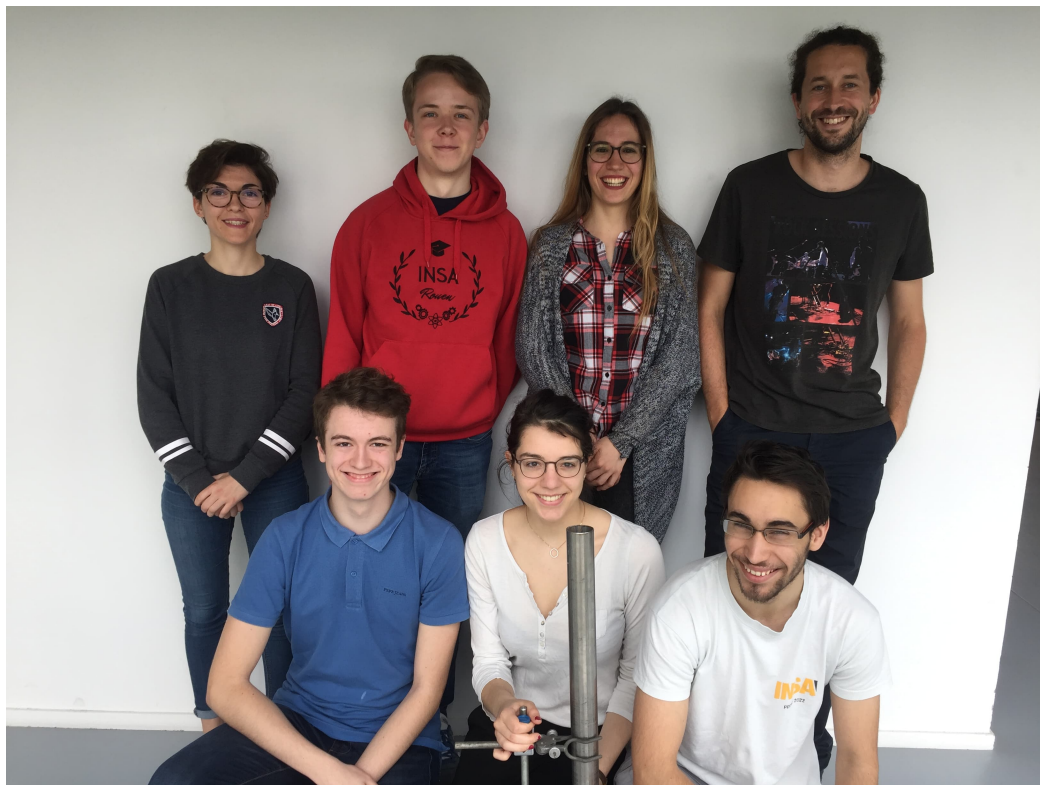


## Tube de Rijke : instabilités thermoacoustiques



### Étudiants :

Baptiste BUREL  
Laly DONNIER-VALENTIN  
Pauline GAUDET  
Pierre MILLET  
Catheline PARISOT  
Benoît VILLARD

### Enseignant-responsable du projet :

KÉVIN BIOCHE



**Date de remise du rapport :** 17/06/2019

**Référence du projet :** STPI/P6/2019 – n°34

**Intitulé du projet :** Tube de Rijke : instabilités thermoacoustiques

**Type de projet :** Expérimental (Tube de Rijke) et bibliographique (Instabilités thermoacoustiques).

**Objectifs du projet :**

- Étude bibliographique de la thermoacoustique (appréhension de l'idée, recherche historique, domaines d'application et intérêts) ;
- Compréhension des phénomènes physiques : les instabilités thermoacoustiques (explication du terme, machines thermoacoustiques, problèmes liés à ces phénomènes, mise en équation et critère de Rayleigh) ;
- Application à travers un exemple : le tube de Rijke (fonctionnement et mécanisme, analyse des phénomènes thermoacoustiques mis en jeu) ;
- Réalisation d'une expérience : construction d'un tube de Rijke (dimensionnement et cahier des charges, réalisations des composants, mise en œuvre expérimentale, exploitation des résultats).

**Mots-clés du projet :** instabilité thermoacoustique, machine thermoacoustique, critère de Rayleigh, tube de Rijke

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Organisation du travail</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1 Etude des instabilités thermoacoustiques</b>  | <b>5</b>  |
| 1.1 La thermoacoustique . . . . .  | 5         |
| 1.2 Les machines thermoacoustiques . . . . .   | 5         |
| 1.2.1 Les réfrigérateurs thermoacoustiques . . . . .   | 5         |
| 1.2.2 Les moteurs thermoacoustiques . . . . .  | 6         |
| 1.3 Les problèmes et applications liés à la thermoacoustique . . . . .   | 7         |
| 1.3.1 Les problèmes . . . . .  | 7         |
| 1.3.2 Les applications . . . . .   | 7         |
| 1.4 Les instabilités thermoacoustiques au sein de tube de Rijke . . . . .  | 8         |
| 1.4.1 Équations linéarisées associées . . . . .  | 8         |
| 1.4.2 Instabilités auto-entretenuës thermoacoustiques . . . . .  | 9         |
| <b>2 Le tube de Rijke</b>  | <b>11</b> |
| 2.1 Présentation du tube . . . . .   | 11        |
| 2.2 Mécanisme du tube . . . . .  | 11        |
| 2.3 Le stack . . . . .   | 12        |
| 2.4 Les instabilités thermoacoustiques dans le tube de Rijke : (cas d'un système composé d'une flamme et d'un stack) . . . . . | 13        |
| <b>3 Construction du tube de Rijke</b>   | <b>15</b> |
| 3.1 Cahier des charges . . . . .   | 15        |
| 3.2 Protocole de construction du tube de Rijke . . . . .   | 16        |
| 3.2.1 Protocole initialement prévu . . . . .   | 16        |
| 3.2.2 Protocole réellement réalisé . . . . .   | 18        |
| 3.3 Expérience . . . . .   | 19        |
| <b>Conclusion et perspectives</b>  | <b>20</b> |
| <b>Annexes</b>   | <b>23</b> |

# Introduction

Dans le cas de nombreuses sciences, les observations expérimentales ainsi que la création et l'amélioration de technologies se sont développées bien avant que l'on comprenne les faits fondamentaux de cette discipline. L'effet thermoacoustique est observé pour la première fois dans les premiers siècles avant J-C par les souffleurs de verre Phéniciens et Babyloniens [4]. En effet, les verres émettaient des sifflements lorsque les verriers commençaient à les chauffer pour pouvoir les souffler.

Les recherches en thermoacoustique, datant du 18ème siècle, se sont tournées vers les transferts de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi solide soumise à un fort gradient de chaleur. Une étude quantitative est menée par Sondhauss en 1850 sur un tube ouvert à une seule extrémité et chauffé. Il remarque que la fréquence du son engendrée par ce chauffage du tube dépend du dimensionnement de ce dernier (longueur, diamètre. . .) [14].

Un des premiers scientifiques à faire l'observation d'un phénomène thermoacoustique est Byron Higgins en utilisant une flamme placée au sein d'un résonateur créant une oscillation acoustique. C'est en 1859 que le professeur de physique Rijke découvre qu'il peut produire un son grâce à une source de chaleur ainsi qu'un tube ouvert aux extrémités. Il réalise cette expérience en en modifiant les paramètres (longueur du tube, type de chauffage, matière de la gaze. . .) afin de trouver les meilleures conditions pour produire du son [14].

Les premiers savants ayant cherché à expliquer le phénomène thermoacoustique de manière quantitative et qualitative dans sa version la plus générale sont Kirchhoff et Rayleigh. Le principe du tube de Sondhauss est expliqué par le critère de Rayleigh qui rend compte des instabilités thermoacoustiques engendrées dans un tel système. Dans les années 1960, des chercheurs comme Kramers et Rott établissent une modélisation de la thermoacoustique avec notamment des calculs précis concernant la température de déclenchement des instabilités et des travaux sur la couche limite de l'onde sonore [14].

Aujourd'hui, les intérêts de la thermoacoustique sont nombreux mais sont surtout motivés par la production d'énergie. Les machines thermoacoustiques par leur simplicité mécanique et leur type de fonctionnement permettraient de créer de l'énergie de façon fiable et respectueuse de l'environnement. Les espérances de certaines industries se tourneraient vers la fabrication de machines non polluantes (gaz inertes), simples en terme de mécanique, sans nuisance sonore (pas de pièces mobiles) et alimentées par une puissance sonore qui pourrait provenir de l'énergie solaire (panneaux photovoltaïques par exemple) [4].

Le but de notre projet est de comprendre les grands principes de la science de la thermoacoustique et d'appréhender les phénomènes d'instabilités s'y rapportant. Pour cela nous présenterons les instabilités thermoacoustiques dans leur généralité puis nous nous intéresserons à une application directe de ces effets à travers l'exemple du tube de Rijke, dans le but d'en réaliser un.

# Organisation du travail

Pour commencer, ne connaissant pas le domaine, nous avons tous réalisé des recherches bibliographiques afin de comprendre un peu mieux ce dont il était question. Après avoir compris les grandes idées du domaine scientifique de la thermoacoustique, nous nous sommes axés sur des points plus précis, en accord avec notre projet. 3 groupes de 2 se sont alors formés et chacun a fait des recherches sur un sujet précis. Le premier groupe a travaillé sur les généralités de la thermoacoustique, son histoire, les définitions des mots de base importants, ainsi que les machines thermoacoustiques. Le deuxième a étudié plus en détail les instabilités thermoacoustiques, leur mise en équation mathématique et donc les relations mathématiques entre les différentes variables. Le troisième groupe s'est quant à lui concentré sur le fonctionnement du tube de Rijke, sa composition, ainsi que son lien avec le critère de Rayleigh très important à sa compréhension.

Suite à cela et après plusieurs mises en communs, nous avons synthétisé nos recherches et concordé celles-ci avec notre plan. Après avoir commencé à rédiger séparément les parties que nous avons étudiées et les avoir réunies dans une première version de rapport, nous nous sommes concentrés sur la réalisation de notre tube de Rijke, la finalité du projet. Nous avons alors passé plusieurs cours à mettre en œuvre tous les éléments nécessaires pour sa réalisation, en commençant par des calculs théoriques et une étude des matériaux adaptés, puis une partie plus expérimentale pour la construction comme la réalisation de la bobine de fil résistif et la structure de mica.

Pour finir, tout le travail restant (comme la rédaction de la conclusion, la réalisation de la présentation, la mise en page du rapport, la création de l'affiche) ont été réparti équitablement entre les membres du groupe puis mis en commun de nouveau au fur et à mesure pour aboutir à ce rapport.

# Chapitre 1

## Etude des instabilités thermoacoustiques

### 1.1 La thermoacoustique

La thermoacoustique combine deux domaines physiques vastes : la thermodynamique et l'acoustique. [24] Le premier est la science de la chaleur et des machines thermiques. Il comprend l'étude des systèmes très simples comme une bougie ou de l'eau dans une casserole chauffée mais aussi des systèmes plus complexes comme les locomotives à vapeur ou des réacteurs d'avion. Le second correspond à l'étude des ondes sonores. Un son est défini [23] comme la vibration d'un fluide (par exemple l'air) qui se propage sous forme d'ondes longitudinales. L'air étant un milieu fluide compressible, l'onde se matérialise par une variation de pression qui se propage. Chaque son possède une fréquence propre, un timbre. La fréquence d'un son se mesure en Hertz (Hz); celle-ci permet de déterminer la nature du son. Ce dernier peut être un infrason ( $< 16\text{Hz}$ ), un ultrason ( $> 20\text{kHz}$ ) ou même un hyperson ( $> 1\text{GHz}$ ). L'oreille humaine ne perçoit que les sons dont la fréquence se situe entre 16Hz (son grave) et environ 15kHz (son aigu).

Ainsi, la thermoacoustique [17] est en fait l'étude des machines capables de convertir la chaleur en son et le son en chaleur. On appelle celles-ci respectivement les machines thermoacoustiques réfrigérateurs (où le son devient de la chaleur) et moteurs (où la chaleur devient du son).

### 1.2 Les machines thermoacoustiques

Les machines thermoacoustiques sont composées d'un résonateur acoustique [8] qui a le rôle de guide d'onde [14]. C'est très souvent un long tube [3] qui permet l'effet de résonance nécessaire au fonctionnement de la machine. La résonance est le principe selon lequel un système absorbe de l'énergie en présence d'oscillations soumises à une fréquence bien précise [22]. À l'intérieur du résonateur peut se trouver un stack (une structure poreuse) dont le rôle est de faciliter l'installation d'instabilités. Enfin on dispose en entrée ou en sortie, un récepteur ou une source d'ondes sonores suivant la nature de la machine (moteur ou réfrigérateur) [8].

#### 1.2.1 Les réfrigérateurs thermoacoustiques

Les échanges de chaleur dans une machine réfrigérateur peuvent être schématisés ainsi :

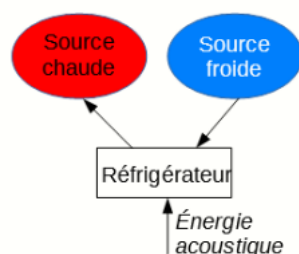


FIGURE 1.1 – Schéma des échanges thermiques dans une machine réfrigérateur [8]

Dans un réfrigérateur, [14, 8] un transfert de chaleur d'une source froide vers une source chaude se produit, il y a donc un déficit d'énergie, qui est comblé par un apport de travail, sous forme d'énergie acoustique. Dans les réfrigérateurs acoustiques, on place à l'extrémité du résonateur une source d'ondes sonores. Chaque onde envoyée

par la source subit un cycle bien précis [3, 8]. En effet, l'onde étant réfléchiée dans le résonateur, elle effectue plusieurs passages dans la machine et entraîne avec elle des particules de gaz. On peut matérialiser les sources chaudes et froides par des échangeurs, les particules de gaz, entraînées par l'onde, ont alors un mouvement de va-et-vient entre les deux échangeurs. La particule, en se déplaçant vers la source chaude, subit une compression qui fait augmenter sa température. Arrivée à l'échangeur, la particule transmet cette chaleur, puis repart dans l'autre sens en effectuant une dilatation et donc un abaissement de température. Arrivée à la source froide, elle pompe de la chaleur dans celle-ci pour de nouveau repartir. La présence du stack amplifie ce phénomène. Steven Garrett, un chercheur américain explique cela de manière très simple : « Tout se passe comme si une rangée de pompiers volontaires se passait des seaux d'eau pour éteindre un incendie ». Un schéma peut aussi aider à mieux comprendre le principe :

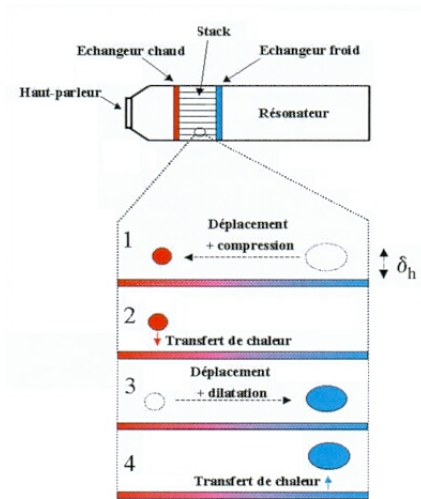


FIGURE 1.2 – Représentation des transformations du gaz dans un réfrigérateur thermoacoustique [8]

## 1.2.2 Les moteurs thermoacoustiques

Les échanges de chaleur dans une machine moteur peuvent être schématisés ainsi :

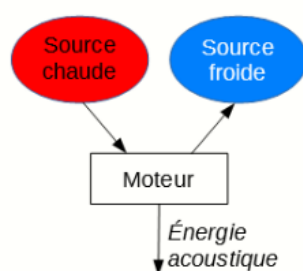


FIGURE 1.3 – Schéma des échanges thermiques dans une machine moteur [8]

On chauffe cette fois-ci l'extrémité du résonateur. [14] Le gaz dans le résonateur subit aussi un cycle, au niveau de la partie plus froide du tube : les particules de gaz se déplacent petit à petit vers la partie chaude, ce qui entraîne une compression. Arrivées dans la partie chaude, et lorsqu'elles sont le plus comprimées, les particules de gaz récupèrent de la chaleur. Elles repartent dans l'autre sens et subissent une dilatation. De même, lorsqu'elles arrivent vers la partie froide et qu'elles sont le plus dilatées, elles relâchent la chaleur emmagasinée. Les ondes sonores sont alors dues à la conversion d'une partie de la chaleur portée par la particule lors de son mouvement, en énergie acoustique. Le cycle de la particule peut être représenté dans un diagramme de Clapeyron, de manière théorique (b) et en s'approchant de la réalité (c) :



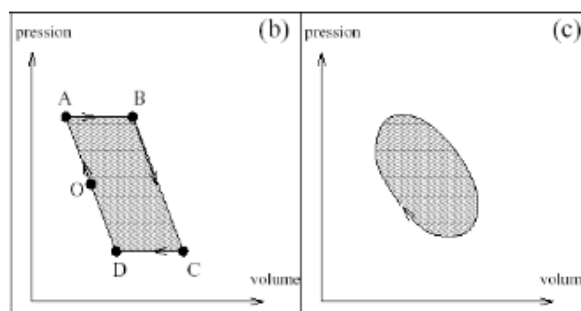


FIGURE 1.4 – Diagramme de Clapeyron d'une particule de gaz dans un moteur thermoacoustique [14]

## 1.3 Les problèmes et applications liés à la thermoacoustique

Comme nous l'avons dit, les phénomènes thermoacoustiques ont été d'abord observés par les souffleurs de verre qui ont été les premiers témoins de la production de son par un tube chauffé à une de ses extrémités. Au cours du temps et avec des recherches, les instabilités thermoacoustiques ont été la source de nombreuses applications mais aussi de difficultés de construction et de mises au point inattendues.

### 1.3.1 Les problèmes

En effet, des engins comme les jets, moteurs rockets, les turbines à gaz ou les chambres de combustion à impulsion sont susceptibles de produire des oscillations thermoacoustiques non désirées [2]. De fortes pressions associées à ces instabilités peuvent mener à une surchauffe de l'engin et à des vibrations renforcées, ce qui peut diminuer l'efficacité de la propulsion de l'engin par exemple. Cela pourrait même théoriquement entraîner son autodestruction. Il est donc primordial de ne pas négliger l'étude de ce phénomène, dans ce domaine ou d'autres.

Les instabilités thermoacoustiques peuvent aussi poser problème dans le domaine cryogénique [5]. Lors de la construction d'un cryostat, certains composants, qui ne peuvent pas toujours être substitués, peuvent mener à l'apparition d'instabilités notamment lors de la présence d'hélium dans la machine. Il est alors du choix de l'ingénieur de retirer ce composant ou de le garder mais de dépenser plus afin de réduire les flux thermiques éventuels.

### 1.3.2 Les applications

À l'inverse, des chercheurs ont réussi à exploiter ce phénomène afin de créer des applications intéressantes tirant profit des instabilités thermoacoustiques. Nous connaissons l'application que nous allons étudier dans ce projet qui est le tube de Rijke, mais ce tube qui produit un son lorsqu'on le chauffe est loin d'être la seule application possible.

[3] On trouve dans le domaine réfrigérateur une manière d'exploiter les instabilités thermoacoustiques. Des machines qui peuvent descendre à des températures inférieures à 60K et dont la puissance peut atteindre les 2kW sont aujourd'hui en marche et on espère pouvoir exploiter cette nouvelle technologie à plus grande échelle par exemple avec le projet entre le laboratoire de Los Alamos et le gazier Praxair. Le but est de créer une machine hybride capable de liquéfier du méthane, ce qui nécessite une température de 164°C à la pression atmosphérique et une puissance réfrigérante de l'ordre de 7kW.

Un autre projet a tenté d'exploiter les propriétés réfrigérantes des machines thermoacoustiques. Le projet STAR a installé un réfrigérateur thermoacoustique dans la navette Discovery, envoyée dans les airs en 1984 [21]. Ce réfrigérateur servait de conteneur pour les échantillons de sang et d'urine des astronautes. Il fonctionnait à l'aide d'un mélange gazeux d'hélium et d'argon à 10 bars placé dans un résonateur. Il fut préféré à un réfrigérateur « classique » car il ne produisait que peu de vibrations, ce qui aurait pu avoir un impact sur la trajectoire du satellite [3]. En relation avec ce réfrigérateur spatial, le chercheur américain Steven Garrett a mis au point en 2004 un congélateur thermoacoustique pour l'entreprise de crèmes glacées Ben&Jerry[3].

De façon plus anecdotique, dans le domaine artistique, une installation appelée thermophone à bascule (voire ci-dessous) est présentée comme un instrument de musique autant qu'une sculpture [15]. Elle est composée de plusieurs tubes qui peuvent basculer afin de positionner les extrémités face à des chalumeaux et donc de produire une note.

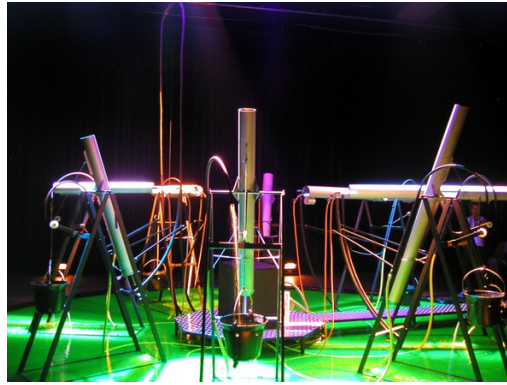


FIGURE 1.5 – Photographie d'un thermophone à bascule [15]

[1, 6] Enfin, une application liée au monde médical est en développement. En effet, le MI-TAT (Microwave-induced thermoacoustic tomography, ou Tomographie de micro-ondes thermoacoustiques induites) est un nouveau système de formation d'image. Il est utile dans la détection par exemple de cancer de la poitrine ou encore de calculs rénaux. Plus particulièrement, certains types de calculs rénaux (calculs d'acide urique) sont invisibles aux rayons X et aux CT (Computed Tomographe ou scanner de tomodensitométrie). La solution utilisée jusqu'ici était les ultrasons mais ceux-ci rendent une image sans contraste et ne détectent pas les petits calculs. Des calculs cachés dans des reins de porc ont été clairement imagés grâce au MI-TAT avec d'excellents contrastes et une bonne résolution. Comme les résultats expérimentaux sont plus que satisfaisants, il est possible d'envisager cette technique dans les années à venir pour des applications cliniques. Elle présente des avantages certains, la méthode est peu coûteuse et efficace, et contrairement à d'autres techniques comme le laser, la pénétration des tissus est très profonde. Elle fonctionne ainsi : on irradie le tissu avec des micro-ondes, puis cette énergie électromagnétique est absorbée à certains endroits du tissu, aux endroits à plus haute conductivité. Cela génère un effet d'expansion thermique (une variation de température dans le temps) et donc un signal thermoacoustique qui est ensuite détecté et traité afin de reconstituer une image.

## 1.4 Les instabilités thermoacoustiques au sein de tube de Rijke

Nous allons maintenant voir plus en détail le phénomène physique que sont les instabilités thermoacoustiques dans un moteur thermoacoustique, le tube de Rijke. [20] Dans le tube de Rijke, les perturbations sont liées à la pression et au dégagement de chaleur.

On considérera dans notre étude, que seules les instabilités linéaires sont présentes. Pour valider ce modèle, détaillons les conditions nécessaires :

- 1) les instabilités sont initiées par un dégagement de chaleur
- 2) la pression en fonction du temps,  $p(t)$ , est une sinusoïde
- 3) les fluctuations de pression par rapport au temps ( $p'(t)$ ) sont inférieures à  $0,1 * \text{pression moyenne dans la chambre}$  (le tube dans notre cas)

Le flux de chaleur dans le tube va engendrer des instabilités et les fluctuations de pression seront considérées très petites face à la pression moyenne au sein du tube. De plus, d'après les résultats expérimentaux de chercheurs comme Konstantin Matveev [12],  $p(t)$  est bien une sinusoïde. On admettra alors un système linéaire décrit par des équations du même type.

### 1.4.1 Équations linéarisées associées

La pression, la masse volumique, la vitesse des particules d'air, ainsi que les fluctuations de chaleur sont des variables ayant 2 composantes : une valeur moyenne couplée avec la fluctuation de cette variable [12].

$$\begin{aligned}
 p(x, t) &= p_0 + p'(x, t) \\
 \rho(x, t) &= \rho_0(x) + \rho'(x, t) \\
 u(x, t) &= u_0(x) + u'(x, t) \\
 \dot{Q}(x, t) &= \dot{Q}_0(x) + \dot{Q}'(x, t)
 \end{aligned}$$

Ces variables nous seront utiles par la suite pour décrire les différents systèmes sujets aux instabilités de combustion.

## 1.4.2 Instabilités auto-entretenues thermoacoustiques

Le critère de Rayleigh est un critère nécessaire à respecter pour que le son se produise, il est donc caractéristique des instabilités acoustiques. Rayleigh montre que la chaleur et les oscillations de pression doivent vibrer en phase. En 1878, dans ses travaux sur la théorie du son, il montre que si de la chaleur est apportée de manière périodique à une masse d'air contenue dans un cylindre, cette masse d'air est alternativement comprimée puis détendue par un piston selon la différence de phase entre la fluctuation de chaleur et l'état du piston. Le son sera maximal si : soit l'air reçoit de la chaleur lors sa plus grande compression, soit celle-ci est extraite lors de sa plus grande détente. A l'inverse, le son est plus faible si : soit la chaleur est extraite lors de la plus grande compression, soit l'air reçoit la chaleur lors de la plus grande détente [16, 12].

Ce critère a ensuite été traduit mathématiquement en 1950 et ce sont les travaux de Putnam et Dennis qui ont permis d'obtenir la relation suivante :

$$\frac{1}{T} \int_T p'(x, t) * q'(x, t) dt$$

Cette intégrale a été obtenue en supposant que les équations d'ondes soient linéaires et que le système soit unidimensionnel, hypothèses que l'on peut supposer pour le tube de Rijke [16, 12].

$Ra(x)$  est l'indice de Rayleigh,  $p'$  est la fluctuation de pression acoustique,  $q'$  est la fluctuation du taux de dégagement de chaleur et  $T$  représente une période d'instabilité acoustique. Si  $Ra(x) > 0$  alors on assiste à une amplification des oscillations de pression, alors qu'à l'inverse,  $Ra(x) < 0$  implique un amortissement des oscillations de pression. Si  $Ra(x) = 0$ , les oscillations ne sont ni amorties ni amplifiées.

Ainsi, pour que le tube de Rijke produise un son, les fluctuations du transfert de chaleur dues aux ondes acoustiques doivent être le plus possible en phase avec la pression acoustique. On peut le visualiser sur la figure suivante :

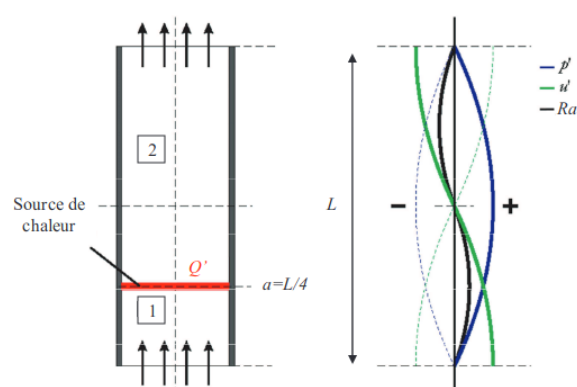


FIGURE 1.6 – Schéma d'un tube Rijke (à gauche) représenté avec la distribution du premier mode de pression et de vitesse et l'indice de Rayleigh correspondant (à droite) en négligeant le délai entre la fluctuation de vitesse et le dégagement de chaleur instationnaire [12]

De plus, le tube de Rijke ne sonne que lorsque la chaleur se situe dans la moitié inférieure du tube, et particulièrement à  $\frac{1}{4}$  du bas du tube. Si on reprend l'équation de base du critère de Rayleigh, il est possible de calculer le maximum du produit de  $p'$  avec  $q'$  qui est atteint pour  $x = \frac{L}{4}$ . Par conséquent, si la source de chaleur est placée à  $\frac{1}{4}$  de la longueur du tube en partant du bas, le critère de Rayleigh sera maximal et donc le son sera le plus intense possible. On peut également montrer que le critère de Rayleigh est négatif lorsque la source de chaleur se situe dans la moitié supérieure du tube [16].

Notons que si le tube est à l'horizontale, le débit moyen ne pouvant plus être maintenu, le tube ne produira plus de son.

Le critère de Rayleigh est une condition nécessaire à l'apparition des instabilités thermoacoustiques mais elle n'est pas suffisante car les éventuelles dissipations de l'énergie acoustique du système ne sont pas prises en compte.

Une autre condition nécessaire pour l'établissement d'une instabilité thermoacoustique auto-entretenue est que l'entraînement de l'instabilité doit être plus grand que la somme des pertes acoustiques. Ces pertes se produisent à travers les parois du tube, ou sont dues à une dissipation visqueuse [20].

En supposant ici de faibles fluctuations de pression et un écoulement non visqueux, cela conduit au critère de Rayleigh étendu :

$$\int_0^T \int_V p' q' dV dt > \int_0^T \int_S p' u' \cdot n dS dt$$

Le côté gauche de l'inégalité ci-dessus est appelé gains, et le côté droit, pertes.  $n$  est un vecteur normal à la surface. Le côté gauche représente le couplage entre les fluctuations de dégagement de chaleur et les fluctuations de pression acoustique, et le côté droit représente la perte d'énergie acoustique aux limites du tube.

Si le critère de Rayleigh est supérieur à 0, alors les fluctuations de pression sont amplifiées tant que :

$$\int_0^T \int_V p' q' dV dt > \int_0^T \int_S p' u' \cdot n dS dt \text{ et } \text{grad}(T) > \text{grad}(T_{\text{critique}}) \text{ le long du stack.}$$

Les fluctuations de pression ont une rétroaction sur les oscillations de dégagement de chaleur, ce qui explique cette boucle d'amplification, illustrée par le schéma ci-dessous [7] :

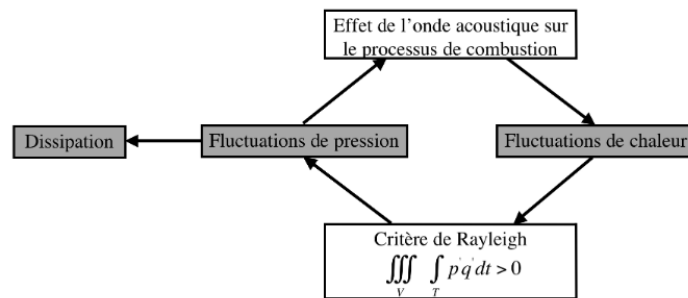


FIGURE 1.7 – Boucle de couplage thermoacoustique basée sur le critère de Rayleigh [7]

Voyons maintenant ce qu'il se passe lorsque  $p'$  et  $q'$  ne sont pas en phase et l'impact de la rétroaction du dégagement de chaleur sur l'onde acoustique.

Notre recherche se repose essentiellement sur des éléments de thèse dont nous ne détaillerons qu'une simple partie [7].

D'après François Cheuret, le taux de croissance de l'instabilité est donné par l'opposé de la partie imaginaire de la pulsation complexe :  $-Im(\omega)$ .

$$\text{L'équation de la pulsation complexe est donnée par : } \omega^2 + i\omega n(\gamma - 1)e^{-i\theta} - \omega_0^2 = 0$$

où  $\omega_0 \equiv k$  est la fréquence de résonance de la chambre et  $\theta \equiv \omega\tau$  le retard de phase. En résolvant cette équation complexe du second degré, on obtient finalement :

$$\omega = -i \frac{(\gamma-1)ne^{-i\theta}}{2} \pm \sqrt{\left| \omega_0^2 - \left( \frac{(\gamma-1)ne^{-i\theta}}{2} \right)^2 \right|}$$

Dans le cas d'un retard de phase de 0 ou d'un multiple de  $2\pi$ , les oscillations du taux de dégagement de chaleur ( $q'(t)$ ) et les oscillations de pression ( $p'(t)$ ) sont en phase, le taux de croissance est positif et donné par :

$$\sigma = -Im(\omega) = \frac{(\gamma-1)n}{2}$$

Si le retard de phase est un multiple impair de  $\pi$ , les oscillations du taux de dégagement de chaleur et les oscillations de pression sont en opposition de phase, le taux de croissance est négatif et la présence de dégagement chaleur amortit l'onde acoustique. Enfin, si le retard de phase est un multiple impair de  $\pi$ , le taux de croissance est zéro et il n'y a pas de couplage entre l'onde acoustique et le dégagement de chaleur.

## Chapitre 2

# Le tube de Rijke

### 2.1 Présentation du tube

Revenons maintenant au tube de Rijke afin de le présenter et d'en expliquer les mécanismes. Le tube de Rijke est un tube cylindrique orienté verticalement ouvert à ses deux extrémités et le plus souvent positionné sur un support ou dans la main. Il se caractérise par une source de chaleur placée dans sa partie inférieure. Celle-ci étant le plus souvent un élément chauffé par une autre source de chaleur quelconque introduite par le bas du tube. L'appareil utilisé est un dispositif simple qui transforme la chaleur en énergie acoustique [16]. Pour certaines positions de la source de chaleur, le tube de Rijke émet un son, assimilé à un bourdonnement, c'est un exemple classique de phénomène thermoacoustique appelé ici tout simplement phénomène de Rijke du nom de son découvreur, Rijke, un professeur de physique néerlandais, qui l'observa en 1859. A l'origine, il utilisa un tube en verre mesurant 0,8 m de long pour 3,5 cm de diamètre. Il plaça à 20 cm d'une extrémité un disque de fil de fer qu'on appellera « stack ». Après avoir chauffé l'élément métallique à l'aide d'une flamme puis retiré celle-ci, il observa un son fort qui dura environ 10 secondes, jusqu'à ce que le stack redevienne à température ambiante. Il réitéra l'expérience en utilisant un chauffage électrique continu et du fil résistif, puis il observa un son toujours aussi fort et continu cette fois-ci [18]. Voici une représentation simplifiée du tube de Rijke :

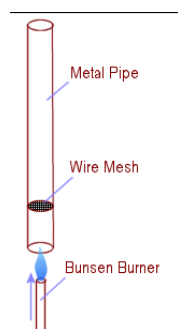


FIGURE 2.1 – Représentation simplifiée du tube de Rijke [18]

### 2.2 Mécanisme du tube

La première et plus ancienne explication donnée par Rijke lui-même était que le stack chaud transfère une partie de sa chaleur à l'air alentour lequel devient moins dense et commence à s'élever vers le haut du tube, ce qui permet d'établir un flux d'air ascendant dans le tube. Le volume d'air montant au contact des parois de la partie supérieure du tube est contracté par la baisse de température créant ainsi une variation de densité sur toute la longueur du tube [11]. D'après Rijke, la variation de pression qui en résulte est telle que les éléments fluides du tube subissent toujours une dilatation alors que les éléments fluides de la partie supérieure subissent une compression. Mais cet argument est assez simpliste et nous allons voir qu'il n'explique pas totalement le phénomène qui s'y passe. On sait maintenant que le son créé par ce tube ouvert est le résultat d'une onde acoustique stationnaire dans le tube. Par conséquent, l'air en tout point du tube subit une compression et une dilatation alternées et tous les éléments fluides du tube oscillent alors en phase [16].

Engendrer des ondes acoustiques stationnaires dans un tube est facilement réalisable. Par exemple, on peut souffler sur une des extrémités du tube. Cela crée bien une source d'énergie, rapidement interrompue par l'amor-

tissement des ondes acoustiques en raison de frottements à l'intérieur du tube.

L'explication plus récente et exacte de ce phénomène est la suivante. La présence d'une source d'énergie thermique est à l'origine de la création d'un flux d'air ascendant en raison du courant de convection du stack qui chauffe l'air. Ce débit augmente au fur et à mesure que le stack chauffe. Lorsque celui-ci devient suffisamment rapide, les oscillations de la vitesse et de la pression acoustique sont excitées [16].

## 2.3 Le stack

Les ondes sonores se propageant dans le système s'accompagnent d'une variation de pression dans le milieu fluide et provoquent une vibration de l'air et donc un son. Ces perturbations mécaniques sont aussi le siège de variations de température temporaires (la variation de température étant liée à la variation de pression) [8].

La température liée à cette onde sonore est très faible mais dans le résonateur elle peut être mesurable. Dans le milieu gazeux du résonateur, l'élévation de température n'est tout de même que de quelques degrés.

Pour amplifier cet effet thermoacoustique il est possible d'utiliser un stack. En effet le stack est un solide et un solide a une capacité calorifique ou thermique plus élevée qu'un gaz [8]. La capacité représente la quantité d'énergie thermique que peut emmagasiner un corps lors d'une élévation de température. Ainsi la plaque de stack peut échanger une grande quantité de chaleur en gardant une température quasi constante. L'utilisation d'un solide induit la production d'une plus grande quantité d'énergie lors de la même élévation de température que si on chauffait un gaz. Comme l'énergie produite est plus importante, les effets acoustiques seront plus intenses.

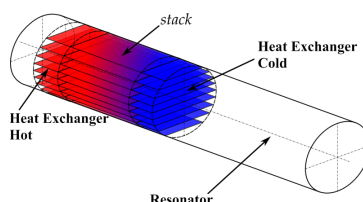


FIGURE 2.2 – Représentation schématique d'un moteur thermoacoustique à air chaud [19]

Le stack est une structure composée de plaques légèrement espacées pour créer un environnement poreux où les ondes sonores peuvent se propager [8].

Le rayon des pores doit être du même ordre de grandeur que l'épaisseur de couche limite acoustique [8]. La couche limite acoustique est la zone d'interface entre un corps et un fluide, ici la paroi du stack et le gaz en oscillation de pression (onde sonore). C'est autrement dit la région où a lieu l'écoulement du gaz sur la paroi solide [25].

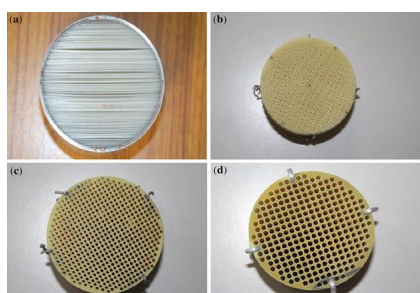


FIGURE 2.3 – Exemples de stack [13]

Le stack doit avoir une capacité calorifique élevée par rapport au fluide en écoulement dans le tube et une faible conductivité thermique (mais grande par rapport celle de l'air). Comme la conductivité thermique sera faible, le gradient de température sera maintenu et ne disparaîtra pas [14].

Nous avons réalisé pour cela un tableau récapitulatif des différents matériaux pouvant être utilisés afin de choisir le meilleur pour créer un tube de Rijke.

Calculons la capacité thermique dans un certain cas proche de celui de notre expérience :

Si on considère :

- un stack de 6 cm d'épaisseur, de 5 cm de diamètre. Sans compter sur la présence des pores,  $V_s = 0,18\text{dm}^3$
- un tube de 5 cm de diamètre, de 70 cm de hauteur. En retranchant le volume pris par le stack, le volume d'air est  $V_a = 1,37\text{dm}^3$ .

Nous appliquons la formule :  $C = C_m * m = C_m * \rho * V$

| Matériau   | Capacité thermique massique (J/(kg.K)) | Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> ) | Capacité thermique (J/K) dans les conditions exposées | Conductivité thermique (W/mK) |
|------------|--|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| Air        | 1004                                   | 1,2                                   | 1,44  | 0,0262                        |
| Verre      | 720                                    | 2530                                  | 327,89  | 1,2                           |
| PVC        | 1046                                   | 1400                                  | 263,59  | 0,17                          |
| Acier Inox | 470                                    | 7800                                  | 659,88  | 26                            |
| Aluminium  | 897                                    | 2700                                  | 435,94  | 237                           |
| Cuivre     | 386                                    | 8920                                  | 619,76  | 390                           |
| Fer        | 444                                    | 7860                                  | 628,17  | 80                            |
| Or         | 129                                    | 19300                                 | 448,15  | 317                           |
| Plexiglas  | 1450                                   | 1180                                  | 307,98  | 0,19                          |

FIGURE 2.4 – Tableau rassemblant les différentes capacités selon le matériau utilisé

Grâce à ce calcul nous remarquons que le matériau le plus intéressant à utiliser est l'acier ou l'acier inoxydable. En effet sa capacité calorifique est assez grande devant celle de l'air et la plus grande par rapport aux autres matériaux.

Le stack ne servant cependant qu'à amplifier les effets sonores désirés, pour réaliser notre propre tube de Rijke il ne nous est pas nécessaire d'en intégrer un à notre montage.

## 2.4 Les instabilités thermoacoustiques dans le tube de Rijke : (cas d'un système composé d'une flamme et d'un stack)

Nous allons maintenant étudier les instabilités thermoacoustiques au sein du tube de Rijke. Par hypothèse, on considère qu'une onde acoustique existe avec une certaine fluctuation de pression dans le temps, notée  $p'(t)$ . On approche la flamme du tube et on la positionne en dessous de celui-ci. La flamme oscille légèrement et suffisamment pour avoir une fluctuation du dégagement de chaleur, notée  $q'(t)$ .

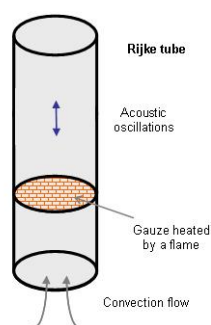


FIGURE 2.5 – Le tube de Rijke [9]

Si  $p'(t)$  et  $q'(t)$  sont en phase, alors le critère de Rayleigh ( $R$ ) sera supérieur à 0, et par conséquent  $p'(t)$  sera amplifiée. Si de plus le critère de Rayleigh étendu est respecté avec un gradient de température le long du stack supérieur à un certain gradient critique, alors une boucle d'amplification de l'onde acoustique apparaît. Les instabilités thermoacoustiques sont donc auto-entretenues. Au bout d'un certain temps, un bruit sera audible, car le son provient d'une variation de pression continue.

Quand on enlève la flamme, le système s'amortit petit à petit car le critère de Rayleigh étendu n'est plus valide et  $R < 0$  (il n'y a plus de dégagement de chaleur). La courbe de pression perd en amplitude, l'onde acoustique devient de plus en plus faible.

La pression dans le tube,  $p(t)$ , suit un cycle sinusoïdal lorsque l'on entend le "chant" du tube, et est décrite par le schéma ci-dessous [11] :

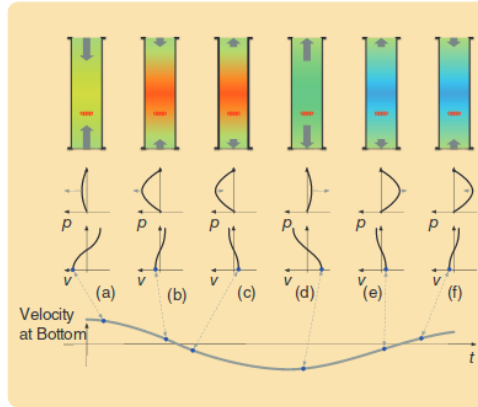


FIGURE 2.6 – Diagramme du mode acoustique fondamental du tube de Rijke montrant sa nature en demi-onde [11]

Dans la première ligne, la pression acoustique est affichée en couleur et la vitesse acoustique aux extrémités est représentée par des flèches.

Dans la phase (a), la pression vient juste d'augmenter au centre du tube en raison de l'afflux d'air, ce qui en (b) a permis à la pression d'atteindre un maximum au centre du tube ( $p_{max}$ ).

En (c), le gradient de pression a inversé la vitesse (phénomène de surpression), de sorte que l'air commence maintenant à sortir du tube. En (e) la pression atteint un minimum au centre du tube ( $p_{min}$ ), et à nouveau le gradient de pression entraîne l'aspiration d'air en (f), c'est le phénomène de dépression. Puis, le cycle redémarre à nouveau.

**Mise en équation du tube :** Pour décrire quelques équations du système, nous allons faire plusieurs hypothèses [12].

Supposons pour notre modèle que la température de l'air est constante sur l'ensemble du tube et égale à  $T = 300K$ .

Toute la chaleur dégagée par l'appareil de chauffage est transmise au flux d'air. Cela signifie que le rayonnement thermique et les pertes thermiques par conduction thermique vers d'autres éléments de la structure, par exemple les parois des tubes, sont ignorés. La gravité et les autres forces du corps sont négligées. La vitesse d'écoulement du gaz est faible par rapport à la vitesse du son. Le fluide est considéré comme se trouvant à l'intérieur du tube au-delà du bord extérieur des couches limites formées aux parois du tube, de sorte que les contraintes visqueuses peuvent être ignorées. L'épaisseur de la couche limite est bien plus petite que le diamètre du tube.

L'équation d'onde pour la perturbation de pression dans l'intervalle du tube de Rijke est :

$$\frac{\delta^2 p'}{\delta t^2} - a^2 \frac{\delta^2 p'}{\delta x^2} + \frac{a^2 \delta \rho_0}{\rho_0} \frac{\delta p'}{\delta x} = (\gamma - 1) \frac{\delta \dot{Q}'}{\delta t} + \rho_0 a^2 \frac{\delta \Omega'}{\delta t}$$

Notons que la vitesse du son  $a$  et la densité  $\rho_0$  sont des fonctions de la coordonnée horizontale dirigée le long du tube.  $Q'$  est la fluctuation de chaleur par unité de volume, et  $\Omega'$  est la fluctuation de l'intensité volumétrique de la source par unité de volume.

Démonstration de cette équation : (faite par Konstantin Matveev [12])

Le point de départ sont les équations de conservation de la mécanique des fluides pour la masse, la quantité de mouvement et l'énergie de l'air considérée comme un gaz parfait. En simplifiant ces équations à l'aide des hypothèses faites précédemment, on obtient le résultat ci-dessous :

$$\begin{aligned} \frac{\delta \rho}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u) &= \rho \Omega \quad (1) \\ \frac{\delta}{\delta t} (\rho u) + \frac{\delta}{\delta x} (\rho u^2) &= \frac{-\delta p}{\delta x} \quad (2) \\ \frac{\delta p}{\delta t} + u \frac{\delta p}{\delta x} + \gamma p \frac{\delta u}{\delta x} &= (\gamma - 1) \dot{Q} + \rho a^2 \Omega \quad (3) \end{aligned}$$

La partie stable de la pression est supposée constante le long du tube ; les pertes liées au débit moyen dues aux frottements sur les parois du tube sont négligeables.  $u_0$  et  $u'$  sont considérées comme de petites valeurs. En



substituant les équations linéarisées des variables thermodynamiques dans (1)-(2) et en les simplifiant, on obtient un système linéaire pour les composantes fluctuantes :

$$\frac{\delta\rho'}{\delta t} + \rho_0 \frac{\delta u'}{\delta x} + u' \frac{\delta\rho_0}{\delta x} = \rho_0 \Omega' \quad (4)$$

$$\rho_0 \frac{\delta u'}{\delta t} + \frac{\delta p'}{\delta x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\delta p'}{\delta t} + \gamma p_0 \frac{\delta u'}{\delta x} = (\gamma - 1) \dot{Q}' + \rho a^2 \Omega' \quad (6)$$

En combinant les équations (5) et (6), on obtient l'équation d'onde pour la perturbation de pression dans le tube de Rijke.

## Chapitre 3

# Construction du tube de Rijke

### 3.1 Cahier des charges

| Matériel                   | Exigences et propriétés   | Dimensionnement  | Fournisseurs et références   |
|----------------------------|---|--|--|
| Tube en acier              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance aux températures élevées</li> <li>- Matériau peu coûteux</li> <li>- Diamètre assez grand pour pouvoir y insérer les fils résistifs mais d'une grandeur raisonnable pour conserver une température assez haute dans le tube</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 30 mm de diamètre</li> <li>- 420 mm de longueur (environ)</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- REXEL : MRL 5557 (Réf Rexel : ARD09932)</li> <li>ACIER INOX 32</li> <li>- Castorama : Tube rond acier verni <math>\Phi 30</math> mm, 1 m (Réf : 3232630704202)</li> </ul> |
| Fils résistifs en nichrome | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alliage chrome et nickel qui monte vite en température</li> <li>- Faible section pour pouvoir avoir une longueur raisonnable de fil à insérer dans le tube</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- entre 0,2mm et 0,1mm de diamètre</li> <li>- entre 2,25m et 0,56m de longueur</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Conrad : Fil résistif Block RD 100/0,1 62.4 <math>\Omega</math>/m 1430 m (Réf : 422420 ou 422437) bobines très longues (Réf : 429066)</li> </ul>                          |
| Feuilles de Mica           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Enveloppe pour les fils évitant le contact avec les parois intérieures du tube et le passage du courant entre les différentes parties du montage (ce qui pourrait poser un problème de sécurité)</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>entre 0,2 et 0,1 mm d'épaisseur voire plus fin</li> </ul>                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Récupération des feuilles de mica dans un sèche cheveux</li> </ul>  |

TABLE 3.1 – Cahier des charges

Tube en acier : (initialement mais finalement nous avons utilisé un autre tube déjà existant de diamètre  $\Phi = 45\text{mm}$ ) [https://www.castorama.fr/tube-rond-acier-vern-i-o30-mm-1-m/3232630704202\\_CAFR.prd#](https://www.castorama.fr/tube-rond-acier-vern-i-o30-mm-1-m/3232630704202_CAFR.prd#)

Fil résistif : <https://www.conrad.fr/p/fil-resistif-constantan-429074-100-m-5-m-429074>

Détermination des grandeurs du cahier des charges :

Le générateur va fournir une puissance entre 100 et 125W (puissance max : 150W). On prendra donc par exemple une intensité de 3,45A et une tension de 32,5V pour réaliser notre expérience soit une puissance de 112W.

Pour déterminer la résistance nécessaire des fils on utilise la relation suivante :

$$R = \frac{U}{I}$$

On obtient une résistance égale à 9,42Ω. Cependant, comme nous n'avons pas eu tout le matériel nécessaire, nous avons utilisé des fils de résistance 63Ω.

Calculons la dimension des fils résistifs :

$$R = \frac{\rho * l}{S}$$

Le rapport longueur sur section doit être égal à  $1 * 10^8$  dans notre cas, avec la résistivité du constantan égale à  $49.10^{-8} \Omega.m$ . Le constantan est un alliage de cuivre et de nickel moins cher que l'alliage chrome nickel qui résiste aux fortes températures. On trouve  $l = 1m$  pour un diamètre de 0,1mm.

## 3.2 Protocole de construction du tube de Rijke

### 3.2.1 Protocole initialement prévu

Concernant la mise en place de l'expérience du tube de Rijke, nous souhaitions tout d'abord utiliser un tube en verre borosilicaté qui supporte très bien la chaleur ; finalement, il a été décidé que nous utilisions un tube en acier. De plus, nous avons initialement choisi d'utiliser un bec Bunsen, capable de fournir la chaleur nécessaire et suffisante pour obtenir des résultats probants. Cependant, nous avons appris au cours de notre projet que l'utilisation de combustion comme source de chaleur était prohibée par l'établissement pour des raisons de sécurité.

De ce fait, nous avons dû opter pour une source de chaleur différente ; notre choix s'est alors porté sur l'utilisation de fils résistifs en nichrome couplés à un générateur pour fournir l'énergie nécessaire à de bonnes conditions expérimentales, permettant d'observer les phénomènes thermoacoustiques dans le tube [26, 12]. On peut rapprocher ce système de chauffage à celui utilisé dans les lampes à incandescence.

Durant notre recherche, nous avons déterminé qu'il était important que la source de chaleur se situe à un quart de la hauteur du tube pour obtenir des résultats exploitables. Il a donc fallu trouver un dispositif pour que le fil résistif puisse chauffer et fournir de la chaleur dans le tube sans pour autant être en contact avec ce dernier : en effet, le tube étant en acier (conducteur électrique), il est indéniable que tout contact entre le fil et le tube causerait un court-circuit empêchant le bon fonctionnement de l'expérience.

Nous avons alors décidé d'opter pour un système composé de matériaux n'étant pas conducteur d'électricité et supportant la forte chaleur fournie par le fil résistif. Ce système permettrait idéalement d'enrouler la bobine de fil résistif autour pour ainsi avoir la source de chaleur à la hauteur désirée, sans court-circuit. Les feuilles de mica, correspondant parfaitement à nos besoins [12]. Finalement voici le protocole initialement prévu tel que nous devons le réaliser (établi à partir d'expériences déjà existantes et de nos recherches) :

#### 3.2.1.1 Création de la structure de mica

- Couper les plaques de mica comme sur la figure :

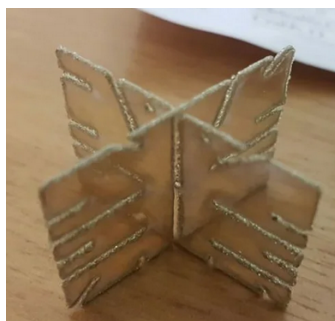


FIGURE 3.1 – Structure de Mica en croix [10]

Les fentes doivent être espacées pour que les spires des fils résistifs ne se touchent pas et profondes dans la plaque pour que les fils ne soient pas en contact avec la paroi interne du tube (risque d'électrocution lors de la

manipulation car matériaux conducteurs).

- Placer les deux plaques de mica l'une dans l'autre pour former une croix.

### 3.2.1.2 Création d'une bobine

- Enrouler sur lui-même la longueur de fil résistif souhaitée afin de réaliser une bobine lâche et une autre plus serrée.

Pour cela, s'aider d'une tige pour créer la bobine de fil en plaçant ce dernier entre les deux.

- Placer la bobine serrée dans les fentes peu profondes de la croix de mica puis la partie aérée dans les fentes profondes afin que les deux bobines se rencontrent au milieu du dispositif.

Les extrémités du fil doivent passer dans les trous de la plaque de mica et dépasser sur environ 20 mm.



FIGURE 3.2 – Enroulement du fil pour formation d'une bobine [10]

### 3.2.1.3 Assemblage du dispositif et mise en marche

- Attacher les câbles reliés à l'alimentation électrique aux fils de nichrome (la soudure des deux ensembles est conseillée)

- Positionner l'assemblage à côté du tube (la partie chauffante au quart du tube) et plier les fils d'alimentation comme indiqué sur la photo :

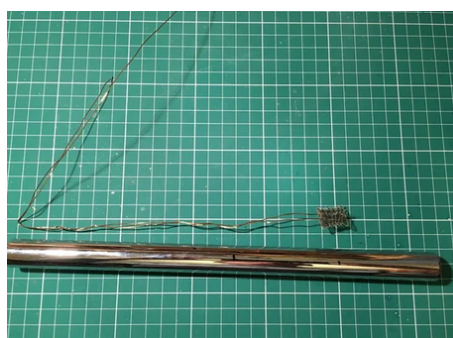


FIGURE 3.3 – Illustration de l'assemblage [10]

- Enfiler les fils d'alimentation à l'intérieur du tube, par le haut, sans que la croix de mica entre à l'intérieur aussi et vérifier que les fils ne touchent pas les parois du tube.

Cela aurait permis de repérer les éventuelles anomalies lors d'un premier chauffage effectué en alimentant le circuit électrique jusqu'à ce que les fils de nichrome soient bien rouges.

Ainsi, si le test était bon, nous pouvions éteindre l'alimentation (trop chauffer pourrait endommager le dispositif) et placer enfin l'appareil de chauffage à l'intérieur du tube jusqu'au quart.

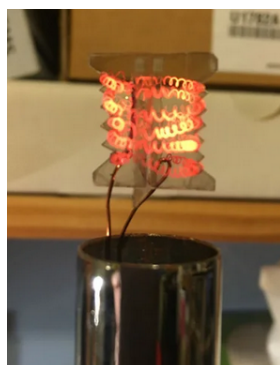


FIGURE 3.4 – Alimentation du circuit jusqu’à obtenir des fils rouges [10]

- Placer le tube dans un collier de serrage pour le tenir (le collier devant résister à la chaleur) en l’accrochant plutôt en bas du tube (partie plus froide).



FIGURE 3.5 – Plaçage du tube dans un collier de serrage [10]

- Procéder au test final en alimentant le circuit avec la tension choisie et attendre quelques secondes que le tube se réchauffe avant d’entendre un son.

### 3.2.2 Protocole réellement réalisé

Pour diverses raisons, le protocole n’a pas pu être entièrement suivi et nous le détaillerons dans cette partie.

La première étape était de passer la commande du matériel. En raison d’imprévus dans le carnet de commande du département, les plaques de mica n’ont pu être obtenues. De ce fait, nous avons cherché à en avoir par un autre moyen. Il s’avère que les feuilles de mica sont également utilisées dans les systèmes de chauffage d’air des sèche-cheveux. Nous avons donc récupéré un système composé de feuilles de mica en croix depuis un sèche-cheveux. Celui-ci, n’étant pas adapté aux dimensions du tube, nous avons dû structurer ce dernier pour qu’il puisse parfaitement tenir dans le tube à la hauteur souhaitée. Nous avons donc raccourci la structure de mica, puis fait des trous pour que la bobine puisse s’enrouler autour du dispositif comme précisé dans le protocole théorique. Une fois la bobine mise en place sur la structure de mica, il a fallu souder les extrémités de la bobine aux câbles du générateur. De plus, la structure de mica initiale (du sèche-cheveux) étant frêle, nous avons dû faire deux essais de création pour obtenir une structure qui correspondait à nos besoins.

Pour obtenir une puissance satisfaisante, il a fallu enrouler le fil résistif de sorte à former une bobine. Cependant, le fil étant extrêmement fin et fragile, il était très compliqué à démêler, puis à enrouler. Durant le processus, le fil s’est cassé à plusieurs reprises. Pour répondre à ce problème, nous avons choisi de souder les deux parties du fil en faisant un nœud au préalable. Cette partie était également un travail très minutieux, de par la faible dimension du fil. C’est pourquoi nous avons décidé de ne pas réaliser les deux sortes de bobines initialement prévues dans le protocole théorique (une bobine lâche et une bobine serrée) mais de rester à une bobine entièrement serrée.

En parallèle, nous avons également réalisé une structure composée d’un câble enroulé (pour que la structure soit solide) avec une pince crocodile soudée au bout. Cette structure a été réalisée en prévision d’une possible erreur de dimensionnement de la structure mica : elle permet de stabiliser la structure de mica à un quart du tube si celle-ci était trop étriquée pour tenir d’elle-même dans le tube. Au final, cette structure n’a pas été utilisée dans l’expérience, la deuxième structure de mica étant parfaitement redimensionnée.

Enfin, des câbles, un générateur, un tube aux bonnes dimensions nous ont été mis à disposition afin de mettre en œuvre le protocole. Nous avons donc pu souder les câbles à notre fil résistif pour le brancher au générateur. Étant donné la fragilité du dispositif, il était inconsideré de faire une expérience sans précaution, au risque de casser une partie de notre structure de mica ou du système chauffant.

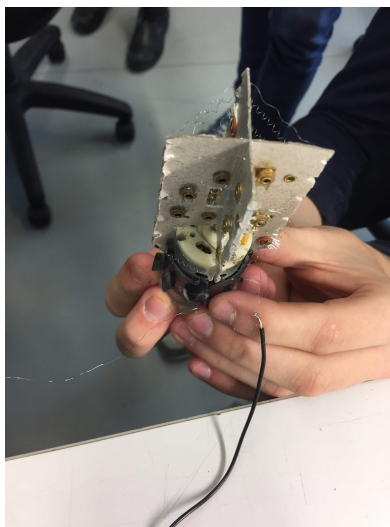


FIGURE 3.6 – Fil résistif entouré autour de notre structure de mica

### 3.3 Expérience

Après avoir pris soin de vérifier que la bobine était bien enroulée sur la structure de mica et qu'elle ne serait pas en contact avec le tube une fois le dispositif mis en place, nous avons fait un essai d'expérience pour vérifier le bon fonctionnement de notre tube. Comme aucun son audible à l'oreille humaine n'était relevé, nous avons utilisé un ampèremètre et un voltmètre pour déterminer la source du problème : le courant ne passait pas dans la bobine de nichrome. Ce problème découle du fait que le fil de nichrome est, comme précisé auparavant, extrêmement fin et fragile : le fil fourni tel que mis en œuvre n'était pas conducteur. Nous n'avons pas pu mettre en place une solution dans les délais nécessaires pour obtenir un résultat valable permettant une analyse du son potentiellement produit par le tube de Rijke.

**Conclusion de l'expérience** La méthode initialement envisagée était d'utiliser une source de chaleur de type combustion comme un Bec Bunsen, un dispositif assez simple d'utilisation et de mise en place. Ce système étant en fait interdit, nous avons dû penser à un autre système chauffant et nous avons donc opté pour un fil résistif de nichrome (conducteur) couplé à un générateur. Nous avons dû faire face à des problèmes dans la réalisation du système chauffant car le fil était fin et cassant et la structure de mica friable et fragile. Nous avons remédié à ces soucis en faisant des soudures sur le fil et en créant plusieurs structures de mica afin de faire des essais. L'expérience ne s'est pas déroulée comme nous l'avions prévu, mais avec du matériel plus adapté, nous aurions sans aucun doute obtenu des résultats plus probants.

# Conclusion et perspectives

**Conclusion sur l'apport personnel de cet EC** Ce projet, comme tous les travaux de groupe, nous a appris à adopter une organisation rigoureuse dans nos recherches, une bonne coopération entre les différents membres du groupe et une démarche de répartition du travail.

Les projets comme celui-ci, bénéficiant d'un réel suivi de la part d'un professeur-responsable nous donnent la possibilité de démarrer nos recherches sur une base solide, de ne pas sortir des limites du sujet et d'avoir un retour hebdomadaire sur l'avancée, la cohérence et la pertinence de nos résultats.

De par les multiples facettes du projet (mathématique, physique, expérimentale), nous avons pu nous attarder, chacun, sur les points importants du projet qui suscitaient notre intérêt et cela nous a permis d'apporter nos connaissances personnelles à l'élaboration du rapport.

Pouvoir mettre en pratique nos connaissances acquises au cours des séances de travail à travers la création du tube de Rijke, a d'autant plus facilité notre compréhension du sujet et notre intérêt pour ce dernier.

Du point de vue physique, le projet sur le tube de Rijke a eu un impact important sur notre culture et nos connaissances dans le domaine de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, de l'acoustique et de la thermomécanique.

Pour finir, ce projet mais en particulier cette expérience sur le tube souligne bien le contraste existant entre la théorie et la pratique mais nous montre aussi qu'il faut savoir tirer des conclusions même dans le cas de résultats inattendus.

**Perspectives pour la poursuite de ce projet** Une des suites possibles que nous pourrions envisager pour ce projet serait le renouvellement de notre expérience en utilisant d'autres matériaux, mais aussi en faisant varier les paramètres expérimentaux. L'idéal serait de pouvoir faire un nombre suffisant d'expériences en obtenant des sons exploitables et ainsi valider les théories mises en évidence dans notre rapport.

# Annexes



FIGURE 3.7 – Pauline et Laly, démêlant le fil et l’enroulant autour d’un tube pour faire la bobine



FIGURE 3.8 – Baptiste, aidant les deux filles à démêler le fil très fragile



FIGURE 3.9 – Benoît, redimensionnant la structure de mica pour qu’elle ait les bonnes dimensions





FIGURE 3.10 – Catheline, faisant des trous dans la structure de mica pour y insérer le fil résistif



FIGURE 3.11 – Pierre, préparant le tube afin de réaliser l'expérience



# Bibliographie

- [1] John H. Booske et Susan C. Hagness Alireza Mashal. Toward contrast-enhanced microwave-induced thermoacoustic imaging of breast cancer : an experimental study of the effects of microbubbles on simple thermoacoustic targets. *Physics in Medicine & Biology*, 54(3), 2009. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/54/3/011>.
- [2] Tamas BEKE. Heat transfer in a thermoacoustic process. *European Journal of Physics*, 33(6), 2012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/33/6/1487>.
- [3] S. BELLIN. La réfrigération thermoacoustique. <http://www.savoirs.essonne.fr/thematiques/les-technologies/energies/la-refrigeration-thermoacoustique/>, Date de consultation : Février 2019.
- [4] Raymond BRUN. Introduction à la dynamique des gaz réactifs, 2013.
- [5] Cunguang Lou Caijun Cao, Liming Nie and Da Xing. Occurrence of thermoacoustic phenomena at 0.8 k, 4 k and above. *licence by IOP Publishing Ltd*, 101, 2015. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/101/1/012038/meta>.
- [6] Cunguang Lou et Da Xing Caijun Cao, Liming Nie. The feasibility of using microwave-induced thermoacoustic tomography for detection and evaluation of renal calculi-physics in medicine & biology. *Physics in Medicine & Biology*, 55(17), 2010. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9155/55/17/020>.
- [7] François CHEURET. *Instabilités thermo-acoustiques de combustion haute-fréquence dans les moteurs fusées*. PhD thesis, Université de Provence - Aix-Marseille I, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011656/file/cheuret2005.pdf>, 2005.
- [8] Matthieu DRIAT. La thermoacoustique. <http://thermoacoustique.free.fr/effetthermoacoustique.htm>, Date de consultation : Février 2019.
- [9] Anil Dadwal Harpreet Singh, Gaurav Sachdeva. Experimental study of thermo-acoustic phenomena in rijke tube. <https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjFzu6BhNriAhVKbBoKHS6NB3IQjRx6BAGBEAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.paperpublications.org%2Fdownload.php%3Ffile%3DExperimental%2520Study-703.pdf%26act%3Dbook&psig=A0vVaw1UvhQeB2YgWKj0MrfKEwsJ&ust=1560088309904842>, 2016.
- [10] jellmeister. Turn heat into noise – make a 90 db rijke tube. <https://www.instructables.com/id/Turn-Heat-Into-Noise-Make-a-90dB-Rijke-Tube/>, Date de consultation : Mai 2019.
- [11] Bassam BAMIEH et Karl J. ÅSTRÖM Jonathan P. EPPERLEIN. Thermoacoustics and the rijke tube. [https://engineering.ucsb.edu/~bamieh/publications/pubs/eppbamast15\\_CSM.pdf](https://engineering.ucsb.edu/~bamieh/publications/pubs/eppbamast15_CSM.pdf), 2015.
- [12] Konstantin MATVEEV. *Instabilities in the Rijke Tube : Experiments and Modeling*. PhD thesis, California Institute of Technology, [https://thesis.library.caltech.edu/859/1/matveev\\_thesis.pdf](https://thesis.library.caltech.edu/859/1/matveev_thesis.pdf), 2003.
- [13] B. Ramesh Nayak. Influence of stack geometry on the performance of thermoacoustic refrigerator. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12046-016-0585-5>, 2017.
- [14] Guillaume PENELET. Introduction à la thermoacoustique. [perso.univ-lemans.fr/~gpenelet/enseignement/support\\_cours/poly\\_thermoac.pdf](perso.univ-lemans.fr/~gpenelet/enseignement/support_cours/poly_thermoac.pdf), 2013.
- [15] Jacques REMUS. Thermophones à bascule. <http://jacques-remus.fr/thermophones-bascule.htm>, Date de consultation : Mars 2019.
- [16] N. Ananthkrishnan et S.D. Sharma Shekhar M.Sarpotdar. The rijke tube - a thermo-acoustic device. <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/008/01/0059-0071>, 2003.
- [17] Wikipédia. Thermoacoustique. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermoacoustique>, Date de consultation : Avril 2019.
- [18] Wikipédia. Rijke tube. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rijke\\_tube](https://en.wikipedia.org/wiki/Rijke_tube), Date de consultation : Février 2019.

- [19] Wikipédia. Thermoacoustic heat engine. [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoacoustic\\_heat\\_engine](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoacoustic_heat_engine), Date de consultation : Juin 2019.
- [20] Wikipédia. Combustion instability. [https://en.wikipedia.org/wiki/Combustion\\_instability](https://en.wikipedia.org/wiki/Combustion_instability), Date de consultation : Mai 2019.
- [21] Wikipédia. Discovery (navette spatiale). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Discovery\\_%28navette\\_spatiale%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Discovery_%28navette_spatiale%29), Date de consultation : Mai 2019.
- [22] Wikipédia. Résonance. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Résonance>, Date de consultation : Mai 2019.
- [23] Wikipédia. Son (physique). [https://fr.wikipedia.org/wiki/Son\\_%28physique%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Son_%28physique%29), Date de consultation : Mai 2019.
- [24] Wikipédia. Thermodynamique. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermodynamique>, Date de consultation : Mai 2019.
- [25] Wikipédia. Couche limite. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche\\_limite](https://fr.wikipedia.org/wiki/Couche_limite), Date de consultation : Mars 2019.
- [26] Lukáš Černý. Rijke's tube – an experimental platform for modeling and control in thermoacoustics. Technical report, Czech Technical University in Prague, [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69514/F3-BP-2017-Cerny-Lukas-Lukas\\_Cerny\\_BP\\_May\\_2017.pdf](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69514/F3-BP-2017-Cerny-Lukas-Lukas_Cerny_BP_May_2017.pdf), 2017.

## Table des figures

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Schéma des échanges thermiques dans une machine réfrigérateur [8] . . . . .   | 5  |
| 1.2  | Représentation des transformations du gaz dans un réfrigérateur thermoacoustique [8] . . . . .  | 6  |
| 1.3  | Schéma des échanges thermiques dans une machine moteur [8] . . . . .  | 6  |
| 1.4  | Diagramme de Clapeyron d'une particule de gaz dans un moteur thermoacoustique [14] . . . . .  | 7  |
| 1.5  | Photographie d'un thermophone à bascule [15] . . . . .  | 8  |
| 1.6  | Schéma d'un tube Rijke (à gauche) représenté avec la distribution du premier mode de pression et de vitesse et l'indice de Rayleigh correspondant (à droite) en négligeant le délai entre la fluctuation de vitesse et le dégagement de chaleur instationnaire [12] . . . . . | 9  |
| 1.7  | Boucle de couplage thermoacoustique basée sur le critère de Rayleigh [7] . . . . .  | 10 |
| 2.1  | Représentation simplifiée du tube de Rijke [18] . . . . .   | 11 |
| 2.2  | Représentation schématique d'un moteur thermoacoustique à air chaud [19] . . . . .  | 12 |
| 2.3  | Exemples de stack [13] . . . . .  | 12 |
| 2.4  | Tableau rassemblant les différentes capacités selon le matériau utilisé . . . . .   | 13 |
| 2.5  | Le tube de Rijke [9] . . . . .  | 13 |
| 2.6  | Diagramme du mode acoustique fondamental du tube de Rijke montrant sa nature en demi-onde [11] . . . . .  | 14 |
| 3.1  | Structure de Mica en croix [10] . . . . .   | 16 |
| 3.2  | Enroulement du fil pour formation d'une bobine [10] . . . . .   | 17 |
| 3.3  | Illustration de l'assemblage [10] . . . . .   | 17 |
| 3.4  | Alimentation du circuit jusqu'à obtenir des fils rouges [10] . . . . .  | 18 |
| 3.5  | Plaçage du tube dans un collier de serrage [10] . . . . .   | 18 |
| 3.6  | Fil résistif entouré autour de notre structure de mica . . . . .  | 19 |
| 3.7  | Pauline et Laly, démêlant le fil et l'enroulant autour d'un tube pour faire la bobine . . . . .   | 21 |
| 3.8  | Baptiste, aidant les deux filles à démêler le fil très fragile . . . . .  | 21 |
| 3.9  | Benoît, redimensionnant la structure de mica pour qu'elle ait les bonnes dimensions . . . . .   | 21 |
| 3.10 | Catheline, faisant des trous dans la structure de mica pour y insérer le fil résistif . . . . .   | 22 |