

Communication pour le Forum de l'Ircam à Montréal (IRCAM Forum Workshop  
in Montreal) février 2021

## **Les Thermophones, récentes évolutions et spatialisation**

Jacques Rémus

( *Ipotam Mécamusique* )

[jacques.remus@mkz.fr](mailto:jacques.remus@mkz.fr)

### **1) Introduction**

Bonjour, et bien je suis très heureux de pouvoir vous parler de mon travail avec les Thermophones, des évolutions de ce travail et puis, plus spécialement du rapport avec la spatialisation.

Je me présente : je suis un artiste indépendant travaillant à la fois la composition musicale et la réalisation de sculptures sonores ou machines musicales. Mon atelier est à Paris et je dirige une compagnie de spectacles qui produit et diffuse mes oeuvres. Actuellement « NON ESSENTIEL » !.

Je me suis passionné pour le son des phénomènes thermo-acoustiques depuis une trentaine d'années. La nature de ces sons puissants et très particuliers liée à la possibilité de générer des musiques avec des tuyaux mobiles sans soufflerie m'a fait pas mal rêver. Je n'ai cependant commencé à passer à la réalisation que depuis une douzaine d'années avec un premier spectacle de pyrophones automatisés en 2007.

Depuis j'ai fait de nombreux essais et expériences, aidé par des collaborations avec des équipes de recherches au USA et en France avec le CNRS. J'ai réalisé en particulier un ensemble expérimental d'une quarantaine de Thermophones avec lequel j'ai fait quelques concerts et installations.

Une présentation a été faite au Forum de l'Ircam en novembre 2015..

### **2) Naissance de la Thermoacoustique**

Les souffleurs de verre : depuis la haute antiquité ils ont remarqué que parfois leurs tubes émettaient des sifflements stridents très puissants, c'est sans doute le phénomène le plus ancien de ce genre ainsi que la pratique dans les temples

japonais shintoïstes, avec des récipients chauffés contenant du riz et qui émettent un long son thermoacoustique . Ils sont utilisés par les prêtres dans des rituels divinatoires. Cela s'appelle le Kibitsu No Kama.

C'est au 19ème siècle que des expérimentateurs ont découvert divers formes de ce phénomène dont les plus connues étaient les sons qu'entendaient les allumeurs de réverbère en manipulant les lampes. Des tubes de Rijke, de Sondhauss, de Hopfler, de Taconis, voient le jour sans qu'il y ait d'explications sauf plus tard celles d'un physicien anglais Rayleigh puis Rott, ni d'application, sauf un timide moteur Stirling mais aussi d'un musicien et scientifique alsacien, Frederic Kastner, qui construisit un « orgue à gaz » en 3 exemplaire dont un que j'ai pu voir et que l'on a pu remettre en fonctionnement dans les années 60.

#### FILM

Puis ce fut l'oubli. Il y eût des ouvrages rassemblant ces expérimentations dont celui d'Henri Bouasse. Vers 1930, allemands et français, indépendamment mettent au point l'ancêtre de nos réacteurs d'avion, le pulsoréacteur, tube où des injections d'essence explosent au rythme de la fréquence acoustique fondamentale du tube. Les français abandonnèrent, les allemands en firent les vecteurs de leurs premières bombes volantes, les V1. Les américains récupérèrent ces engins et après divers pérégrinations naquit la science thermoacoustique à Los Alamos, berceau de la bombe atomique. On eut l'idée d'inverser le phénomène et l'utilisation fut singulièrement avant tout la cryogénie : du son dans un fluide à haute pression crée à l'autre extrémité du froid ! Ceci permit de s'approcher du zero absolu et l'autre utilisation fut la thermoréfrigération des vaisseaux spatiaux, sans moteurs et sans gaz dangereux. Depuis sont nés de nombreux laboratoires, maintenant surtout en Chine et au Japon qui travaillent la question. Plusieurs artistes ont développé des orgue à flamme, je citerais deux amis, Trimpin au USA et Michel Moglia en France, sans parler des essais avec énergie solaire et paraboles. De mon côté j'ai cherché à aller dans une autre direction : les Thermophones électriques.

### 3) Les principes théoriques

Bien sûr je ne vais pas faire un cours sur la thermoacoustique ou la mécanique des fluides car j'en suis bien incapable.

La thermoacoustique est une discipline relativement jeune au carrefour de la thermodynamique, de la thermique et de l'acoustique.

En simplifiant considérons ce qui se passe dans un tube où l'on a placé, à peu près au 1/4 de sa longueur un manchon poreux, (le stack) formé théoriquement de « plaques » empilées et en pratique de micro-tubes céramiques ou grilles métalliques. Si l'on crée une forte chaleur à une extrémité du stack, générant une différence de température de plusieurs centaines de degrés avec l'autre extrémité, il se crée, au bout d'un certain temps une instabilité due à un déphasage entre la vitesse des déplacement des molécules de gaz et leur pression . Les molécules font

des va et vient entre les deux pôles de températures. Ceci se produit dans l'épaisseur de couche limite acoustique le long des parois des « plaques ». Une onde stationnaire se déclenche acoustiquement alors dans le tube , transformant l'énergie calorique en son. C'est l'instabilité thermo-acoustique.

De nombreux sites donnent les formules de ce phénomènes , mais je vais vous montrer un petit film fait par le labo de Steve Garret .

FILMS science films Garret,

Et si vous voulez savoir comment faire fonctionner un petit Thermophone dans votre cuisine ou même sur votre bureau regardez ce merveilleux petit film fait par Thibault Combe au laboratoire Laum au Mans (voir référence en fin de texte)

film Combe Laum,

#### **4) Particularités et caractéristiques des sons des Thermophones**

C'est maintenant que j'aborde un problème que tout le monde connaît et n'a rien d'original, mais qui, ici, me handicape énormément : le rendu sur haut-parleurs des sons de Thermophones est très éloigné du rendu réel. Plusieurs ingénieurs du son, venu pour la télévision ou un tournage vidéo ont été très déçus des rendus enregistrés pourtant avec du bon matériel, par rapport à ce qu'ils avaient vécu .

C'est pourquoi je tenais beaucoup à venir avec quelques tuyaux à Montréal si la conférence avait pu se tenir en « prrrésentiel »!!

Tout cela n'est pas facile à reproduire sur des haut-parleurs, à fortiori ceux d'un laptop ! Un écoute au casque améliore cependant le rendu, donc si vous pouvez avoir cela maintenant c'est mieux

Je vais tout d'abord vous présenter un son de pyrophone

Pyro- du grec pûr c'est le feu ...!

FILM

Le son se déclenche quelques secondes après la chauffe au rouge d'une grille et se compose essentiellement de la fondamentale et ici de deux partiels.

Pour les Thermophones , terme plus générique que les Pyrophones mais dont le mot signifie aussi un système de téléphonie datant de 1881, j'ai été amené à faire de nombreuses expérimentations mais sans les bancs de mesure et moyens d'un laboratoire. J'ai constitué une sorte de banc de mesure à moi , très bricolé mais très fiable. C'est sur ces données que, avec les équipe du Limsi-CNRS ( en particulier Diana Baltéan-Carlès, Catherine Weisman et Christophe d'Alexandro)) nous avons fait une première publication sur 3 expérimentations ; depuis j'en ai enregistré une centaine qui sont en cours d'exploitation. Le but est d'une part d'approfondir la compréhension du phénomène et de trouver les meilleures solutions de dimensions des tuyaux et surtout des caractéristiques des « stacks » pour arriver à un instrumentarium facile à jouer et à construire . Or ce n'est pas facile !

Je vous montre quelques exemples de mesures .

Les notions de décibels ont été mal maîtrisées au niveau des mesures mais avec de simples appareils portatifs nous avons fait des mesures de 95 à 105 db à 1M mais jusqu'à 135 dB-C en sortie de tuyau, autrement dit les mesures se faisaient avec bouchons d'oreille et casque antibruit !

FILMS

## 4) réalités et recherches

### 4-1)Caractéristiques liées à la spatialisation

\* Le son d'un seul tuyau a pour caractéristiques:

- d'être perçu à intensités différentes suivant que l'endroit où l'on se place mais pas du tout en s'en éloignant

- d'être assez pénible à entendre sur la durée

Les raisons : c'est un son quasiment sinusoïdal, donc entêtant sur la durée d'autant plus qu'il sort à très haute intensité sonore (on a parfois 'impression d'avaler ses propres paroles lorsque l'on essaie de parler) . Par ailleurs il s'établit des zones de pressions acoustiques sous forme de grandes vagues d'ondes qui diminuent quand on s'éloigne et qui s'intensifient à nouveau lorsqu'on s'éloigne un peu plus !, puis s'atténuent, puis remontent etc. et se réfléchissent aussi sur les murs créant de curieuses sensations.

\* Le son de plusieurs tuyaux a lui d'autres caractéristiques : construits sur des harmoniques des notes basses on obtient des sons plus riches et plus supportables. Mais surtout les tuyaux qui sont à l'unisson, à la quinte, à la quarte ou même qui sont séparés par un demi-ton vont interférer les uns sur les autres et les hauteurs varient légèrement avec la chaleur il va se produire des battements.

Ces battements sont plutôt intéressants musicalement et aussi physiquement.

Si l'on fait jouer des tuyaux qui émettent des notes autour de 100Hz et bien sûr en dessous, les battements sont à la fois puissants et quasi inaudibles et ce sont les membranes musculaires qui les font ressentir car ils entrent dans les domaines des infra-sons sans l'on entende leurs partiels (si c'est par les os on est mal , si c'est par les poumons on est mort)

Les auditeurs ressortent souvent interloqués des petits concerts ou démonstrations que j'ai fait

Je les invite donc souvent à se déplacer dans l'installation car les zones de pressions acoustique deviennent alors très changeantes et les sons perçus ou ressentis sont pour le moins inhabituels.

## 4-2) Autres caractéristiques et particularités

Les Thermophones sont ici des tuyaux (de 10cm à 3m de longueur) munis d'un échangeur de chaleur utilisant de hautes températures (200 à 800°C) à ne pas confondre avec les Pyrophones qui fonctionnent avec des brûleurs à gaz et la nécessité de la convection. Les deux sont cependant liés à des lois physiques semblables venant de la science thermo-acoustique.

Les Thermophones rassemblés en une sorte de jeu d'orgue (pour le moment une quarantaine de tuyaux de 60 à 600 Hz) ont plusieurs caractéristiques assez originales que je peux résumer pour le moment à ces cinq points :

4-2-1- nature acoustique : émission de son où la fréquence fondamentale est très dominante et dont le volume émis est puissant (95 à 105 db à 1m). Cette puissance peut être modulée par des volets aux extrémités des tuyaux.

4-2-2 - positionnement : émission de sons à partir de simples tuyaux (en acier , aluminium ou verre) qui, reliés sans soufflerie par un fil électrique, peuvent se placer indépendamment les uns des autres donc s'adapter à l'acoustique d'un lieu et permettre une écoute naturellement spatialisée.

4-2-3 - latence importante avant le déclenchement du son (4 à 40 secondes) si on déclenche l'instrument par chauffe de l'échangeur de chaleur à partir de la température ambiante mais presque instantanée si on opère mécaniquement sur un tuyau où l'échangeur est déjà chauffé. De même, la latence du son après l'arrêt de la chauffe est importante et peut être maîtrisée mécaniquement.

4-2-4 - variation fine de la fréquence émise donc de la note de chaque tuyau en fonction des variations de températures à l'intérieur des tuyaux.

## 4-3) Recherche technique et acoustique en cours:

4-3-1) Les échangeurs de chaleur ou « stacks » peuvent être de natures très variées. Des recherches diverses ont été réalisées et sont faites dans les laboratoires scientifiques et nous en avons aussi développés de notre côté, mais les paramètres d'efficacité acoustique, de coût, de fiabilité, de sécurité et de commodité ne sont pas encore réunis sur un modèle standard et sont à maîtriser pour l'avenir.

Problèmes des stacks : ils doivent être perméables au flux d'air, la résistance ne doit pas non plus avoir un volume qui le freine donc:soit systèmes fait maison, (travail d'orfèvrerie et très dangereux, soit systèmes industriels non adaptés , couteux , encombrants mais sécurisés .

4-3-2) L'accord de base et l'accord fin des tuyaux se fait actuellement sur les principes des tuyaux en bois des orgues classiques mais peut se faire par d'autres techniques utilisant des glissières avec des graisses haute température.

4-3-3) Des supports de tuyaux permettant de les placer et déplacer facilement et permettant leur manipulation (jeux avec des gants, inclinaison) ont été développés et utilisés mais ce ne sont que des prototypes et leur amélioration est en cours.

4-3-4) La mécanisation permettant de contrôler les attaques, les durées et les intensités, reste un gros chantier ainsi que le contrôle des températures. Des prototypes sont à l'étude et la généralisation de ces systèmes, permettant un jeu sur « clavier » ou à réaction robotique directe demandera des financements complémentaires pour un jeu complet de tuyaux.

4-3-5) L'objectif de ces recherches techniques est de mettre au point des modèles de Thermophones qui seront musicalement plus avancés que les prototypes actuels et surtout qui seront facilement reproductibles.

## 5) Spatialisation

Les Thermophones se prêtent facilement à des installations où le public va être immergé physiquement dans de multiples sources sonores naturelles.

Les Thermophones peuvent se placer indépendamment les uns des autres et donc s'adapter à l'acoustique d'un lieu et permettre une écoute naturellement spatialisée.

Techniquement chaque tuyaux n'a besoin que d'un support et d'un câble. Pas de soufflerie et l'on peut même munir les tuyaux d'un mini-parapluie pour des installations en extérieur.

Suivant la sophistication de ce qui est demandé au Th, il sera simplement mis en chauffe distance, ou bien joué avec plus de nuances s'il est manipulé par un musicien ou bien encore automatiquement s'il est muni de clapets manoeuvrés par moteurs pas à pas et percuteurs actionnés par électro-aimants.

Il faut aussi considérer le curieux phénomène des changements d'intensité (variations de pressions acoustiques) qui diminuent puis ré-augmentent, etc. comme des longues vagues immobiles lorsque l'on s'éloigne des sources.

De plus le phénomène des battements qui produisent un troisième son puissant et

parfois trop grave pour être perçu uniquement par les oreilles donne des sons et des sensations qui varient suivant l'endroit où l'on se trouve

C'est pourquoi , lors de chaque présentation je propose au public de circuler lentement dans les installations.

## **6) Recherche artistique : écriture et construction**

L'écriture musicale sur ces instruments est pour le moment de deux types:

- connaissant les latences avant le déclenchement du son (L.A.S.) et son arrêt après coupure (L.S.A.C.) une écriture sur séquenceur permet de prévoir et d'ajuster le démarrage et la fin des sons. Une écriture basée sur des délais directement sur un logiciel comme MAX est aussi relativement aisée. Par ailleurs, le pilotage par ordinateur se fait directement avec les protocoles Midi et surtout DMX.

- la manipulation de chaque tuyau avec des gants par un exécutant ou un improvisateur permet de jouer des Thermophones avec nuance et précision.

Les premiers essais de Thermophones développés à partir d'un prototype envoyé par Steve Garret (Penn State University) m'ont tout de suite fait envisager des créations à partir de ce type d'instruments qui s'est révélé beaucoup plus intéressant que les pyrophones que j'avais pratiqué (créations en 2007, 2008, 2009).

En effet la nature très particulière de ces sons, les possibilités de les maîtriser, de les moduler m'ont ouverts divers pistes que j'ai à peine commencé à explorer et que d'autres personnes m'ont aussi suggéré.

### 6-1) Partition pour musiciens ou exécutants maniant les Thermophones manuellement

L'intervention des mains sur les extrémités des tuyaux permet des modulations en volume et en attaque qui donnent la sensation de « pétrir » le son.

J'ai donc expérimenté des improvisations avec 1 ou 2 tuyaux par participants, les tuyaux étant en chauffe constante. Une réalisation a été faite lors d'un concert avec la Cie Décor Sonore : 2 jeux de 4 Thermophones étaient manipulés aux deux extrémités du tunnel de la rue Watt (75013 Paris), et ont joué toute une soirée avec plusieurs musiciens qui déambulaient dans le tunnel, appuyés par une diffusion électroacoustique de Michel Risse.

J'envisage donc de développer des créations, donc des écritures pour ce type de

musique, avec la participation d'autres musiciens.

Par ailleurs les structures portantes des Thermophones permettent d'incliner les tuyaux sur presque 360°. Ceci provoque aussi des variations dans le son.

Le geste des manipulateurs les saisissant et toute leur gestuelle pour déclencher et moduler le son m'amène aussi à une réflexion sur un aspect plus ou moins chorégraphique de ces actions.

#### 6-2) Jeux automatisés avec percussions bois et carillon tubulaire

Sans manipulateurs j'ai expérimenté des mini-concerts lors de la Biennale du Mans (décembre 2019) avec une quarantaine de Thermophones, relativement accordés et des percussions mécanisées sur wood-blocks. Le contraste entre les nappes de sons longs des Thermophones et les percussions sèches et rythmées m'a permis d'ouvrir l'écoute des Thermophones à un autre niveau que mes précédentes installations de « tuyaux aux sons étranges ». Je veux développer cette matière et l'étape suivante sera d'y mêler un carillon tubulaire de 40 notes, à baguettes lumineuses, que j'ai construit il y a quelques années.

Ceci ouvre des perspectives d'installation et de concerts automatiques, les wood-block (appelés Pic-Verts) et les Carillons (Carillons\_N°3 créés en 2001) pouvant eux aussi être placés dans l'espace sans autre contrainte qu'un fil électrique.

#### 6-3) Jeux avec instruments acoustiques

Indépendamment des manipulations une des pistes que je veux explorer est le son des Thermophones avec des instruments de musique acoustiques.

Un projet avec un instrument acoustique monumental tel qu'un orgue baroque ou romantique peut aussi s'envisager.

Les instruments doivent rester acoustiques car la magie des Thermophones sans mécanismes visuels disparaît dès que la musique est aussi produite par des haut-parleurs : le public pense que le son provient uniquement des HP et que les tuyaux ne sont là que pour le décor. Ceci limite les possibilités de passer au Stade de France, mais les possibilités d'écriture musicale Thermophones/Instruments acoustique restent pour moi une des bases les plus importantes à développer.

#### 6-4) Thermophones et voix

La rencontre avec plusieurs chanteurs, choristes et chefs de chœur m'a fait découvrir leur intérêt à vouloir exercer leur art en conjugaison avec les Thermophones et cela reste pour moi un domaine à explorer aussi passionnant qu'avec les instruments acoustiques. La capacité des Thermophones à tenir des basses continues « vivantes » n'est pas pour rien dans cette attirance. J'ai effectué quelques simulations avec des enregistrements de chants bulgares, mais ce ne sont que des pistes à explorer.



Par ailleurs, au seuil de l'instabilité thermoacoustique les Thermophones peuvent se déclencher à la voix ! Ce qui ouvre de nombreuses possibilités d'installations ou de jeux..

#### 6-5) Reprise des sons par microphones

A contrario de ce que j'ai affirmé plus haut sur l'incompatibilité de la présence de haut-parleurs avec les Thermophones, j'ai pensé que, au contraire, la présence affirmée de capteurs sur les tuyaux pouvait permettre des développements musicaux très intéressants.

J'imagine les Thermophones dispersés de telle manière que le public soit entouré ou dans une sorte de forêt et que leurs chants se trouve par moments transposés dans des sons très différents mais très liés à leur origine, diffusés par une installation électroacoustique.

J'imagine aussi que la direction de ces multiples productions sonores qui vont former une deuxième strate musicale soit pilotée par un ou des « chefs d'orchestres » munis de systèmes type Camera Musicale.

Bien sûr les capteurs pourront être utilisés aussi pour générer des « vagues » vidéo à partir des ondes sinusoïdales des tuyaux, donc un travail avec un(e) vidéaste.

#### 6-6) Extérieur

La puissance des Thermophones permet d'envisager aussi ces diverses formes de jeux musicaux en extérieur, en prenant la précaution de sécuriser les orifices contre les intempéries.

Enfin les perspectives de jeux et d'écriture sur de futurs Thermophones robotisés (répondant sans latence à un clavier ou un ordinateur comme un jeu d'orgue et avec nuances d'intensité) : toutes les pistes précédentes autres qu'avec manipulation pourront bien sûr être exploitées mais un tel instrumentarium ouvre de nombreuses autres possibilités en particulier aussi avec des procédés utilisant des systèmes de commande comme la Camera musicale.

### **8) Quelques exemples de concerts et installations**

FILMS et Photos

### **9) Conclusion**

J'ai essayé de vous décrire à la fois la nature de la matière sonore des

Thermophones, pour ceux qui ne la connaissent pas et les stades où j'en suis dans cette aventure.

Techniquement le cap à franchir est d'une part la réalisation d'échangeurs de chaleur, des « stacks » performants et faciles à reproduire et d'autre part la télécommande ou robotisation des attaques et variation de volume des tuyaux. Un des objectifs est de pouvoir donner les indications pour que des ensembles de thermophones puissent être s-construits un peu partout où on envie de jouer avec ces singuliers tuyaux.

Musicalement il s'agit de ne pas faire fuir le public (!), mais de continuer à l'enchanter et aussi d'expérimenter les nombreuses combinaisons d'écriture et d'improvisation qui sont possibles avec des musiciens et d'autres sources sonores.

Au niveau de la spatialisation, et c'est la frustration de cette communication en distanciel (!), j'espère que vous avez pu comprendre que c'est un atout majeur des Thermophones.

Et donc si vous voulez participer à l'aventure nouvelle des Thermophones, [contactez moi](https://jacques-remus.fr/contact/). (https://jacques-remus.fr/contact/)

<https://jacques-remus.fr>  
ou <https://mkz.fr>

Videos (copiez-collez les liens si pas de réponse au clic)

2016 : DIY Steel wool thermoacoustic engine

[Institut d'Acoustique Graduate School - IAGSLeMans](https://www.youtube.com/watch?v=owbjLWrC86g)

<https://www.youtube.com/watch?v=owbjLWrC86g>

Build your own standing wave thermoacoustic engine using only a test tube and some steel wool.

Listen to the sound generated by the mean of a temperature gradient through a porous material.

2019 : Thermophones Jacques Rémus Biennale Le Mans Sonore 3'34 "

<https://vimeo.com/391952984>

Reportage journalisme scientifique : les Thermophones

2017 Reportage Julie Desriac et Léa Nanni, étudiantes en Journalisme scientifique, Université Paris VII (Diderot), 8' 40"

<https://www.youtube.com/watch?v=wowc2FyUvrl>

Thermophones Curiositas2017

Les Thermophones, film présenté au Festival Curiositas 2017 montrant avec démonstration d'un prototype, le travail de recherche et de création artistique entre les équipe du CNRS et Jacques Rémus. 10'58 "

<https://www.youtube.com/watch?v=THPajH4X-Dw>

Thermophones 2 3'49"

2017 Thermophones Présentation au festival Curiositas (CNRS) et ateliers des Frigos.

<https://www.youtube.com/watch?v=C1uCXFMmeEU>

La Gestothèque : Jacques Rémus, outils, méthodes et matériaux 1 : La Caméra musicale 1'56"

<https://www.youtube.com/watch?v=x9ZQS-Zgv9I>