



# CONCOURS GÉNÉRATION ISS

## FIGURES DE CHLADNI

**Etablissement : IUT A Université Toulouse 3**

### **Equipe proposante :**

Chef de projet : Isaline BLEUSE

Membres de l'équipe : Florian ARMENGAUD, Lucile GUILHOT,  
Vincent MAILLARD, Tony OLEFF, Pierre-Yves LE CAM, Hubert  
MONCAYO

### **Fiche synthétique**

<b>Objectifs scientifiques/ technologiques</b>	L'apesanteur permet de <b>visualiser en 3D ce qui se visualise en 2D sur Terre</b> : les particules s'organisent selon les noeuds et ventres des ondes sonores. On obtient de nombreux motifs géométriques en fonction des différentes fréquences.
<b>Objectifs éducatifs</b>	Notions d'ondes (sonores, stationnaires), noeuds et ventres, ultrasons.
<b>Points forts</b>	Expérience esthétique permettant d'observer les modes propres 3D d'ondes
<b>Caractéristiques techniques</b>	Dimensions : < 20x10x10cm (2U) Poids : < 1kg Durée : 10 min



# SOMMAIRE

<b>Contexte de la proposition</b>	<b>3</b>
<b>Objectifs de l'expérience</b>	<b>4</b>
Principe de l'expérience	4
Objectifs scientifiques/éducatifs	4
<b>Description physique du phénomène des figures de Chladni</b>	<b>5</b>
<b>Description technique</b>	<b>7</b>
Description détaillée du dispositif	7
Activités opérationnelles et mesures à réaliser	13
<b>Caractéristiques techniques</b>	<b>14</b>
Liste du matériel nécessaire	14
Masse	14
Dimensions	15
Durée de l'expérience	15
Consommation électrique	15
<b>Budget</b>	<b>15</b>
Budget détaillé de l'expérience	15
Modalités de financement	16
<b>Planning prévisionnel</b>	<b>16</b>
<b>Gestion des risques/sécurité</b>	<b>18</b>
<b>Possibilité de plateforme avec autres expériences</b>	<b>18</b>
<b>Communication</b>	<b>21</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>23</b>



# I. Contexte de la proposition

Depuis Septembre 2018 des étudiants de première et deuxième année de DUT ainsi que des enseignants de l'IUT Mesures Physiques, au sein de l'Université Paul Sabatier à Toulouse, s'investissent dans la création, la conception et le développement d'expériences autour de l'apesanteur. Dans le cadre du concours Génération ISS, nous sommes une cinquantaine d'étudiants à travailler sur une dizaine d'expériences, dont celles décrites dans ce dossier. Celles-ci ont pour but d'illustrer des principes de physique, chimie, matériaux, en mettant en évidence l'influence de la gravité et cela de manière didactique et visuelle.

La formation DUT Mesures Physiques est une formation pluridisciplinaire technologique et professionnalisante alliant physique, chimie, matériaux, instrumentation et informatique. Elle forme au métier de technicien supérieur des étudiants issus de bac général mais également de bac technologique (STI2D, STL), filières dont certains participants de notre groupe sont issus. L'approche projet est en particulier au coeur de la formation, ce qui nous a permis de gagner plusieurs concours ces dernières années (Thackavoir" 2018, ainsi que les Challenge National Mesures Physiques 2018 et 2019). Par ailleurs, le département Mesures Physiques a des compétences fortes dans l'automatisation de bancs de test ainsi que dans les approches qualité et métrologie au travers de ses deux licences professionnelles ITEC (Instrumentation et Tests en Environnement Complexe) et MQM (Métrologie et Qualité de la Mesure).

Afin de compléter nos compétences nous avons mis en place un partenariat avec le département Génie Mécanique et Productique. Ils nous aident dans la conception en nous conseillant, et en nous donnant accès à leurs locaux et à leur matériel.

En vue de garantir la fiabilité de nos expériences, les étudiants et enseignants participants ont interagi et demandé des conseils auprès du service CADMOS du CNES. Certains enseignants-chercheurs du département Mesures Physiques, spécialisés dans des domaines tels que le spatial (Institut de



Recherche en Astrophysique et Planétologie à Toulouse, l'IRAP), ou encore la physico-chimie des systèmes organisés (Laboratoire des Interactions Moléculaires et Réactivités Chimiques et Photochimiques, les IMRCP) ont pu apporter leurs expertises aux différents projets. Des collaborations ont également été mises en oeuvre avec des laboratoires comme l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), le Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse (LGC) et le Laboratoire de Physique des Solides (LPS) d'Orsay.

## II. Objectifs de l'expérience

### 1. Principe de l'expérience

Des ondes sonores envoyées dans une boîte fermée se réfléchissent sur l'ensemble des parois pour former un réseau 3D complexe d'ondes stationnaires. Le but de cette expérience est de visualiser les noeuds et ventres de ces ondes au moyen de fines particules. Ces particules (sel ou sable) se déposent naturellement là où les ondes présentent le moins de pression, à savoir les noeuds de pression. L'expérience a déjà été réalisée sur Terre en deux dimensions à de nombreuses reprises<sup>2</sup>. En effet, en déposant des particules fines (sable par exemple) sur une plaque vibrante (*figure 1*), on peut voir apparaître des figures que forme le sable en se plaçant selon les noeuds des ondes, là où la plaque ne vibre pas.

Mais reproduire cette expérience dans l'espace, donnerait lieu à un tout autre résultat. N'étant plus soumis à la gravité terrestre, les particules que l'on place dans un tube seraient déjà en suspens dans l'air et en les soumettant à des ultrasons, on observerait alors des nouvelles figures en 3D.

### 2. Objectifs scientifiques/éducatifs

- Objectifs scientifiques : Cette expérience a pour objectif principal de visualiser les figures de Chladni en trois dimensions. Sur Terre, l'expérience n'est pas réalisable en 3D car les particules sont trop lourdes pour visiter l'ensemble des noeuds du système. Seules des simulations et des calculs théoriques lourds ont pour l'instant permis de modéliser les ondes stationnaires en 3D dans une cavité quelconques<sup>4</sup>.



- Objectifs éducatifs : L'expérience présentée ci dessus permet de part son côté visuel, simple et didactique d'avoir une première approche des ondes et de les observer. A partir de cette observation, il sera donc plus aisé de comprendre le principe et le mécanisme des ondes stationnaires. Ainsi, au niveau éducatif, nous obtiendrons des résultats visuels pour expliquer et voir les interférences constructives et destructives des ondes en 3 dimensions sans gravité.

### III. Description physique du phénomène des figures de Chladni

#### 1. Description du phénomène scientifique sur Terre

L'expérience présentée dans ce dossier s'appuie sur le phénomène des figures de Chladni. A l'origine de ce phénomène, on retrouve les ondes stationnaires et leurs caractéristiques.

Les ondes stationnaires résultent de la propagation simultanée de plusieurs ondes dans des sens opposés. Cela a pour conséquences de créer des noeuds et des ventres réguliers et contrôlables dû à la fréquence de celles-ci.<sup>1</sup>

Dans le cadre de l'expérience sur Terre, lorsque l'on fait vibrer une plaque sur laquelle on place des particules comme du sable, on observe des endroits où elle ne vibre pas (les noeuds, zones où il y a dépôt de matière) et d'autres où au contraire les vibrations sont fortes (ventre, avec des zones où il n'y a pas de dépôt de matière) en fonction de ses dimensions propres : ce sont les ondes stationnaires. Ceci entraîne par la suite une agglomération de particules dans les lieux non vibrants permettant ainsi la création de formes variant selon la fréquence: les figures de CHLADNI (cf.figure 1). De plus, comme cette fréquence est responsable du nombre de ventres et de noeuds (cf. figure 2) pour une distance donnée, les formes créées changent dès que l'on change cette fréquence d'ondes sonores.



Figure 1 : Figure de CHLADNI  
(figure en 2D, sable sur plaque vibrante)

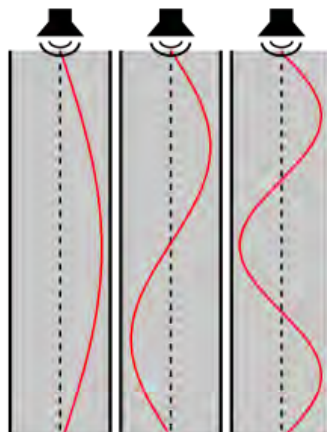


Figure 2 : Ultrason avec différentes longueurs d'onde

Sur l'image ci-dessus, on voit des ondes ayant des longueurs d'ondes différentes. En effet, on peut faire varier le nombre de noeuds et de ventres attendus en changeant la longueur d'onde, étant donné qu'elle dépend de la fréquence. Pour pouvoir réaliser correctement l'expérience, il faut que les ondes se réfléchissent totalement sur la surface en face de l'émetteur. Dans les prototypes auxquels nous avons pensé (cf: *description technique*), l'émetteur se trouve dans un tube, ainsi, en plus de se réfléchir à l'extrémité du tube, les ondes vont rebondir sur les parois latérales et on verra le même phénomène se produire latéralement. Il y aura donc des ondes stationnaires verticales et horizontales, ce qui créera le réseau 3D complexe que nous souhaitons visualiser.



## IV. Description technique

### 1. Description détaillée du dispositif

Le dispositif embarqué à bord de l'ISS comportera :

- un tube transparent dont les dimensions seront définies ultérieurement mais qui ne dépasseront pas 20x10x10 cm (2U).
- des émetteurs ultrason émettant entre 20 et 40 kHz, disposés à la base du tube.
- une paroi en métal au sommet du tube permettant la réflexion des ondes et dont la position au sommet pourra être réglée de manière à modifier une des dimensions.
- une partie électronique comprenant un microcontrôleur, un module de puissance pour alimenter les émetteurs ultrason ainsi que l'alimentation électrique composée de piles.
- suivant l'option choisie, une caméra de faible encombrement et solidaire du tube pour filmer les motifs.
- un moteur pas-à-pas afin de pouvoir déplacer la paroi supérieure en métal.

Idéalement nous aimerions que le dispositif soit assemblé pour l'acheminement à bord de l'ISS. L'électronique, la pile, et les émetteurs ultrason seront localisés à la base du tube, vis et moteur, pas à pas et paroi en métal seront en haut du tube.

dans le cas où l'expérience serait acheminée démontée, le dispositif sera en trois pièces : la partie basse, le tube et la partie haute.

Ce dispositif expérimental a pu être défini et dimensionné à l'aide de prototypes et de simulations que nous avons réalisés. Nous présentons maintenant les différents prototypes développés pour valider cette solution.

#### a) Description du matériel

Le prototype actuel (cf. figure 3) est composé de plusieurs parties :

- Le tube en plexiglas permettant l'étanchéité du système et dans lequel on place les particules
- la plaque en plexiglas à l'extrémité basse du tube pour fermer complètement le système

- l'émetteur à ultrasons entouré de la plaque de plexiglass afin d'assurer l'étanchéité du dispositif
- un disque en métal au-dessus de l'émetteur pour permettre la réflexion des ondes
- la vis permettant de régler la distance entre le disque en métal et l'émetteur

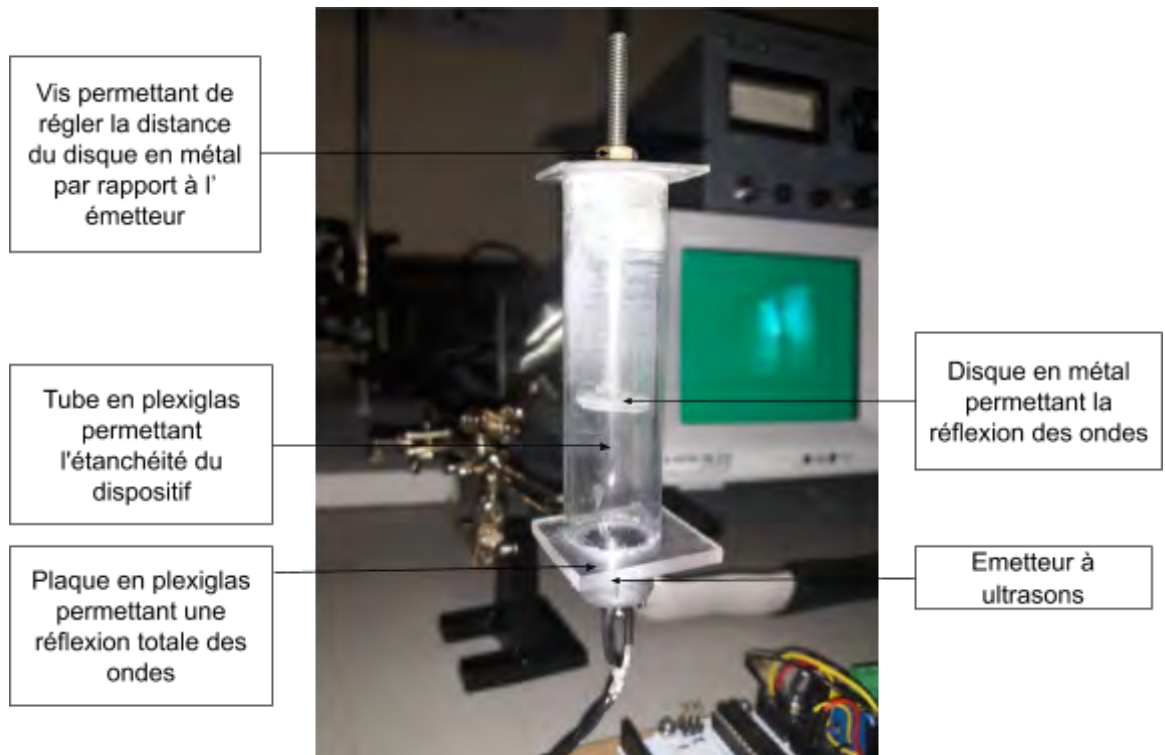


Figure 3 : Vue d'ensemble du dispositif

Ce dispositif est relié via des fils de branchement à une plaquette contenant les appareils électroniques (cf. figure 4) :

- la carte Arduino Uno programmée pour faire fonctionner l'émetteur
- le module de puissance provisoire
- les fils d'alimentation reliés à un générateur
- les sorties analogiques pour émetteur



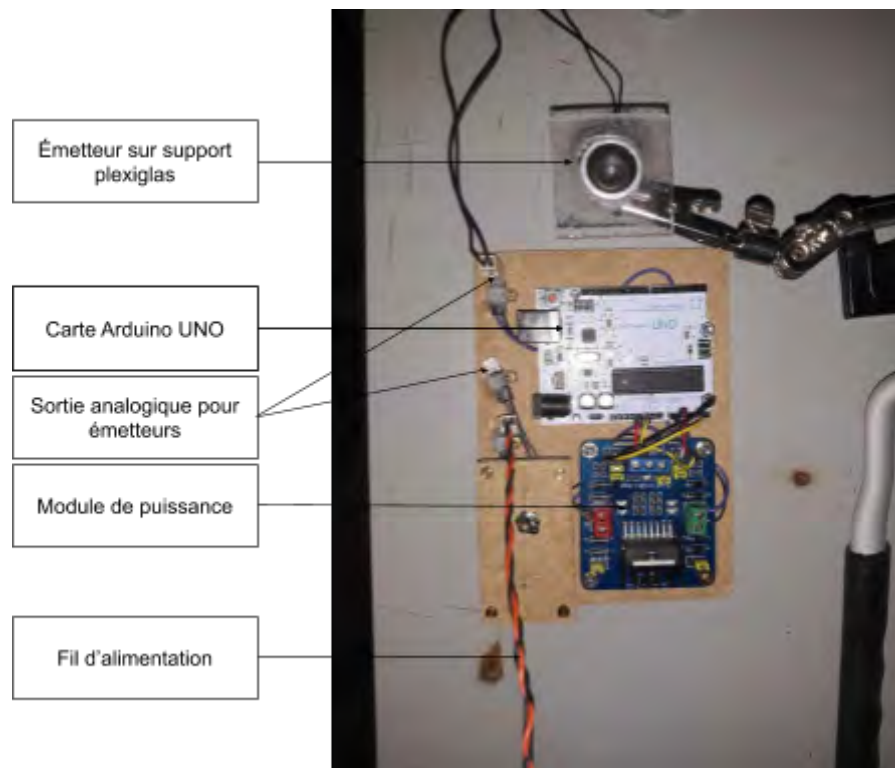


Figure 4 : Vue de dessus du système

### b) Déroulement des phases de tests

La construction de ce prototype devait répondre à une double problématique :

- Comment obtenir des ondes sonores dont les longueurs d'ondes restaient compatibles avec les contraintes imposées dans le cadre du projet génération ISS ?
- Quelle géométrie imposer pour obtenir des ondes stationnaires en 3D ?

Les longueurs d'onde classiques des ondes sonores audibles étant de l'ordre de plusieurs dizaines de centimètres, le dispositif aurait nécessité un tube d'environ un mètre de hauteur. Pour cette raison, nous nous sommes orientés vers les ultrasons, de fréquence supérieure à 20 kHz, qui produisent des ondes de longueurs d'onde caractéristiques de quelques centimètres. Ce choix technique nous permet d'avoir actuellement un tube de 5cm de long.

[https://www.youtube.com/watch?v=zVN-g9TwsjU&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7\\_vpA&index=4](https://www.youtube.com/watch?v=zVN-g9TwsjU&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7_vpA&index=4)

Pour créer des ondes stationnaires, deux solutions sont à priori possibles : mettre deux émetteurs ultrasons l'un en face de l'autre (cf. figure 5) ou un émetteur en face d'une paroi réfléchissante (cf. figure 6). Nous avons pu grâce à notre prototype, voir que ces deux méthodes se valaient et que le plexiglas, comme le métal, pouvait servir de paroi réfléchissante.

[https://www.youtube.com/watch?v=2tjrCifOHw&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7\\_vpA&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=2tjrCifOHw&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7_vpA&index=5)

[https://www.youtube.com/watch?v=bWL4FD0n0UA&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7\\_vpA&index=6](https://www.youtube.com/watch?v=bWL4FD0n0UA&list=UUeFmu5-TfVi2v6VxEE7_vpA&index=6)



Figure 5 : Test avec 2 émetteurs face à face

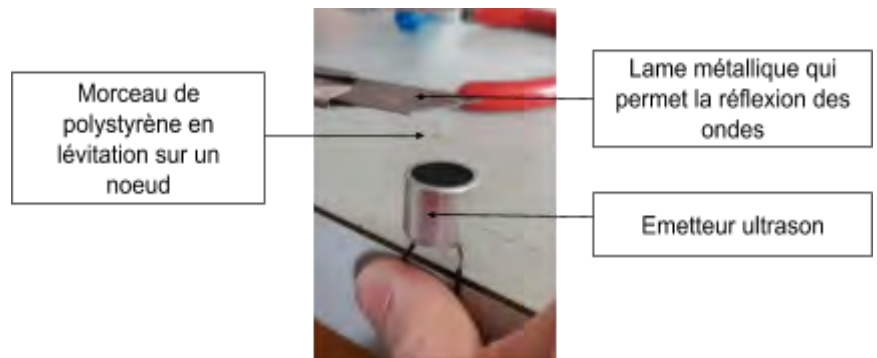


Figure 6 : Test avec un seul émetteur

L'observation de noeuds de pression, dans lesquels nos objets lévitent, nous a conforté dans nos choix technologiques. Nous avons pu vérifier expérimentalement que la fréquence ou la position entre l'émetteur et la surface réfléchissante changeait la position des noeuds de pression et donc les positions de stabilité des particules que nous introduisons dans le dispositif. Cependant, pour observer des figures en trois dimensions, les réflexions des ondes doivent se faire dans toutes les directions. L'ajout d'une enceinte de plexiglas, servant à la fois de conteneur pour les particules et de réflecteurs pour les ondes, nous a permis de voir différentes ondes et différentes positions de stabilité. Deux choix d'enceinte sont actuellement en cours de tests :

- un tube de plexiglas de diamètre assez faible (environ une longueur d'onde de diamètre) qui permet uniquement de voir les noeuds dans la direction longitudinale à la direction d'émission de l'émetteur (cf. figure 7).
- une enceinte parallélépipédique de quelques longueurs d'onde de côté qui permet l'observation 3D des ondes stationnaire.

Cette dernière configuration sera certainement celle retenue pour l'étude finale car elle seule permet l'observation complète de motifs 3D. La solution cylindrique permet néanmoins d'observer les positions 1D des ondes pour valider les choix techniques et le contrôle des émetteurs via l'électronique.



Figure 7 : Dispositif avec le tube cylindrique

L'optimisation de la partie émettrice est également en cours de réalisation. Nous testons différentes géométries avec un ensemble d'émetteurs selon diverses configurations afin de pouvoir observer l'effet de l'onde émise sur la géométrie des ondes stationnaires (cf. figure 8).

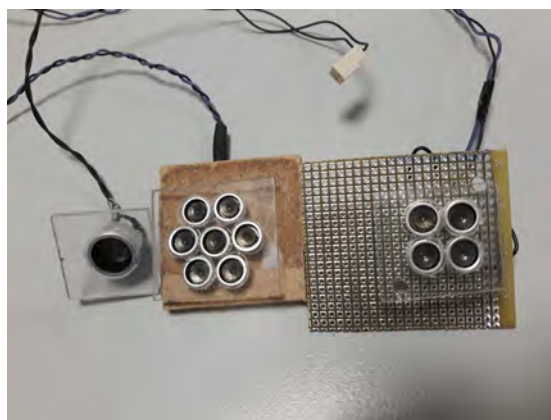


Figure 8 : Différentes dispositions des émetteurs

Pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu dans les différents cas (système ouvert, fermé, un émetteur ou plus) nous avons développé une simulation 3D sur la base de l'algorithme TLM<sup>4</sup> (Transmission Line Matrix) afin de visualiser les ondes acoustiques. Nous avons donc pu mieux comprendre les phénomènes de surpression et de basse pression des ondes ultrasonores ainsi que l'établissement des ondes stationnaires en 3 dimensions. Cette simulation nous permet de visualiser très fidèlement les figures que nous devrions observer à bord de l'ISS.

Sur la capture d'écran de la simulation (image 9) nous pouvons visualiser les différents noeuds et ventre, suivant la longueur d'onde à laquelle nous nous trouvons. Une animation du champ de pression à différentes longueurs d'ondes est disponible sur le lien suivant <https://www.youtube.com/watch?v=kiRwCDE9pZA>

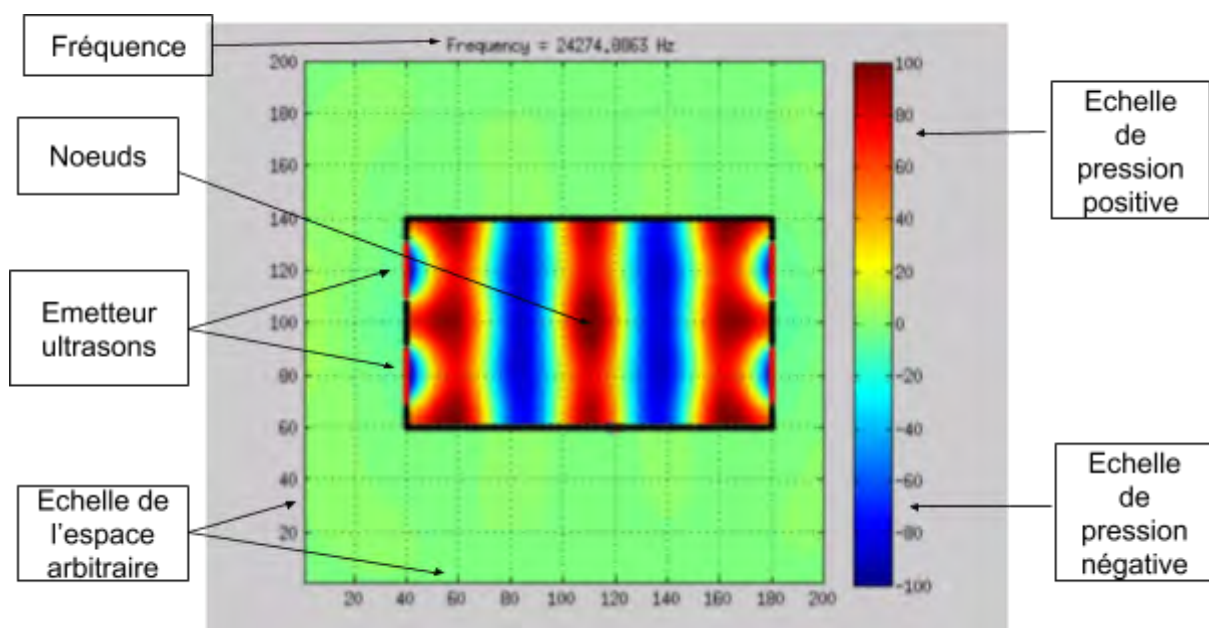


Figure 9 : Simulation permettant de visualiser le champ de pression spatial à une fréquence de 24 kHz. Les axes  $x$  et  $y$  représentent les dimensions spatiales en unités arbitraires. L'échelle de couleur représente le champ de pression en unité arbitraire.

Dans le cas où l'expérience serait sélectionnée, nous continuerons notre effort de simulation pour modéliser l'effet du champ de pression sur les particules dans la



géométrie choisie pour l'ISS. Cette simulation permettra une comparaison directe avec les observations faites à bord de l'ISS.

## 2. Activités opérationnelles et mesures à réaliser

### Manipulation à bord de l'ISS:

Soit l'expérience est acheminée à bord de l'ISS déjà montée auquel cas l'astronaute n'aura qu'à appuyer sur un bouton pour que l'expérience démarre automatiquement.

Soit l'expérience est acheminée démontée et l'astronaute devra monter le dispositif pendant un temps que l'on estime à moins de 2 min. L'expérience démontée sera constituée de trois parties :

- l'embase rassemblant, la pile, l'électronique et les émetteurs ultrason
- le tube
- la partie haute constituée de la vis, du moteur pas à pas et de la plaque métallique réfléchissante.

L'astronaute assemblera l'embase et la partie haute au tube et connectera électriquement la partie haute à l'embase.

L'expérience se déroulera en deux phases.

Phase 1 : La carte arduino aura été programmée pour faire varier la fréquence automatiquement de la plus petite à la plus grande possible, ce qui permettra de balayer toute une plage de fréquence et de voir l'évolution des ondes stationnaires dans le tube pour une géométrie donnée. La durée de cette phase peut être facilement paramétrée en fonction de la gamme de fréquence balayée. Cette phase devrait durer moins de 5 mn

Phase 2: La fréquence sera gardée fixe et la paroi supérieure bougera automatiquement, actionnée par le moteur pas à pas, afin de modifier la géométrie du tube et donc les ondes stationnaires susceptibles d'apparaître.

### **Mesures**

Les mesures sont exclusivement des mesures optiques. Deux options sont alors possibles. Une caméra peut être intégrée au dispositif et solidarisée au tube afin d'enregistrer sur carte microSD les différents motifs apparaissant durant les deux



phases de l'expérience. Nous pouvons aussi utiliser les moyens de captation présent à bord de l'ISS.

## V. Caractéristiques techniques

### 1. Liste du matériel nécessaire

La liste du matériel nécessaire pour l'expérience est détaillée ci-dessous :

- Plaque inférieure supportant les émetteurs ultrason, la carte arduino, le module de puissance pour alimenter les émetteurs. ce support peut être réalisé en impression 3D et sera conçu par le département Génie Mécanique et Productique (GMP) de l'IUT de Toulouse.
- Carte arduino micro ou nano
- Alimentation électrique pour la carte arduino et le moteur (Pile 9v)
- Émetteurs à ultrasons TR4010T (nombre à définir)
- Module de puissance intégré à la plaque inférieure (L298n H-Bridge)
- Tube en Polycarbonate: dimensions à définir mais inférieures à 2U
- Sel ou autres particules à faire léviter
- Plaque métallique (jouera le rôle de miroir, pour assurer la réflexion des ondes)
- Vis pour système de réglage de hauteur de la plaque réfléchissante système d'entraînement et moteur pas à pas

### 2. Masse

La masse dépendra du dimensionnement du système mais ne devrait en aucun cas dépasser 1kg.

- plaque inférieure et ses composants : 250 g
- Tube en polycarbonate : 30g
- Fils de connexion : masse négligeable
- particules : 1g
- plaque supérieure, système d'entraînement et moteur : 200 g
- alimentation ou pile 9v : 50 g



Masse totale < 600g

### 3. Dimensions

A 20 kHz la longueur d'onde est de  $\lambda=1.75$  cm. Pour observer des ondes stationnaires le système devra être dimensionné de manière à pouvoir “contenir” plusieurs longueurs d'ondes dans toutes les dimensions. Un tube de  $5\lambda \times 4\lambda \times 3\lambda$  soit  $8,75 \times 7 \times 5.25$  cm permettrait de visualiser des ondes stationnaires dans les trois directions de l'espace.

### 4. Durée de l'expérience

La réalisation de cette expérience dans sa globalité demande **10 minutes**. Le temps demandé à l'astronaute sera très inférieur à cette durée car seuls la mise en place et le lancement de l'expérience lui seront demandés.

### 5. Consommation électrique

Pour la carte arduino on comptera donc une puissance inférieure à 4W. Les émetteurs branchés sur la carte arduino sont comptés avec elle pour la consommation. Enfin, pour la caméra, la puissance requise dépendra du modèle utilisé, pour le cas d'une GoPro, la puissance consommée par la caméra serait de moins de 1W.

## VI. Budget

### 1. Budget détaillé de l'expérience

Le budget présenté ci dessous pour cette expérience, est le budget des éléments de phases de tests <sup>3</sup> :

- Carte arduino nano ou micro < 20€
- Émetteurs ultrasons (l'unité): ( TR4010T) = 2,50€
- Module de puissance : <10€
- moteur pas à pas : <10€



Le budget global du matériel nécessaire est donc inférieur à 100 €.

Les parties mécaniques et électroniques seront réalisées par les départements Génie Mécanique et Productique et Mesures Physiques de l'IUT de Toulouse. En tenant compte du prototypage et des tests, ainsi que des éventuelles modifications et de la réalisation de la version finale de l'expérience en double (une sur Terre et une sur l'ISS), le budget final peut être estimé à 1000 €.

## 2. Modalités de financement

Le département Mesures Physiques (MP) consacre une partie de son budget au financement du projet, et y a déjà contribué à hauteur de 2500€. Des entreprises, versant déjà la taxe d'apprentissage à notre département, ont par ailleurs été contactées pour apporter un soutien financier aux projets.

De plus, le département Mesures Physiques met à disposition son matériel et les produits nécessaires à la réalisation du projet. Les départements GMP (Génie Mécanique et Productique) et GEII (Génie Electrique et Informatique Industrielle) apportent un soutien technique et humain pour le développement de chaque expérience proposée par l'IUT MP.

Dans le cas d'une sélection, une équipe étudiante sera entièrement consacrée à la recherche active de financement auprès de partenaires déjà identifiés (institutionnels, industriels et privés).

Nous avons donc la capacité de financer l'expérience, d'autant plus que le budget global nécessaire est faible et qu'une grande partie du matériel est disponible dans le cadre de la formation. Toute la partie mise en sécurité de l'expérience sera confiée au CNES.





## VII. Planning prévisionnel

### **20 Juin 2019**

Sélection des projets gagnants.

### **Juin 2019**

Modification des équipes avec intégration de nouveaux étudiants.

Recherche de collaborations techniques extérieures supplémentaires si nécessaire.

Continuation de la programmation de la carte arduino pour transférer les codes permettant de faire varier la fréquence des émetteurs à intervalles de temps connus.

### **Juillet - août 2019**

Identification du matériel déjà disponible dans l'ISS pour réduction de coût/masse.

Recherche de solutions en vue du prototypage : choix de la forme définitive du tube, gestion de l'étanchéité.

### **Septembre-novembre 2019**

Fabrication du prototype et tests de fonctionnement du dispositif.

Développement de la simulation numérique pour modéliser très fidèlement le résultat attendu à bord de l'ISS.

### **Décembre 2019**

Finalisation de la version finale du dispositif.

### **Janvier 2020 – Juin 2020**

Spatialisation du dispositif, mise en sécurité avec le CNES.

### **Juillet 2020 – fin année 2020**

Validation par le CNES et l'ESA.

Rédaction de procédures techniques.



De plus, le groupe communication & financement s'occupera de la recherche de partenaires financiers et de la communication interne/externe sur le projet.

## VIII. Gestion des risques/sécurité

Pour cette expérience, nous avons pris en compte les différents risques qu'elle pourrait présenter à bord de l'ISS. Pour cela:

- Nous allons placer le module dans une boîte en matériaux plastique afin d'hermétiser l'expérience. En effet l'élévation de ces particules soumises aux ondes sonores sera observables dans un tube en polycarbonate. Afin de sécuriser encore l'expérience, en cas de fuite non-intentionnelle des particules à observer une seconde protection est nécessaire. Cette boîte recouvrera donc l'entièreté du dispositif, mise à part une ouverture permettant d'accueillir la caméra pour garder des traces de l'expérience.
- Nous allons remplacer le PMMA (Plexiglas®), initialement prévu, par du polycarbonate, également transparent mais plus adapté à l'environnement de l'ISS car le PMMA est un produit facilement inflammable, donc à éviter.

Par ailleurs, la fiabilité de cette expérience a été confirmée par les multiples tests réalisés sur Terre et l'observation du changement des positions de noeuds bien visibles.

## IX. Possibilité de plateforme avec autres expériences

Comme précisé dans la partie intitulée "Contexte de la proposition" de ce dossier, notre formation (IUT Mesures Physiques) propose un ensemble d'expériences (9 au total) dont celle décrite en détails plus haut. Une équipe d'étudiants travaille



spécifiquement sur la création de plateformes sur lesquelles 3 expériences seraient regroupées dans un espace initialement prévu pour une. Cela est possible en modifiant les expériences initiales pour réduire les dimensions/masse/durée en se focalisant seulement sur les opérations et objectifs principaux de chaque expérience.

Cette plateforme permettrait de diversifier les objectifs et les thématiques avec un retour sur investissement plus important et plus large qu'une expérience unique, tout en respectant le même cahier des charges qu'une expérience seule. La plateforme permettrait également de limiter l'impact du dysfonctionnement d'une expérience spécifique.

L'expérience des figures de Chladni peut en particulier être intégrée sur trois plateformes avec les expériences suivantes : la première comporte la cafédomancie et la diffusion de gouttes, la deuxième comportent le pendule de Foucault et le démon de Maxwell et la troisième comporte le démon de Maxwell et le dépôt de matière. La cafédomancie permet d'étudier l'influence de la gravité sur la forme laissée par une goutte de café séchée sur une surface mettant ainsi en évidence l'effet Marangoni. La diffusion de gouttes permet de mesurer précisément la dissolution, par diffusion, d'une goutte de solution aqueuse dans un solvant organique. Le pendule de Foucault illustre la rotation de l'ISS autour de la Terre et de montrer l'effet de la force de Coriolis dans l'ISS en micropesanteur. L'expérience du démon de Maxwell permet de valider en l'absence de pesanteur un principe du même nom en apparence contradiction mécanique avec le deuxième principe de la thermodynamique. Le dépôt de matière permet d'étudier le comportement des matériaux granulaires, dont les propriétés sont très sensibles aux effets de la gravité (mesure de l'angle de repos et de la porosité d'un matériau granulaire en fonction de la pesanteur, avec des implications sur le futur stockage de matériaux granulaires de bases spatiales).

Ces plateformes permettent :

- pour la première, de regrouper des expériences visuelles sur le changement d'état de particules dans des environnements spécifiques, avec également un fort impact scientifique : les expériences concernent des enjeux de recherche actuelle avec la validation des modèles théoriques de dissolution d'une inclusion liquide dans un solvant partiellement miscible en apesanteur en diffusion pure - sans phénomène convectif - (expérience de diffusion de gouttes), mais

également l'influence de la capillarité dans l'effet Marangoni (cafédomancie) et l'étude en 3D des figures de Chladni limitées en 2D sur Terre ;

- pour la deuxième (cf. modèle 3D en figure 10), permet d'associer des expériences avec des objectifs à la fois éducatifs et scientifiques variés qui démontrent des principes physiques dans 3 domaines différents : la mécanique (l'expérience historique du pendule de Foucault revisité en apesanteur ; démon de Maxwell), la thermodynamique (démon de Maxwell) et les ondes sonores (figures de Chladni) ;
- et, pour la troisième (cf. modèle 3D en figure 11), de créer une plateforme avec une thématique précise sur le granulaire et des objectifs scientifiques à fort impact : validation en apesanteur du principe du démon de Maxwell, visualisation en 3D de l'organisation d'un sable et non plus en 2D comme sur Terre (figures de Chladni), et étude du comportement des matériaux granulaires en micropesanteur avec des implications technologiques sur le futur stockage de matériaux dans des bases spatiales (dépôt de matière).

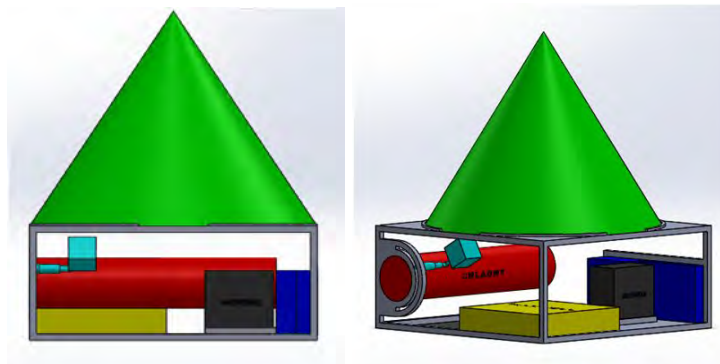


Figure 10 : Modélisation de la deuxième plateforme comprenant l'expérience des figures de Chladni (rouge), du démon de Maxwell (jaune) et du pendule de Foucault (vert)

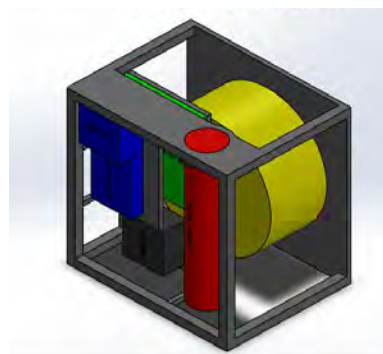


Figure 11 : Modélisation 3D de la troisième plateforme comprenant l'expérience des figures de Chladni (rouge), dépôt de matière (jaune) et démon de Maxwell (vert)



De plus, ces dispositifs respecteront les 6U, les 2 kg autorisés et l'astronaute ne sera que très peu sollicité. En effet, l'un de nos objectifs est de rendre l'ensemble de la plateforme autonome.

Pour plus de détails, voici les liens des dossiers de candidature du concept de plateforme ainsi que des dossiers des autres expériences qui seront associées :

- dossier plateforme :  
[https://docs.google.com/document/d/1G\\_pClioGh4zyb41-Q1rlRNSXOvKhXOIGtaupHCJwkxs/edit?usp=sharing](https://docs.google.com/document/d/1G_pClioGh4zyb41-Q1rlRNSXOvKhXOIGtaupHCJwkxs/edit?usp=sharing)
- dossier cafédomancie :  
[https://docs.google.com/document/d/1k7OIEpv5qn1aSK18QZjW1FhWNNX28TJf7Z\\_ays6z7uQ/edit](https://docs.google.com/document/d/1k7OIEpv5qn1aSK18QZjW1FhWNNX28TJf7Z_ays6z7uQ/edit)
- dossier diffusion de gouttes :  
<https://docs.google.com/document/d/19Cq-Ix0X66Y9UE-tpH7yJSGsI7NqSdG1iOLptRgaRN8/edit>
- dossier pendule de Foucault :  
<https://docs.google.com/document/d/1GQl09ke5eedR9NIAqfYZF-y8P5yRI0JeHOZ5RQb4UWg/edit>
- dossier démon de Maxwell :  
<https://docs.google.com/document/d/1m19cTc1R-OBQwEoIY40FwLBgLTV6IFuVoqMwtPKddBg/edit>
- dossier dépôt de matière :  
<https://docs.google.com/document/d/1nWqzqOqImP-sHtt0Mhx88pb8i3hyUK9ox3cdvqM3Rag/edit>

## X. Communication

Depuis Mars 2019, comme indiqué précédemment, une équipe s'investit dans la recherche de financement ainsi que dans la communication autour de ces expériences. En premier lieu, nous avons jusqu'ici communiqué en interne au sein de l'IUT A de l'université Toulouse III, à travers notamment la participation des départements GMP (Génie Mécanique et Productique) et GEII (Génie Electrique et Informatique)



Industrielle). En second lieu, nous avons déjà commencé des actions de communication externe, par exemple grâce au festival Pint of Science de Toulouse, ou aux collaborations avec différents laboratoires locaux ou nationaux (IRAP, LGC, IMRCP, LPS, IMFT). Une chaîne youtube a par ailleurs été créée pour diffuser des vidéos des différentes expériences soumises à l'appel d'offres Generation ISS :

[https://www.youtube.com/channel/UCeFmu5-TfVi2v6VxEE7\\_vpA/playlists](https://www.youtube.com/channel/UCeFmu5-TfVi2v6VxEE7_vpA/playlists)

Une fois sélectionnés, nous développerons cet aspect communication en interne et en externe. En particulier, nous aimerions intervenir dans les établissements du primaire et du secondaire de la région afin de présenter notre projet aux élèves des établissements. En effet, notre participation à ce projet ambitieux nous permettra de partager notre passion du spatial et de susciter un plus grand intérêt pour les concepts scientifiques. De plus, les réseaux sociaux auront aussi une place importante quant à la communication puisqu'ils nous permettront d'atteindre un public plus large. Les personnes intéressées pourront alors suivre facilement l'avancement du projet, avec la mise en ligne de contenus, d'actualités, sur des profils créés à cette intention (Facebook, Instagram, Twitter). Nous pourrions par exemple réaliser et partager pour l'expérience décrite précédemment des vidéos explicatives et éducatives telle que la vidéo de l'expérience Cafédomancie, proposée par ailleurs par notre formation, visible sur le lien suivant :

[https://www.youtube.com/watch?v=E\\_p5hx9RBn8](https://www.youtube.com/watch?v=E_p5hx9RBn8)

Enfin, étant donné notre situation géographique toulousaine, avec l'appartenance de plusieurs de nos enseignants au laboratoire IRAP interagissant de manière forte avec le CNES et la Cité de l'Espace, nous envisageons de proposer un projet d'exposition à la Cité de l'Espace autour de notre projet et du vol de Thomas Pesquet.



## XI. Bibliographie

<sup>1</sup> : J'intègre Physique tout-en-un PC-PC\*-4e édition

<sup>2</sup> : Vidéo montrant des figures de Chladni sur terre:

<https://www.youtube.com/watch?v=vwJAgUBF4w&t=72s>

<sup>3</sup> : Liens vers sites de vente du matériel:

- Carte arduino :

<https://www.cdiscount.com/informatique/composants-informatiques/carte-arduino-uno-r3-atmega16u2-controller-board-m/f-1071311-neu6414970561319.html?idOffre=331535694#mpos=2|mp>

- Emetteurs ultrason :

[+https://www.amazon.fr/HC-SR04-capteur-distance-ultrasons-Arduino/dp/B00KKKT7YK/ref=pd\\_lpo\\_vtph\\_147\\_lp\\_img\\_2?encoding=UTF8&psc=1&refRID=DPRY4ZX6M6JCJTFAN3GX](https://www.amazon.fr/HC-SR04-capteur-distance-ultrasons-Arduino/dp/B00KKKT7YK/ref=pd_lpo_vtph_147_lp_img_2?encoding=UTF8&psc=1&refRID=DPRY4ZX6M6JCJTFAN3GX)

[+https://www.gotronic.fr/art-emetteur-a-ultrasons-tr4010t-18335.htm](https://www.gotronic.fr/art-emetteur-a-ultrasons-tr4010t-18335.htm)

- Module de puissance :

[https://www.amazon.fr/H-bridge-contr%C3%B4le-Arduino-commande-moteurs/dp/B06X9KQ84B/ref=sr\\_1\\_4?keywords=L298n+H+Bridge&qid=1558618802&s=gateway&sr=8-4](https://www.amazon.fr/H-bridge-contr%C3%B4le-Arduino-commande-moteurs/dp/B06X9KQ84B/ref=sr_1_4?keywords=L298n+H+Bridge&qid=1558618802&s=gateway&sr=8-4)

<sup>4</sup> : Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation, Journal of Sound and Vibration (1998) 218(3), 419–444