondes de choc MHD multi-fluides (chocs C) : Si à l'inverse le gaz choqué reste très faiblement ionisé, les particules chargées peuvent sous certaines conditions se découpler durablement des particules neutres dans le choc. Ces dernières possèdent par ailleurs des propriétés très différentes des ondes de choc MHD mono-fluides.

De manière générale, les ondes magnétohydrodynamiques peuvent être compressives ou non compressives par contre leur célérité a la particularité de dépendre de l'orientation des lignes de champs magnétique par rapport à leur direction de propagation.

- **Les ondes d'Alfen** : elles propagent les déformations des lignes de champ magnétique le long de ces lignes de champ (exactement comme les ondes élastiques se propagent dans une guitare). Ces ondes n'entraînent pas de variation de l'intensité du champ magnétique, c'est-à-dire qu'il y a pas de rapprochement ni éloignement relatif des lignes de champ magnétique. Les ondes d'Alfen sont des ondes non compressives.

La vitesse des ondes d'Alfen est donné par $V_a = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$ où B est le champ magnétique et ρ est la masse volumique du gaz.

- **Les ondes magnéto-soniques** : ce sont des ondes compressives qui propagent les variations de pression dans la direction perpendiculaire aux lignes de champ rapprochant et éloignant alternativement les lignes de champ (à la manière d'ondes sonores) ;

La vitesse des ondes magnéto-soniques est $V_{ms} = \sqrt{c^2 + Va^2}$.

ii) Modes de propagations d'une onde MHD :

Les ondes MHD peuvent se propager sous 3 modes (lent, intermédiaire, rapide) dans une direction θ par rapport aux lignes de champ magnétique.

A chaque mode correspond une célérité :

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{c^2 + Va^2 - \sqrt{c^2 + Va^2 - 2cVa \cos(2\theta)}}$$

$$V_I = Va \cos(\theta)$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{c^2 + Va^2 + \sqrt{c^2 + Va^2 - 2cVa \cos(2\theta)}}$$

Les ondes lentes et rapides sont des ondes compressives : elles modifient l'intensité du champ magnétique mais pas son plan de polarisation, tandis que les ondes intermédiaires ne sont pas compressives et peuvent donc changer le plan de polarisation du champ magnétique mais pas son intensité. De plus, plus le choc est rapide, plus la compression finale du gaz est importante.

Remarque : Les ondes rapides peuvent se propager dans toutes les directions

Les ondes magnétohydrosoniques sont des cas particuliers d'ondes rapides avec $\theta = \frac{\pi}{2}$.

- Ondes MHD transverses : la direction du champ magnétique est perpendiculaire à la direction de propagation du choc. Dans ce cas la résistance du champ magnétique à la compression est

maximale (elle est caractérisée par la pression magnétique $\frac{B}{8\pi}$ qui s'ajoute à la pression thermique dans la direction perpendiculaire aux lignes de champ).

iii) Relations de Rankine-Hugoniot pour un choc adiabatique

Pour les ondes de choc magnétohydrodynamiques, les relations de Rankine-Hugoniot pour un choc adiabatique sont les mêmes que celles écrites pour un choc hydrodynamique adiabatique à part que l'on remplace la pression thermique P par la somme de la pression thermique et de la pression magnétique et on remplace l'enthalpie $\frac{\square P}{\square - 1}$ par la somme de l'enthalpie et de l'énergie magnétique $\frac{B^2}{4\pi}$.

On a donc :

$$\begin{aligned} \rho_1 v_1 &= \rho_2 v_2, \\ \rho_1 v_1^2 + P_1 + \frac{B_1^2}{8\pi} &= \rho_2 v_2^2 + P_2 + \frac{B_2^2}{8\pi}, \\ \left(\rho_1 \frac{v_1^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1 + \frac{B_1^2}{4\pi} \right) v_1 &= \left(\rho_2 \frac{v_2^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_2 + \frac{B_2^2}{4\pi} \right) v_2. \end{aligned}$$

Les relations de Rankine Hugoniot sont des relations de sauts entre les valeurs des grandeurs physiques caractérisant l'écoulement au point 1 et 2. Elles ne font que traduire les lois de conservation fondamentales de la physique d'un point à l'autre du choc. On a de plus, $M_s = \frac{v_s}{c_1}$ est le nombre de Mach (sonique) du choc et $M_a = \frac{v_s}{v_a}$ est le nombre de Mach alfnénique du choc. La température du gaz en tout point d'un choc MHD mono fluide adiabatique peut être calculée en connaissant le rapport de compression :

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2}{\rho_1} &= \frac{2(\gamma + 1)}{D + \sqrt{D^2 + 4(\gamma + 1)(2 - \gamma)M_A^{-2}}} = \frac{v_1}{v_2} & T_2 &= \frac{\mu_2 V_s^2}{k} \frac{1}{\chi} \left(1 + \frac{1}{\gamma M_s^2} - \frac{1}{\chi} + \frac{1}{2M_A^2} (1 - \chi^2) \right). \\ D &= (\gamma - 1) + 2M_s^{-2} + \gamma M_A^{-2}, \end{aligned}$$

Une fois que le gaz post-choc a retrouvé sa température pré-choc, le choc est dit isotherme.

iv) Temps caractéristique de refroidissement isotherme du milieu inter-nuages lors du passage d'un choc :

Ce temps de refroidissement est relativement long. Pour vous donner un exemple concret, je vais reprendre celui donné par V. Guillet dans sa thèse sur l'évolution des poussière dans les choc. Dans le milieu interstellaire, la phase ténue ($n_H = 0.25 \text{ cm}^{-3}$ environ et la température est tiède (de l'ordre de 10^4 Kelvins)) est régulièrement traversée par les ondes de choc générées par les explosions de supernovae. Après calculs, on se rend compte qu'un choc de 100 km/s qui se propagent dans un milieu ténu et ionisé refroidit à $T = 10^4 \text{ K}$ en environ 1000 ans. Dans un modèle 1D la vitesse post choc du gaz est indépendante de la vitesse du choc : $v_2 = \frac{v_A}{\sqrt{2}}$

Le gaz atteint des températures beaucoup plus élevées dans un choc J que dans un choc C. Dans un choc J, le chauffage s'effectue d'un seul coup, au niveau du front de choc et le refroidissement n'intervient qu'ensuite, ce qui explique un haut pic de température. Dans un choc C, le chauffage du gaz (causé par la friction entre les deux fluides) et le refroidissement radiatif coopèrent tout au long du choc et limitent l'énergie thermique du gaz.

3.2.2 Les ondes choc à l'origine de la formation des étoiles

Tout d'abord, l'espace compris entre les étoiles de notre Galaxie n'est pas vide : il est constitué d'un mélange extrêmement dilué de gaz et de poussières : le milieu interstellaire. La matière interstellaire est donc constituée d'atomes, de radicaux et molécules plus ou moins complexes ainsi que de très petits grains de poussière de très faible dimension.

Cette matière diluée entre les étoiles est en constante évolution physico-chimique entre des phases chaudes et ténues et des phases très froides et denses qui sont le berceau de la formation de nouvelles étoiles. Dans les condensations sombres et froides, les grains coagulent entre eux et les molécules sont en grande partie collées sur ces grains pour former des manteaux de glaces moléculaires.

Comme on peut le voir sur la photo ci-dessous, le milieu interstellaire est observable directement, notamment en lumière visible, sous la forme de nébuleuses diffuses plus ou moins brillantes et contrastées.

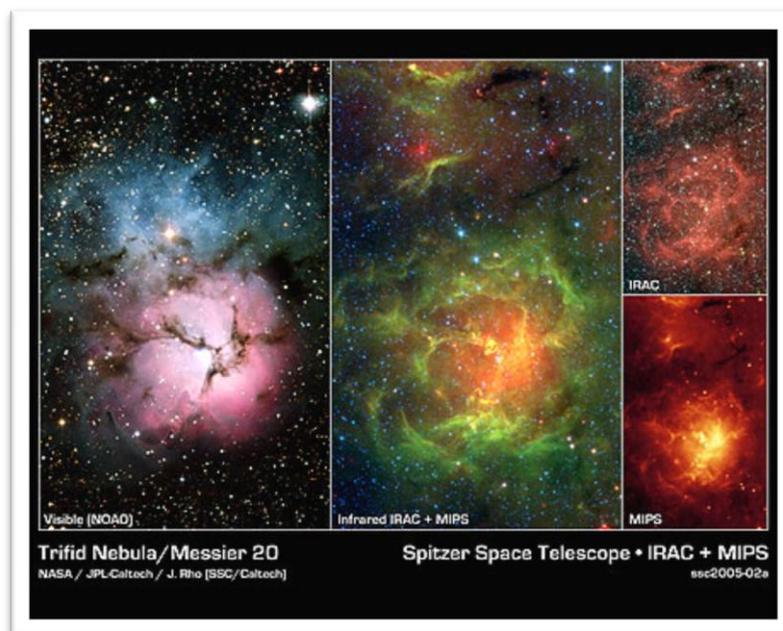


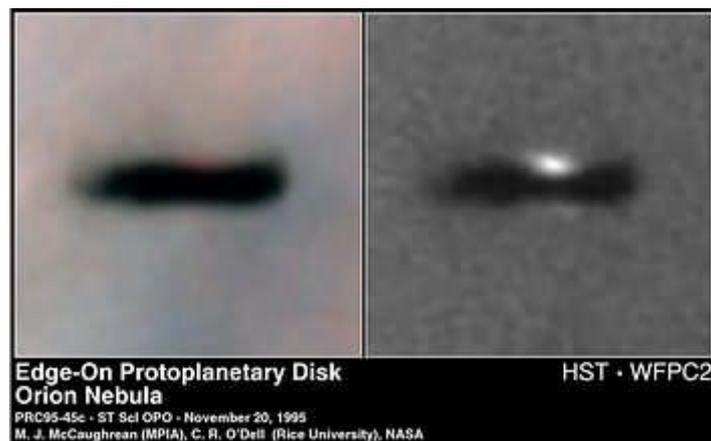
Figure 1 représentant des nuages denses dans le vide interstellaire

Les nuages denses présents dans le milieu interstellaire sont fréquemment traversés par des ondes de choc générées par les vents stellaires, les flots moléculaires et les jets autour des étoiles en formation, les explosions de supernovae, ou encore par des collisions avec d'autres nuages. Ces chocs accélèrent, compriment et chauffent le nuage traversé, activant ou accélérant des

réactions chimiques interdites ou trop lentes à basse température. Les nuages denses sont plongés dans un champ magnétique et par là-même susceptibles de propager deux types de choc :

- des chocs monofluides (chocs J) marqués par un fort pic de température et une discontinuité des variables physiques à la traversée du front de choc,
- des chocs continus et multi-fluides (chocs C) où la température du gaz ne dépasse pas 3000 - 4000 K et qui présentent une diffusion ambipolaire du fluide chargé à travers le fluide neutre. La dynamique des poussières à travers le choc augmente la fréquence et l'intensité des collisions gaz-grain et grain-grain.

Comme ce sont les collisions entre particules qui dissipent l'énergie cinétique incidente du choc, la vitesse d'impact est le principal facteur déterminant l'évolution des poussières dans le nuage. Les grains peuvent se briser l'un sur l'autre ou au contraire coaguler pour former de plus gros grains. Ils peuvent également être vaporisés instantanément lors d'une collision grain-grain ou érodés progressivement par le gaz, relâchant ainsi en phase gazeuse une partie des éléments réfractaires qui les composent. Au final, c'est au sein de ces nuages, par contraction gravitationnelle et fragmentation du nuage, que se forment les nouvelles étoiles.



Disque protoplanétaire en formation dans la nébuleuse d'Orion prise par le télescope Hubble

Crédit : NASA - Hubble Space Telescope

Au centre de la nébuleuse proto-stellaire, se situe le cœur très chaud de l'étoile en formation, où les molécules et les poussières sont dégradées en leurs constituants atomiques, enrichissant en éléments lourds la matière originelle de l'étoile nouvellement formée. Parmi les étoiles nouvellement formées, les plus massives d'entre elles exploseront en supernovae, réinjectant dans le milieu interstellaire environnant de nouveaux éléments lourds qui entreront à leur tour en jeu dans la chimie interstellaire...

Pour conclure, à l'instar des autres constituants de l'univers tels que les étoiles, galaxies, amas de galaxies, le milieu interstellaire au sein des galaxies est en perpétuelle évolution : il participe au recyclage de la matière cosmique.

3.2.3 Les principaux phénomènes produisant des ondes de choc en astrophysique

a) Ondes de Choc au sein de notre système solaire

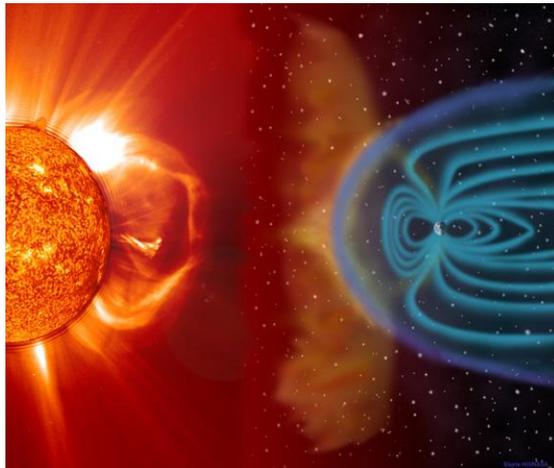
i) Quelques définitions

Une des plus importantes découvertes de ces dernières années d'exploration spatiale est l'association qui existe entre les ondes de choc et les augmentations de flux de particules de grande énergie (jusqu'à quelques dizaines de MeV) dans l'espace interplanétaire. Mais tout d'abord il me paraît important d'expliquer certains termes :

Vent solaire : Le vent solaire est un flux de plasma constitué essentiellement d'ions et d'électrons qui sont éjectés de la haute atmosphère du Soleil. Ce flux varie en vitesse et en température au cours du temps en fonction de l'activité solaire.

Éjection de masse coronale : Une éjection de masse coronale est une bulle de plasma produite dans la couronne solaire. Elle est souvent liée à une éruption solaire. Elles modifient les caractéristiques du vent solaire, se déplaçant à très grande vitesse dans le milieu interplanétaire (entre 100 km/s et 2 500 km/s) et peuvent parcourir la distance Terre-Soleil en quelques jours.

La magnétosphère : La magnétosphère est la région entourant un objet céleste (ici la Terre) dans laquelle les phénomènes physiques sont dominés ou organisés uniquement par son champ magnétique. Toute planète dotée d'un champ magnétique (la Terre, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune) possède sa propre magnétosphère. Mercure et Ganymède, une lune de Jupiter, en possèdent également une. La magnétosphère terrestre est située au-delà de l'ionosphère, c'est-à-dire au-dessus de 800 à 1 000 km d'altitude. En réalité, la magnétosphère agit comme un écran et protège la surface terrestre des excès du vent solaire, nocif pour la vie. En contrepartie le vent solaire et les éjections de masse coronale déforme le spectre magnétique de la Terre en lui donnant une forme de comète, comme le montre schématiquement la figure ci-dessous.



ii) Processus de formation d'une onde de choc dans l'espace interplanétaire

Au niveau de notre soleil

La formation d'une onde de choc dans l'espace interplanétaire plus particulièrement dans l'espace stellaire, s'explique par le fait que cet espace est balayé en permanence par le vent solaire, qui n'est autre que l'extension de la couronne solaire, dont la température est de l'ordre de 2 millions de degrés. La vitesse du vent solaire n'est ni constante dans le temps, ni uniforme dans l'espace, du fait de l'évolution temporelle et spatiale de la configuration magnétique de la couronne.

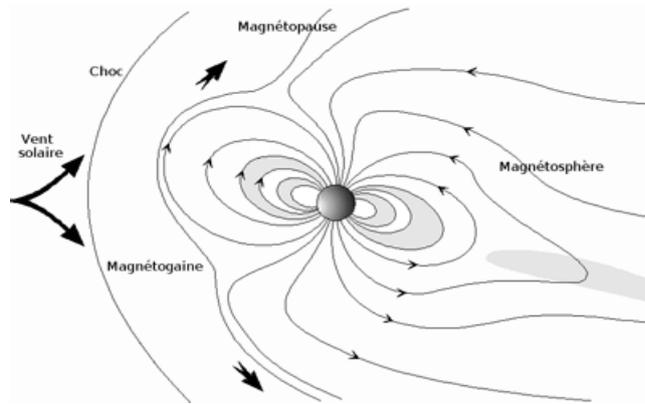
Lors de l'interaction d'un courant de vent solaire rapide avec le vent calme, une onde de choc peut être générée. Cela se produit en particulier dans les deux cas suivants :

- Lors des éruptions solaires, des bouffées de matière coronale sont éjectées et se propagent dans l'espace interplanétaire. Une onde de choc se forme alors à l'interface entre cette bouffée de plasma rapide et le vent solaire permanent.. On observe simultanément un accroissement de flux de particules énergiques (essentiellement des protons, d'énergie généralement inférieure à quelques MeV).

- Des courants de vent solaire rapide ont pu être associés à des structures dans la couronne : les trous coronaux, qui rayonnent particulièrement peu dans les domaines X, UV et radiométrique. Ces structures sont des régions de faible densité et température. Le vent solaire rapide qui en sort entre en interaction avec le vent calme provenant des régions voisine ; une double onde de choc se forme, l'une vers l'extérieur de la cavité solaire, dans laquelle le vent solaire lent est accéléré brutalement, l'autre, vers l'intérieur, dans laquelle le vent solaire rapide est décéléré. Des particules sont accélérées en permanence par ces ondes de choc.

Au niveau de la Magnétosphère terrestre

Les émissions de matières coronales provoquent également des ondes de chocs lorsqu'elles atteignent la magnétosphère en la comprimant. Par ailleurs, le champ magnétique du Soleil, qu'elles transportent, perturbe la magnétosphère terrestre. De plus, il se forme également des ondes de chocs à l'interfaces de la magnétosphère terrestre et du vent solaire, en effet, du fait de sa haute température, l'énergie cinétique des électrons coronaux est très grande, c'est pour cette raison qu'ils s'échappent dans l'espace et créent dans la couronne un déséquilibre de charge électrique qui, à son tour, provoque l'échappement des protons dans le milieu interplanétaire. La différence de pression entre la basse couronne et le milieu interplanétaire est telle que le vent solaire atteint une vitesse supérieure à celle des perturbations de densité qui peuvent s'y propager ; il s'écoule à une vitesse supersonique, de l'ordre de 400 km/s en moyenne (~ 1 keV). Le vent solaire arrivant sur la magnétosphère avec une vitesse supersonique, une onde de choc est produite en amont de la Magnétogaine, (comme schématisé ci-après) ce choc apparaît comme une zone de transition qui permet la conversion de l'énergie dirigée du vent solaire en d'autres formes d'énergie via des mécanismes de dissipation «anormaux» faisant intervenir des interactions ondes-particules.



b) Explosion d'une supernova

L'explosion des étoiles massives en supernova entraîne la libération en seulement quelques secondes d'une quantité phénoménale d'énergie dans le milieu interstellaire. Cela crée une gigantesque onde de choc brûlant à plus de millions de degrés la matière qu'elle traverse. Comme cette onde de choc rayonne principalement un rayonnement X, elle est détectable par les télescopes spatiaux. Et ces ondes sont riches en informations pour les astronomes :

Tout d'abord, l'observation de la propagation de l'onde de choc permet de retrouver les dates d'explosion. Ensuite, l'onde de choc n'éclaire que les endroits où il existe de la matière, son observation permet donc de mieux connaître l'environnement de l'astre. Et donc de remonter aux éjections de matière avant l'explosion lorsque l'étoile massive expulsait un fort vent stellaire.

(Le vent stellaire est constitué de particules de matière ordinaire expulsées dans l'espace par les étoiles).

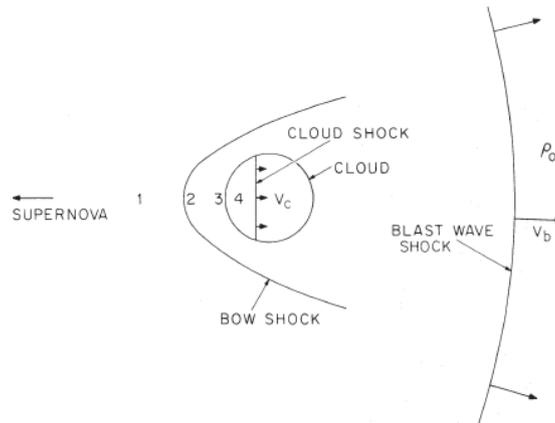
Cela permet donc aussi aux astronomes de calculer la quantité de matière éjectée bien avant l'explosion. Finalement l'observation d'une explosion de supernova permet d'en apprendre beaucoup sur l'énergie mise en jeu lors de l'explosion et la manière dont l'onde de choc se déclenche et se propage.

De plus, selon l'article paru en septembre 2005 dans le magazine La Recherche, les scientifiques font l'hypothèse que ces ondes de choc sont la source des rayons cosmiques très énergétiques.

(Les rayons cosmiques qui sont un flux de noyaux atomiques et de particules de hautes énergies qui circulent dans le vide interstellaire).

i) Onde de choc de supernova frappant un nuage moléculaire

Grâce la thèse de V.Guillet, on tente d'étudier l'interaction entre l'onde de choc générée par l'explosion d'une supernova et les nuages interstellaires que ce choc traverse.



Cette figure représente l'écoulement post-choc de l'onde de choc incidente supersonique relativement au nuage frappé. On remarque bien qu'un choc d'étrave à l'avant du nuage se forme et qu'une partie de l'onde de choc traverse le nuage et qu'une autre partie est réfléchi.

Si l'onde de choc a déjà frappé le nuage et l'a même enveloppé et dépassé, le choc transmis dans le nuage se propage à une vitesse réduite d'un facteur égal à la racine carrée du rapport de densité, tandis que le choc réfléchi s'éloigne du nuage par la gauche en direction de la supernova.

Un écoulement stationnaire s'établit rapidement autour du nuage sur un temps caractéristique égal au temps mis par le son pour faire le tour du nuage par le milieu inter-nuages. Si cet écoulement est supersonique par rapport au nuage frappé, le choc réfléchi se transforme en un choc d'étrave stationnaire, c'est-à-dire qu'il s'instaure un écoulement supersonique autour du nuage générant une surface de discontinuité à l'avant du nuage. Sinon, le choc réfléchi disparaît rapidement et aucun choc d'étrave ne se forme.

En conclusion, le changement de densité du milieu et l'accélération due aux champs magnétiques des particules éjectées lors d'explosion de supernovae par exemple, crée des ondes de choc.

c) Les puissants jets lancés dans le milieu interstellaire

i) Les éjecta d'une supernova, lancés à plusieurs milliers de km.s^{-1} en direction du milieu interstellaire

Les éruptions solaires sont les événements les plus énergétiques du système solaire. Pour avoir un ordre d'idée l'énergie libérée chaque seconde au cours d'une grande éruption est d'environ 10^{22} Joules. Ces éruptions sont accompagnées d'une émission importante de rayonnement (notamment dans la gamme des rayons X) et s'accompagne d'une accélération des particules à des vitesses proches de celle de la lumière.

Ces éruptions de filament entraînent des éjections de masse coronales, sortes de nuages magnétisés qui se propagent dans le milieu interplanétaire à des vitesses allant jusqu'à 2000 km/s. Ces éjections de masse coronale s'accompagnent d'énormes ondes de choc, comme nous

pouvons le visualiser en suivant le lien ci-dessous. Ainsi, des particules très énergétiques sont envoyées dans le milieu interplanétaire et celles déjà présentes sont accélérées sous l'impulsion de l'onde de choc qui se déplace en amont des éjections de masse coronales.

(Cf film) : http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_activite-solaire/so-masse-coronale.html

ii) Les jets collimatés supersoniques émis à plusieurs centaines de km.s-1 par les étoiles en formation

Les jets peuvent provoquer des chocs dans le milieu interstellaire car ils possèdent généralement une vitesse supersonique. Ce sont par définition des flux collimatés de matière éjectés par un objet céleste. Cependant l'origine des jets déployés par les étoiles à leur naissance demeure mystérieuse (sans doute liée au disque qui les entoure et au champ magnétique).

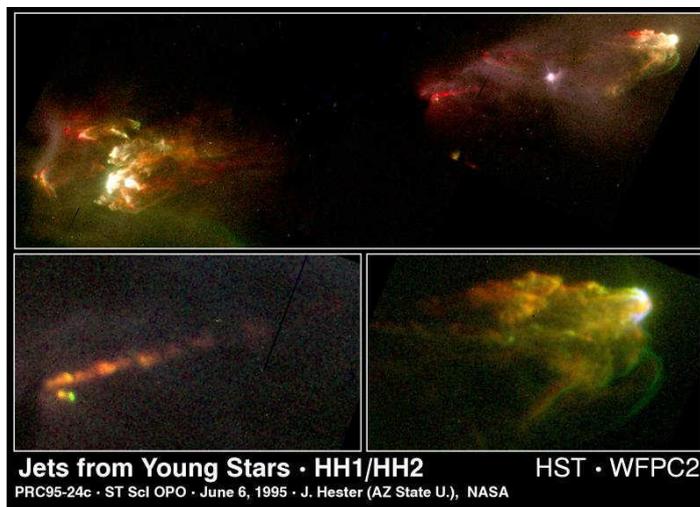


Figure 2 : Jets provenant de jeunes étoiles

d) Astroblèmes

Astroblème : Ensemble des caractéristiques liées à un cratère météoritique fossile à la surface de la Terre elle-même.

Les cratères météoritiques terrestres sont des formations éphémères, parce que la Terre est une planète vivante sur laquelle tout se transforme rapidement. Ces cratères sont détruits par une érosion active, comblés par la sédimentation. Ce qu'il faut retenir principalement, c'est qu'un petit cratère de quelques dizaines de mètres est immédiatement gommé de la surface terrestre, ou devient totalement indécélable en quelques centaines d'années. Tous les cratères météoritiques de 1 km ou moins sont des formations quaternaires ou tertiaires. En règle générale, on estime actuellement l'espérance de vie moyenne d'un astroblème terrestre de la façon suivante :

- 1 MA environ pour un cratère de 1 km de diamètre
- quelques MA ou dizaines de MA pour un cratère de 1 à 10 km
- quelques centaines de MA pour un cratère de plus de 10 km ;
- 1 ou 2 milliards d'années pour un cratère de 100 km ou plus.

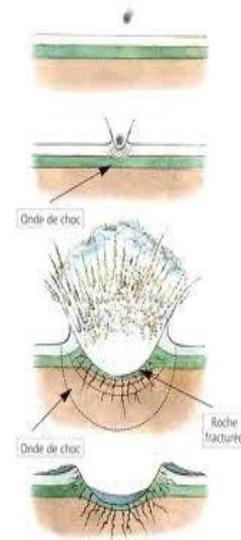
INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN

Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur

BP 8 – place Emile Blondel - 76131 Mont-Saint-Aignan - tél : 33 2 35 52 83 00 - fax : 33 2 35 52 83 69

La première conclusion importante est qu'il n'existe plus sur Terre aucun astéroïde plus ancien que deux milliards d'années. Toutes les formations d'origine cosmique remontant aux deux premiers milliards d'années de la Terre ont disparu définitivement.

La formation des cratères d'origine cosmique est fondamentalement différente selon leur taille. Pour les petits cratères de moins de 100 mètres de diamètre, la destruction du sol est mécanique. Ils sont formés par des corps de faible masse, dont la vitesse d'impact n'excède pas 1 ou 2 km/seconde. De nombreux fragments de l'objet initial existent souvent dans les talus de débris rocheux qui entourent ces cratères et à l'intérieur même de ces cratères. L'importance du phénomène est à la mesure de l'énergie dégagée : insignifiante, même à l'échelle régionale.



ces
à

Il n'en va pas de même pour les cratères de plus de 100 mètres et qui peuvent dépasser 100 km dans certains cas. La destruction est alors explosive et le corps céleste est totalement vaporisé au cours de l'impact. C'est ce qui explique que l'on ne retrouve que des débris insignifiants de l'objet initial. En touchant le sol, celui-ci connaît une décélération exponentielle extrêmement rapide, qui s'amortit sous la surface terrestre à une profondeur égale à quelques fois son propre diamètre, et qui provoque des ondes de choc très puissantes. La pression ainsi créée instantanément peut sans doute atteindre, lors de certains impacts importants, celle que l'on doit trouver au centre de la Terre (plus de 10 mégabars).

Cette phase de compression des roches dans la zone atteinte par les effets du choc est suivie de deux autres phénomènes importants : l'écoulement hydrodynamique et la dispersion explosive du matériel comprimé. Un impact sérieux entraîne donc obligatoirement la vaporisation, la fusion, le métamorphisme de choc et la fracture d'un volume de roches qui peut être assez impressionnant. Il convient d'insister sur le fait que tout se passe très rapidement : en moins d'une minute tout est fini, le temps que le sol revienne à sa pression normale.

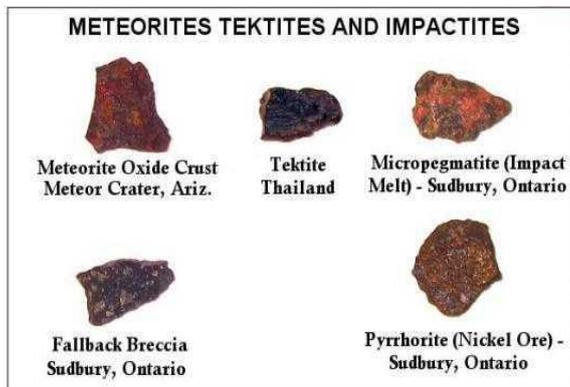
Taille de l'objet	Fréquence	Énergie libérée
<50 m	Fréquent (50 000 tonnes/an)	Combustion dans l'atmosphère
50 m	200 à 400 ans	12 MT
100 m	1 000 à 5 000 ans	15 MT
500 m	0,1 à 0,5 Ma	11 103 MT
1 km	1 Ma	9 104 MT
5 km	10 à 50 Ma	1 107 MT
10 km	100 à 500 Ma	1 108 MT
>10 km	40 à 200 vers 3,9 Ga	?
>100 km	Probable entre 4,6 et 3,9 Ga	?

>1000 km	1 ou plus ?	?
----------	-------------	---

Remarque : Une mégatonne, abrégé par Mt, est une unité d'énergie qui correspond à la quantité de travail libérée par l'explosion d'un million de tonnes de trinitrotoluène (TNT). On exprime la masse de TNT qu'il faut réunir pour obtenir une explosion libérant une quantité d'énergie équivalente. Une mégatonne correspond alors à l'énergie dégagée par l'explosion d'un million de tonnes de TNT.

Une MT(mégatonne) de TNT correspond donc à $4,184 \times 10^{15}$ joules = 4,184 PJ (pétajoules).

Dans les environs du cratère, on trouve des roches fondues, particulièrement des sables de quartz et des verres de silice : les impactites. Celles-ci sont les roches du cratère transformées physiquement et chimiquement par les ondes de choc.



Depuis le début des années 1960, de nombreux travaux ont été consacrés à la recherche de critères utilisables pour l'identification possible d'impacts, en l'absence de débris météoriques. Parmi les plus importants et les plus caractéristiques de ces critères d'identification, outre évidemment la forme particulière du cratère et ses rebords saillants, on peut citer les cônes de pression (les shatter-cones). Il s'agit de déformations coniques couvertes de stries rayonnantes et branchues qui vont de 1 cm à plus de 12 mètres. Elles sont provoquées par l'onde de choc sur les roches et ont leur apex dirigé vers la source de pression. L'avantage c'est que les cônes de pression sont très reconnaissables, et qu'ils n'existent que comme conséquence d'impacts sérieux. Aucun cataclysme terrestre, même très énergétique, n'est capable d'en produire. Il s'agit donc d'un critère significatif.

3.3. Ondes de choc dans le domaine biomédical et nutritionnel

3.3.1. La thérapie par onde de choc

a) Qu'est-ce qu'une thérapie par Ondes de Chocs ?

La thérapie par ondes de chocs est une méthode de traitement moderne non invasive et hautement efficace notamment pour le traitement de pathologies musculo-squelettiques localisées:

- Tendinites dégénératives du corps du tendon
- Tendinite d'épaule, du coude, du poignet
- Calcifications d'épaules...

Elle se caractérise par une série d' « impulsions » sur la région affectée.

En 1980, la thérapie par ondes de choc a été utilisée pour la première fois pour désintégrer des cailloux dans les reins d'un patient.

b) Historique sommaire

Dès 1991, des pionniers bulgares ont eu l'idée d'employer un lithotriporteur (appareil utilisé pour le broyage des calculs urinaires permettant leur élimination par voie naturelle) pour traiter des pseudarthroses (absence de consolidation d'une fracture et formation d'une articulation accidentelle). Les premiers résultats de deux chercheurs de Sofia (Bulgarie), V.D. Valchanou et P. Michalov, ont été plus qu'encourageants. Un effet analgésique apparaissait en effet après quelques séances. Des travaux ultérieurs ont montré que les niveaux d'énergie requis pour obtenir l'analgésie étaient plus faibles que ceux qu'avaient employés les premiers auteurs.

Le développement d'un équipement spécifique impliquait une visualisation échographique afin de repérer la lésion et de guider le traitement. Au plan purement technique enfin, l'émission des ondes de choc devait être parfaitement maîtrisée (densité d'émission, focalisation, reproductibilité). L'aboutissement des travaux a été un équipement Siemens intégrant l'ensemble de ces éléments.

Divers essais ont été réalisés entre autres par les scientifiques J.D. Rompe et Coll (Mayence, Allemagne). Ils ont permis de conclure à l'efficacité antalgique des ondes de choc sur la douleur en cas d'épine calcanéenne, de tendinopathie (inflammation d'un tendon) de l'épaule et d'épicondylite (douleur résultant de l'inflammation de l'épicondyle).

Divers essais (certains placebo) ont été ensuite réalisés aux Etats-Unis dans trois cliniques orthopédiques sur un groupe de 114 patients souffrant de tennis elbow(douleur résultant de l'inflammation de l'épicondyle). Ces travaux ont mis en évidence une amélioration significative de la douleur et, un rétablissement de la fonctionnalité sous traitement actif.

Les équipements biomédicaux ont considérablement évolué au cours de ces 20 dernières années : plus compacts, meilleur marché, permettant des traitements peu invasifs sans anesthésie ils sont aussi mieux rentabilisés grâce à une recherche visant à tester de nouvelles applications avec un même appareil.



Photographie lors d'une séance de traitement d'une tendinite du coude.

c) Différents types d'onde de choc thérapeutique

Il existe différentes ondes de choc thérapeutique : F-SWT, R-SWT et P-SWT.

- Tout d'abord, il ya la F-SWT (Focus Shockwave Therapy) autrement dit onde de choc focalisée. C'est une onde de choc de focalisation. Son énergie maximum est atteinte au point rouge de l'image. Pour générer cette onde, une source électromagnétique cylindrique est utilisée : on a une onde cylindrique divergente qui est généré puis transformée en une onde sphérique convergente utilisant un paraboloïde de rotation spéciale. Ce type d'onde fait effet jusqu'à 12,5 cm de profondeur.



Image représentant l'onde F-SWT

- Ensuite, nous avons R-SWT (Radial Shockwave Therapy). C'est une onde de choc radiale (c'est-à-dire diffusée de façon sphérique dans le tissu humain) à bas niveau d'énergie. Le principe est le suivant : dans l'applicateur on a un projectile (une masselotte) accéléré par air comprimé. Le mouvement du projectile combiné à son poids accumule de l'énergie potentielle qui lorsqu'elle frappe un transmetteur d'impulsion à la pointe de l'appareil, transforme cette énergie potentielle en énergie acoustique sous forme d'impulsions à ondes larges. Une fois transmise dans le corps du patient, ces ondes divergent dans le sens des tissus à soigner.

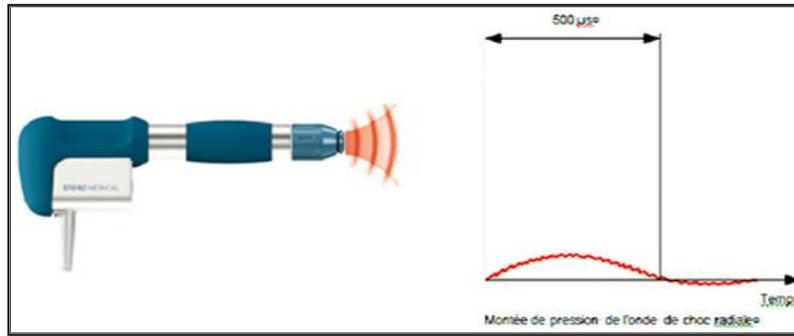


Image représentant l'onde R-SWT

- Enfin, nous avons P-SWT (Planar Shockwave Therapy).

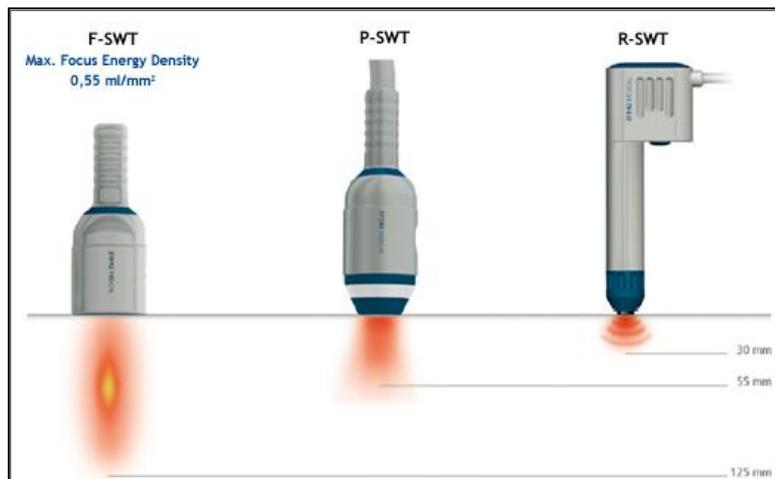
Ce sont des ondes de chocs planaires. Elles sont plus utilisées pour des troubles cutanées car dans ce cas, on ne veut pas que l'onde soit focalisée en un point mais plutôt qu'elle recouvre une certaine surface (la peau). L'appareil thérapeutique utilise donc un réflecteur parabolique pour rendre l'onde planaire.

Le faisceau d'onde distribué est alors presque parallèle, formant un « tube ».



Image représentant l'onde F-SWT

Image comparative des différents types d'ondes.



Le choix du type d'onde thérapeutique se fera donc en fonction de la pathologie et de la

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE ROUEN

Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur

BP 8 – place Emile Blondel - 76131 Mont-Saint-Aignan - tél : 33 2 35 52 83 00 - fax : 33 2 35 52 83 69

profondeur des tissus affectés.

d) Processus d'action et de guérison pour les troubles musculo-squelettique.

Lors d'une thérapie par ondes de choc, l'organisme réagit en augmentant l'activité métabolique tout autour de la zone douloureuse. Ceci stimule, accélère le processus de guérison. Premièrement, elle explose littéralement les calcifications (La calcification est le processus normal ou anormal au cours duquel les tissus de l'organisme se durcissent, du fait d'un dépôt de sels de calcium) tendineuses. Elle détruit également les micro-calcifications qui se créent dans la jonction ténopériostée. Deuxièmement, l'onde sature les récepteurs à la douleur et entraîne une sécrétion d'endorphines responsable d'un effet antalgique dans les heures qui suivent. Troisièmement, par la libération dans les tissus de NO (monoxyde d'azote) et d'un facteur de croissance vasculaire, elle stimule la régénération cellulaire.

i) Effets secondaires

Il peut y avoir quelques petits effets secondaires tels que : douleur, hématome, gonflement et irritation cutanée.

ii) Avant de traiter

Quelques principes sont à respecter :

1) Diagnostic : un diagnostic précis est, comme toujours en médecine, indispensable pour le succès du traitement. On doit savoir avant de traiter, qu'elle est exactement la lésion et son type. Pour toutes les indications (ou presque) un bilan échographique est indispensable avant de commencer un traitement par onde de chocs.

2) Absence de contre-indication

3) Bien informer le patient sur la thérapie par ondes de choc et en particulier sur les effets attendus et les éventuels effets secondaires.

e) Les ondes de choc : traitement possible pour les calculs rénaux.

i) Définition

Les calculs rénaux, communément appelés « pierres aux reins », sont des cristaux durs qui se forment dans les reins et peuvent entraîner de vives douleurs (cf. image ci-dessus). Les médecins utilisent le terme lithiase urinaire pour désigner ces cristaux, qui peuvent aussi se retrouver dans le reste de l'appareil urinaire : dans la vessie, l'urètre ou les uretères.



Photo d'un calcul rénal

ii) lithotritie extracorporelle

La lithotritie extracorporelle par ondes de choc (SWL) est une méthode thérapeutique de traitement des calculs rénaux.

Les ondes de choc acoustiques sont générées par voie extracorporelle dans un coussin d'eau, puis transmises dans le corps sans blesser la peau. Les ondes de choc sont concentrées dans la zone focale et focalisées à un haut niveau énergétique sur le calcul à désintégrer. Une fois plusieurs milliers d'impulsions déclenchées, le calcul est fragmenté en petites concrétions de la taille de grains de sable pour être évacué par voie naturelle par le rein et l'uretère. Si l'évacuation des particules de calculs s'effectue sans problèmes, aucun séjour à l'hôpital n'est nécessaire, ou alors très court.

Cette méthode thérapeutique présente l'avantage de ne pas nécessiter d'anesthésie générale (il suffit d'administrer un sédatif) et n'a pas d'effets secondaires significatifs.

3.3.2 Seringue sans aiguille

Un certain nombre de personnes redoutent l'usage de seringues en raison de la douleur qu'elles provoquent et des craintes de contamination. En plus d'offrir des injections sans douleur, ce type d'appareil permettrait éventuellement de vacciner de 100 à 1000 fois plus de patients avec une même quantité de solution liquide.

a) Procédé

La peau est composée de trois couches : le stratum corneum, l'épiderme et le derme. Le procédé de la seringue sans aiguille consiste en un minicanon utilisant un gaz (l'hélium) pour injecter à très haute vitesse (environ 1 km/s), une médication liquide ou solide dans l'épiderme. L'injection cutanée ciblée se caractérise également par l'élimination de la douleur associée aux aiguilles. En effet, les cellules nerveuses responsables de la douleur se retrouvent dans le derme et la douleur générée par les aiguilles conventionnelles est occasionnée par la profondeur de l'injection qui atteint ce derme. L'endroit



idéal pour injecter un vaccin est donc localisé sous l'épiderme où se retrouvent de fortes concentrations de cellules dendritiques.

b) Conséquences

Si le vaccin est injecté au bon endroit, il nécessitera un dosage moindre, ce qui avantagera les nouvelles générations de vaccins à base d'ADN, qui sont très coûteux.

c) Exemple concret de seringue (proposé par le laboratoire Crossject)

Le laboratoire Crossject utilise un nouveau procédé technologique pour éviter de stresser les tissus comme l'ancienne génération de seringue sans aiguille. En effet, cette technologie permet de réaliser des lois de pression adaptables aux besoins thérapeutiques. Cela signifie que la pénétration et la répartition du médicament peuvent être adaptées à la profondeur requise : dans la peau, sous-cutanée ou intramusculaire.

Dès que la pression est créée, les médicaments sont propulsés à l'extérieur de la "seringue" via de petits orifices. Leur nombre, leur dimension (de 100 à 300 microns) et leur forme peuvent être ajustés selon la quantité et la viscosité du produit à injecter. Ensuite, la pénétration complète du produit est suivie par une seconde action plus lente qui permet de répartir uniformément le produit à la profondeur requise.

3.3.3 Les ondes de choc utilisées à des fins esthétiques.

La thérapie par onde de choc a de nombreuses applications, en voici une surprenante.

Liporéduction

La liporéduction par ondes de choc est une technique visant à détruire une partie des cellules graisseuses dans une zone touchée par la cellulite. Pour cela, on applique sur la peau un émetteur d'ondes de choc qui vont agir jusqu'à plusieurs centimètres de profondeur dans la graisse.

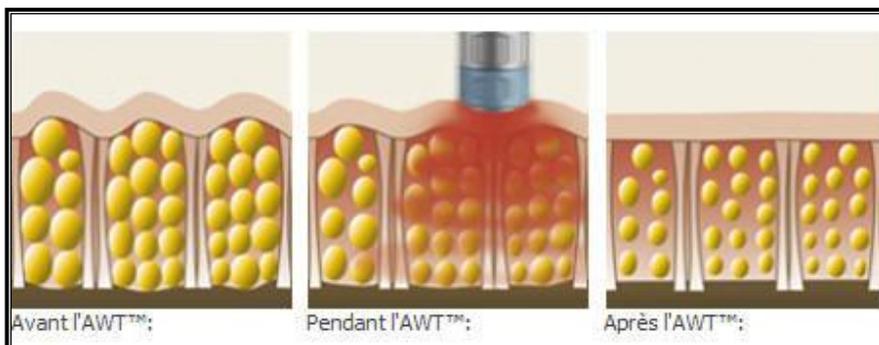


Schéma représentatif de l'évolution de la peau avant et après séance

a) Effets des ondes de choc (ou acoustiques) sur la graisse

i) Effet lipolytique (décomposition des corps gras)

Le traitement par ondes acoustiques vise à :

- Relancer la microcirculation qui est ralentie dans les zones de cellulite.
- Stimuler la lipolyse (vidange des cellules graisseuses hypertrophiées).
- Réduire la fibrose (formation anormale d'un tissu fibreux) et assouplir le tissu conjonctif épaissi de la cellulite.

Ceci entraîne alors une diminution globale de volume et à une amélioration de la qualité de la peau (moins de peau d'orange).

ii) Effet adipolytique : destruction des cellules graisseuses

Ici on cherche à rompre la membrane des cellules, libérant les corps gras qui vont diffuser hors de la zone. Pour cela, on associe une infiltration de la graisse préalable, à l'aide d'un mélange médicamenteux par micro-injections ou bien d'une solution de sérum physiologique destinée à améliorer la conduction des ondes acoustiques qui délivrent alors beaucoup plus d'énergie dans la graisse pour détruire les adipocytes (cellules graisseuses).

b) Résultats sur la peau.

Réduction de l'effet peau d'orange et décongestion, assouplissement de la zone.



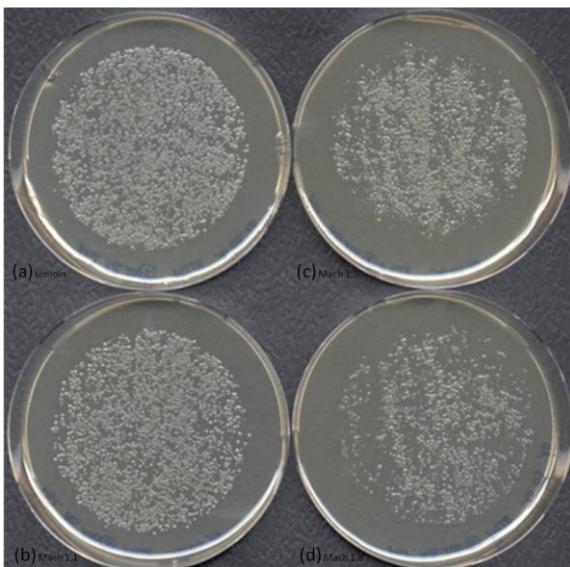
Photo avant/après une séance de liporéduction

3.3.4 Ondes de choc sur les organismes vivants

a) Sur les micro-organismes

Au sein de l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels des biochimistes ont commencé à mener des premières campagnes de mesures destinées à mettre en évidence l'influence d'une onde de choc sur une population de bactéries de types levure du boulanger et Escherichia Coli. Les premiers résultats, obtenus avec une population de bactéries Escherichia Coli, sont présentés sur la Figure ci-dessous. Cette expérience illustre le processus de destruction d'une onde de choc unique sur un micro-organisme vivant.

Populations de bactéries Escherichia Coli



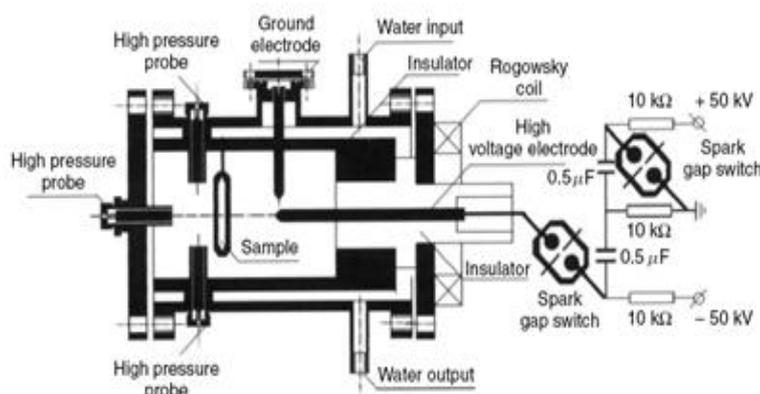
- (a) échantillon témoin,
- (b) soumis à une onde de choc de Mach 1,1.
- (c) soumis à une onde de choc de Mach 1,5,
- (d) soumis à une onde de choc de Mach 1,8.

Sur la figure ci-contre nous voyons clairement que le nombre de colonies présentes est moins important sur l'échantillon ayant été soumis à la plus forte onde de choc. Cependant toutes les bactéries ne sont pas encore détruites, mais ces résultats sont encourageants.

b) Effets des ondes de choc pulsées sur l'activité du poly phénol oxydase, alcaline phosphatase.

i) Système « Benchtop »

H Zuckerman, YaE Krasik, J Felsteiner



Le système « Benchtop » est un système très complexe comme on peut le voir ci-dessous, son fonctionnement n'est pas évident. Pour résumer, celui-ci consiste à projeter du plasma sous l'eau à très grande vitesse, il en résulte alors des ondes de choc pulsées.

[D'après un article dans "journal of the science of food and agriculture" de 2004 faisant état des recherches de H.Zuckerman, Yae Krasik, J Felsteiner, chercheurs israéliens.]

ii) Effets ondes de choc pulsées

Des ondes de choc pulsées générées avec un système « benchtop » (construit dans leur laboratoire) semblent avoir du potentiel pour la préservation des aliments, de produits pharmaceutiques et des cosmétiques. En effet, ces ondes peuvent inactiver des micro-organismes et des enzymes, protéine catalysant une réaction chimique, sans chauffer. L'inactivation de certaines enzymes intéresse car elles sont responsables de la dégradation plus ou moins rapide des aliments.

iii) Expérience

Ce laboratoire a fait un rapport qui présente les effets des ondes de choc sur :

- Poly phénol oxydase qui est relié à la qualité de l'aliment puisqu'elle oxyde de nombreux phénols présents dans les fruits et légumes provoquant des changements comme le brunissement de l'aliment.

- Alcaline phosphatase, qui est une enzyme présente par exemple dans le lait cru et responsable de la flore pathogène.

Leurs résultats indiquent que l'application répétée d'ondes de choc à ces enzymes à 4° était capable de réduire l'activité des enzymes en question. Par ailleurs à température ambiante seules quelques millisecondes suffisent pour affaiblir l'activité enzymatique.

Les chercheurs ont observé que la vitesse de réduction de l'activité enzymatique de poly phenol oxydase était affectée par le nombre d'ondes de choc appliquées et suit une relation exponentielle de type

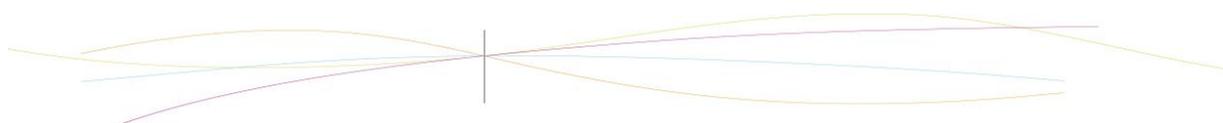
$$A = A_0 \exp(-kt)$$

t= nombre d'ondes de choc appliquées

A= activité de l'enzyme après t pulsions

A₀= activité enzymatique initial

K= constant de vitesse ou index d'inactivation



Par exemple, lorsque les chercheurs appliquent 8 pulsions d'ondes de choc, l'activité de poly phenol oxydase réduit de 35%. D'autre part cette réduction persiste 5 jours après le traitement.

iv) Comment les ondes de choc réduisent l'activité de l'enzyme ?

Avec les ondes de choc envoyées sur l'enzyme, la configuration spatiale du site actif de l'enzyme est modifié, l'enzyme ne peut plus se connecter aux molécules pour accélérer la réaction chimique conduisant à la dégradation du fruit par exemple.

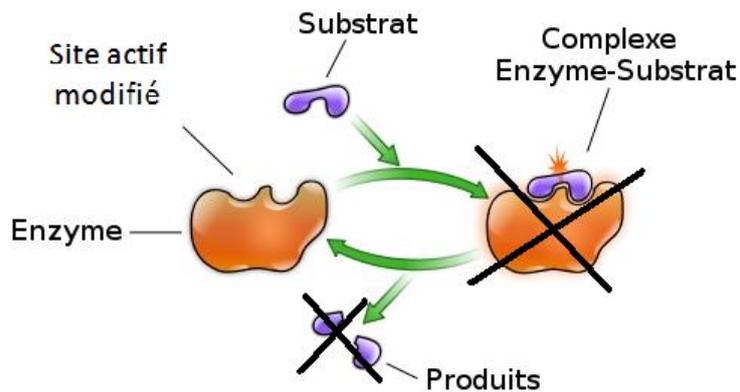
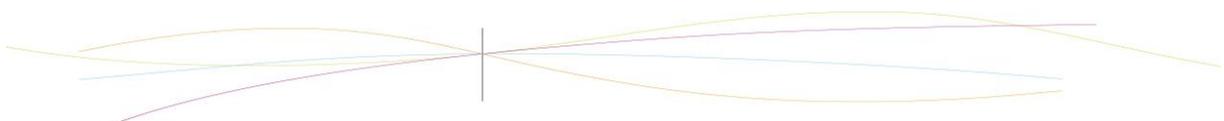


Schéma du complexe enzyme/substrat

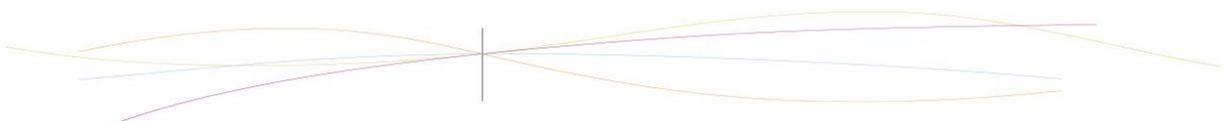


4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En somme, qu'avons-nous compris grâce à ce projet ?

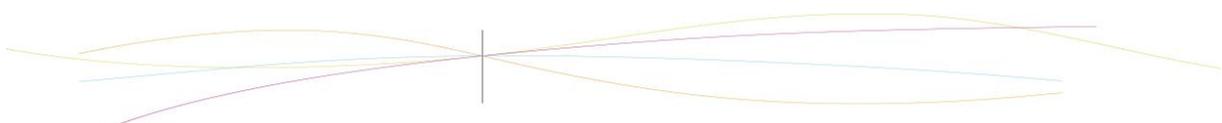
Ce projet a su donné un sens physique du phénomène « onde de choc » au groupe. Nous savons maintenant que nous pouvons exprimer mathématiquement toutes les caractéristiques physiques des ondes hydrodynamiques, mais nous avons aussi pris conscience de la complexité de ces calculs qui font notamment intervenir l'algèbre tensorielle. On peut alors imaginer la complexité des calculs relatifs aux ondes de choc plus générales, notamment les ondes de chocs dites magnétohydrodynamiques.

Par ailleurs, nous retenons l'existence de nombreuses applications des ondes de choc dans l'univers. Ces dernières participent à la formation des étoiles, et peuvent être créées par de nombreux phénomènes tels que les éruptions solaires, les jets collimatés supersoniques, les collisions entre météorites et les planètes. Nous avons également découvert comment ces ondes peuvent être maîtrisées par l'Homme et avoir des applications thérapeutiques et même nutritionnelles. En effet, les ondes de choc s'avèrent très efficaces dans le traitement des pathologies musculo-squelettique et la destruction des calculs rénaux. De plus, ces ondes présentent un réel potentiel dans la préservation des fruits, des légumes et des produits pharmaceutiques étant donné les récentes recherches que nous avons pu étudier. Ainsi, les ondes de choc (parfois destructrices) sont aussi bénéfiques au genre humain.

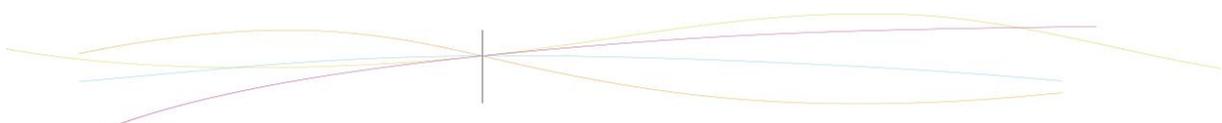


5. BIBLIOGRAPHIE

- IUSTI (Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels),
<http://iusti.univ-provence.fr/document.php?pagendx=11448&project=iusti> (valide au 10/06/11)
- « Guide d'évaluation des incidences des projets d'extraction de matériaux en mer sur les sites Natura 2000 »
http://www.natura2000.fr/IMG/pdf/couv_et_doc_analyse_p37_a_p157_reduire.pdf (valide au 10/06/11)
- « La thérapie par ondes de choc »
<http://www.medecinedusport.be/revalidationswt.htm> (valide au 10/06/11)
- « Qu'est-ce qu'une thérapie par ondes de choc »
http://www.shockwave-france.com/ondes_physique.php (valide au 10/06/11)
- « Thérapie par ondes de choc radiales »
<http://marathon-et-duathlon.blogspot.com/2009/04/therapie-par-ondes-de-choc-radiales.html> (valide au 10/06/11)
- « Thérapie par ondes de choc »
<http://www.btlmed.fr/mf/therapie-par-ondes-de-choc/> (valide au 10/06/11)
- Pêches et océans Canada, « Dynamitage – Protection du poisson et de son habitat » site web <http://www.nfl.dfo-mpo.gc.ca/f0005460> (valide au 10/06/11)
- Association française de médecine morpho-esthétique et anti-âge « liporeduction et adipolyse par ondes de choc »
<http://www.afme.org/silhouette-amincissement/ondes-de-choc-cellulite.htm> (valide au 10/06/11)
- http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_activite-solaire/so-masse-coronale.html
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=6634>
- http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/astrophysique-amusante-des-jets-supersoniques-dans-la-cuisine_22278/
- <http://www.larecherche.fr/content/actualite/article?id=17991>
- http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_interstellaire/impression.html
- <http://www.nmdb.eu/?q=node/338>
- <http://www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=6102>
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=8171>
- <http://www.diffusion.ens.fr/index.php?res=conf&idconf=2568>



- http://fr.wikipedia.org/wiki/Nombre_de_Mach
- http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quation_de_Rankine-Hugoniot
- <http://www.universalis.fr/encyclopedie/derivees-partielles-equations-aux-equations-non-lineaires/>
- <http://www.lecosmographe.com/blog/?tag=volcan>
- <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3285>
- <http://antigravity.over-blog.com/article-etrange-origine-des-electrons-a-2-mev-dans-la-magnetosphere-63977644.html>
- <http://www2.cnrs.fr/journal/4052.htm>
- <http://www.odysseespace.fr/supernovae.php>
- <http://www.astrosurf.com/macombes/chapitre%2011-me.htm>
- <http://www.brgm.fr/brgm/divers/rochecho1.htm>
- <http://www.brgm.fr/brgm/divers/rochecho1.htm>
- <http://pst.chez-alice.fr/svtiufm/seismes.htm>
- http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/news/10-110.html
- <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=38985>
- http://rphysap.journaldephysique.org/index.php?option=com_article&access=dkey&dkey=10.1051/rphysap:019880023090153500&lang=en&Itemid=
- <http://www-spod.gsfc.nasa.gov/Education/Fwbirthrb.html>
- <http://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/magnetosphere-ionosphere/>
- <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/639-scruter-la-magnetosphere-terrestre.php>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Structure_de_la_magn%C3%A9tosph%C3%A8re.svg
- Ph. CHEVREMONT Une météorite en France (Pour la Science 1993)
- J et W.D. KAVASCH The Ries Météorite Crater (éd. anglaise 1986) Ries Krater Museum Nördlingen
- Ph. LAMBERT La structure impactique de ROCHECHOUART. Effet des ondes de choc (Thèses 1974 et 1977)
- E. RAGUIN Les impactites de ROCHECHOUART (Bulletin du B.R.G.M. (2eC série) section

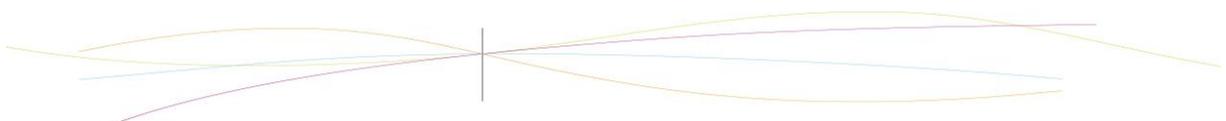


1, N⁰3 - 1972)

- w. v. STOFFLER Petrologische Untersuchungen im Ries (Géologica Bavaria, 61; München 1969)

- S. VICHNEVSKII (1991) The Popigai astroblema (non publiée) Branche Sibérienne de l'Académie des Sciences Novosibirsk (Sibérie)

-Thèse de Vincent Guillet (09-07-2008) sur l'évolution des poussières dans les choc (Université de Paris Sud 11)



6. ANNEXE : PROGRAMME DE LA REPRODUCTION DU SIMULATEUR DE LA NASA.

```

import java.awt.*;
import javax.swing.*;
import java.awt.event.*;
import java.lang.*;

public class simulateur
{
    public static void main(String []args)
    {
        Fenetre f=new Fenetre();
    }
}

class Fenetre extends JFrame
{
    public Fenetre()
    {
        super("Simulateur Ondes de Choc");
        setBounds(250,400,700,200);
        setDefaultCloseOperation(EXIT_ON_CLOSE);
        getContentPane().add(new Panneau());
        setVisible(true);
        setBackground(Color.blue);
    }
}

class Panneau extends JPanel
{
    private JButton calculer= new JButton("Calculer");

    private JTextField mach1=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField beta=new JTextField("0.00", 5);

    private JTextField rapport_vitesses=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField rapport_masses_volumiques=new JTextField("0.00",
5);

    private JTextField rapport_pressions=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField rapport_temperatures=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField mach2=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField angle_deflexion=new JTextField("0.00", 5);
    private JTextField variation_enthalpie=new JTextField("0.00", 5);

    private JLabel explication= new JLabel("Entrez la valeur du nombre
de mach
avant le choc et l'angle d'inclinaison du front d'onde de choc");
    private JLabel u2_sur_u1= new JLabel("u2/u1");
    private JLabel p2_sur_p1= new JLabel("p2/p1");

```

```

private JLabel rho2_sur_rho1=new JLabel("rhô2/rhô1");
private JLabel t2_sur_t1= new JLabel("T2/T1");
private JLabel m1= new JLabel("M1");
private JLabel m2= new JLabel("M2");
private JLabel h2_moins_h1= new JLabel("h2-h1");
private JLabel theta= new JLabel("Angle de deflexion theta (°)");
private JLabel bet= new JLabel("Beta (°)");
private JLabel erreur1= new JLabel("");
private JLabel erreur2= new JLabel("");

public Panneau()
{
    calculer.addActionListener(new Ecouteur1());

    add(explication);
    add(m1);
    add(mach1);
    add(bet);
    add(beta);
    add(u2_sur_u1);
    add(rapport_vitesses);
    add(p2_sur_p1);
    add(rapport_pressions);
    add(rho2_sur_rho1);
    add(rapport_masses_volumiques);
    add(t2_sur_t1);
    add(rapport_temperatures);
    add(h2_moins_h1);
    add(variation_enthalpie);
    add(m2);
    add(mach2);
    add(theta);
    add(angle_deflexion);
    add(erreur1);
    add(erreur2);
    add(calculer);
}

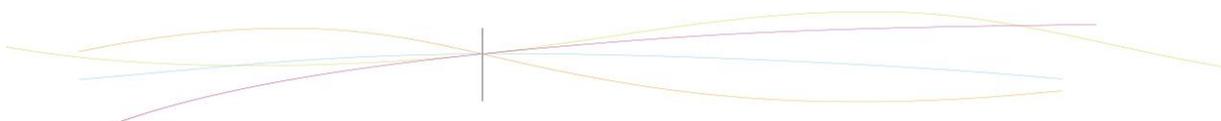
class Ecouteur1 implements ActionListener
{
    public void actionPerformed(ActionEvent event)
    {
        double
m=0,b=0,rap_vit=1,rap_vit_norm=1,rap_mv=1,rap_p=1,rap_t=1,m_aval=0,var_h=0,
angle=0,y=7.0/5.0;

        erreur1.setText("");
        erreur2.setText("");

        m = Double.parseDouble(mach1.getText());
        b = Double.parseDouble(beta.getText());

        if(b<=0 || b>90)
        {
            erreur2.setText("Erreur! Veuillez
rentrer un angle
d'inclinaison du front d'onde compris entre 0 et 90°.");
            rap_vit=0;

```



```

rap_mv=0;
rap_p=0;
rap_t=0;
}

if(m<0)
{
    erreur1.setText("Erreur! Veuillez un
nombre de mach positif");
    rap_vit=0;
    rap_mv=0;
    rap_p=0;
    rap_t=0;
}

else if(m<1 && m>0 && b>0 && b<=90)
{
    erreur1.setText("Pas de choc.");
    m_aval=m;
}

else if(m==0 && b>0 && b<=90)
{
    erreur1.setText("Pas de choc.");
    rap_vit=0.0;
    m_aval=m;
}

else if(m >= 1 && b>0 && b<=90)
{
    b=b*3.14116/180.0;

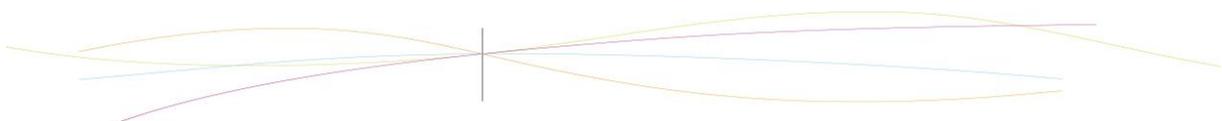
    rap_vit_norm=((y-
1)*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b)+2)/((y+1)*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b));
rap_vit=Math.sqrt((rap_vit_norm*rap_vit_norm-1)*Math.sin(b)*Math.sin(b)+1);
rap_mv=1.0/rap_vit_norm;

rap_p=1.0+(2*y)/(y+1)*(m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b)-1);
rap_t=(2+(y-
1)*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b))*(2*y*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b)+1-
y)/((y+1)*(y+1)*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b));
var_h=Math.log(rap_p)-
y*Math.log(rap_mv);
angle=b-
Math.acos(Math.cos(b)/rap_vit);
m_aval=1.0/Math.sin(b-
angle)*Math.sqrt((2+(y-
1)*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b))/(2*y*m*m*Math.sin(b)*Math.sin(b)+1.0-y));

angle= angle*180.0/3.14116;

rap_vit=1.0/100*Math.round(100*rap_vit);

```



```

rap_vit_norm=1.0/100*Math.round(100*rap_vit_norm);
rap_mv=1.0/100*Math.round(100*rap_mv);
rap_p=1.0/100*Math.round(100*rap_p);
rap_t=1.0/100*Math.round(100*rap_t);
var_h=1.0/100*Math.round(100*var_h);
angle=1.0/100*Math.round(100*angle);

m_aval=1.0/100*Math.round(100*m_aval);
    }

    rapport_vitesses.setText(String.valueOf(rap_vit));

rapport_masses_volumiques.setText(String.valueOf(rap_mv));
rapport_pressions.setText(String.valueOf(rap_p));
rapport_temperatures.setText(String.valueOf(rap_t));
variation_enthalpie.setText(String.valueOf(var_h));
angle_deflexion.setText(String.valueOf(angle));
mach2.setText(String.valueOf(m_aval));
    }
}
}

```

