

# DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF POUR ÉTUDIER LE GEL D'UNE BULLE DE SAVON

21/11/2022

**Auteur(s) / Autrice(s) :**

**Zoé Morin**

Lycée Douanier Rousseau,  
Laval

**Mathilde Hamelin**

Lycée Douanier Rousseau,  
Laval

**Rémi Deforge**

Lycée Douanier Rousseau,  
Laval

**Publié par :**

**Delphine Chareyron**

Travail réalisé dans le cadre des *XXIX<sup>e</sup> Olympiades de Physique* sous la tutelle de Patrice Michel, professeur de Physique-Chimie.

## Résumé

*Dans cet article, nous présentons le développement et la mise en place de dispositifs expérimentaux dans le but d'observer le gel de bulles. Ce travail nous a amené à nous poser de nombreuses questions sur les bulles, la mesure de la température, l'éclairage d'une bulle de savon, etc.*

## Table des matières

- [Introduction](#)
- [1. Qu'est-ce qu'une bulle de savon ?](#)
- [2. Comment faire geler une bulle de savon ?](#)
- [3. Comment mesurer une température ?](#)
- [4. À quelle température gèle une bulle de savon ?](#)
- [5. Aménagement du congélateur et première observation](#)
- [6. Comment éclairer une bulle pour l'observer ?](#)
- [7. Vers un nouveau dispositif d'éclairage](#)
  - [7.1 Le dispositif d'essai à « température ambiante »](#)
  - [7.2 Comment intégrer le dispositif d'éclairage de la bulle dans le congélateur ?](#)
- [8. Nos premières observations !](#)
- [Conclusion](#)
- [Références](#)

## INTRODUCTION

Cet article, tiré d'un projet des Olympiades de physique, présente la démarche pour mettre au point un dispositif d'observation du gel de bulles de savon. On retrouve tout le cheminement des élèves menant à la fabrication d'un prototype. De nombreuses questions sur la physique des objets utilisés ou des difficultés techniques et technologiques sont évoquées. Cet article peut permettre aux enseignants curieux du fonctionnement des projets des Olympiades mais novices en la matière, de découvrir les coulisses d'un projet et de se lancer dans l'aventure.

L'idée de ce projet nous est venue après le visionnage par hasard d'une vidéo montrant le gel d'une bulle de savon en pleine nature, au Canada où l'air atteint des températures très basses. Au lycée, nous avons déjà été touchés par la beauté de photos de bulles colorées, photos prises par des anciens élèves ayant travaillé sur les couleurs des bulles de savon. Pourquoi ne pas s'inspirer de leur projet pour aller au-delà ou plutôt bien en dessous pour parler de la température ? Par ailleurs, d'après un article de Science et Vie [1], le gel d'une bulle de savon n'a jamais été étudié par des chercheurs, excepté par une équipe américaine [2].



**Figure 1. Photographie d'une bulle de savon gelée**

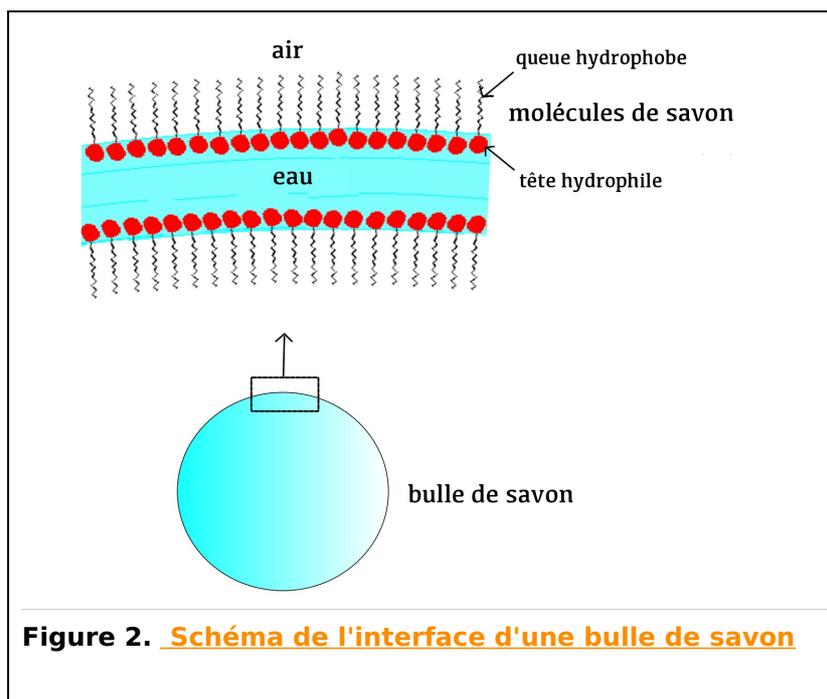
Source : Patrick Goujon, [missnumerique](#)

En septembre 2020, en pleine crise sanitaire, nous souhaitons relever le défi de geler une bulle de savon. Les confinements, les semaines alternées, et le fait d'être répartis dans quatre classes différentes n'ont pas favorisé notre travail en équipe. Heureusement, avoir un local réservé spécifiquement pour notre projet nous permet de nous retrouver et d'y travailler, encadrés par notre professeur de physique-chimie M. Michel, dès que nous le pouvons : pause déjeuner, heures de permanence ou libérées, le soir après les cours pour ceux d'entre nous qui sont internes à l'établissement, le mercredi après-midi et quelques jours de vacances. Notre projet a été dès le départ très motivant et nous nous sommes bien réparti le travail tout en informant l'ensemble du groupe des difficultés ou des avancées.

Après plus d'un an de travail, de problèmes et d'échecs, mais heureusement aussi de réussites, nous avons pu présenter notre projet pour la fête de la science 2021, puis au concours des Olympiades de physique en 2022 où nous avons eu le plaisir d'être récompensés lors de la finale nationale par un premier prix !

## 1. QU'EST-CE QU'UNE BULLE DE SAVON ?

La paroi d'une bulle de savon est composée d'une fine couche d'eau encadrée de deux couches monomoléculaires de savon. Ces molécules sont composées de deux parties : une tête hydrophile qui est « attirée » par l'eau et une queue hydrophobe qui la fuit, figure 2. Les queues hydrophobes sont donc immergées dans l'air.



**Figure 2. Schéma de l'interface d'une bulle de savon**

Une bulle est un objet fragile et éphémère. La moindre poussière peut la faire exploser en désorganisant la structure en trois couches du film. De plus, l'objet étant très léger, les mouvements d'air peuvent la déformer et conduire à son éclatement. Même en veillant à protéger la bulle des mouvements d'air et des poussières,

elle sera forcément éphémère pour au moins deux raisons. Le rapport surface/volume du film d'eau savonneuse est très important ce qui favorise une rapide évaporation de l'eau. Ensuite, la gravité entraîne vers le bas la couche d'eau prisonnière des deux couches mono-moléculaires de savon. Fatalement la bulle, à son sommet, devient très fine et finit par éclater.

Pour diminuer ces effets, il est possible d'ajouter du sucre pour limiter l'évaporation, et de la glycérine, espèce miscible à l'eau mais très visqueuse, pour ralentir le drainage (c'est-à-dire la descente de la couche d'eau vers le bas).

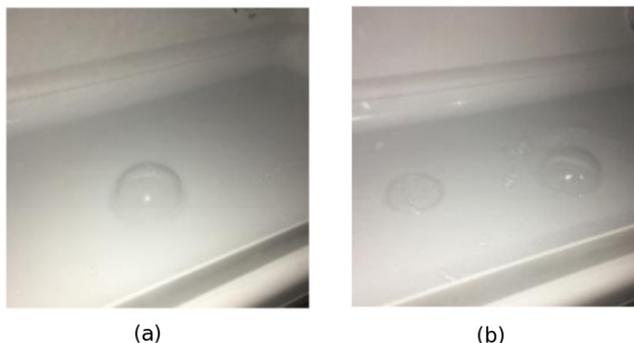
Voici ci-dessous la composition de la solution savonneuse que nous avons réalisée (recette d'après François Graner qui avait conseillé un groupe pour les Olympiades 2012) [3] :

- 10% de glycérine, pour limiter le drainage trop rapide ;
- 5% de saccharose, pour ralentir l'évaporation de la fine couche d'eau ;
- 20% de liquide vaisselle ;
- 65% d'eau distillée.

On agite doucement pour éviter l'excès de mousse. Une nuit de repos permet à l'alcool contenu dans le liquide vaisselle de s'évaporer.

## 2. COMMENT FAIRE GELER UNE BULLE DE SAVON ?

Pour faire geler une bulle de savon, nous avons utilisé un congélateur. Nous avons fait quelques tests chez nous avant que M. Michel n'achète pour notre projet un petit congélateur de 32 litres. Nos premiers essais consistaient à ouvrir la porte du congélateur, déposer une bulle au fond, et refermer délicatement la porte. Lorsqu'on rouvrait le congélateur plus tard, la bulle était gelée sur le pourtour mais éclatée sur sa partie haute, figure 3. Nous n'avons que rarement pu observer une demi-bulle entièrement gelée.



**Figure 3. Demi-bulle déposée sur le fond d'un congélateur (a) juste après le dépôt et (b) après quelques heures et ouverture de la porte**

Ces premiers essais ont été assez rapides mais frustrants, car nous ne pouvions pas observer la formation du gel et encore moins l'étudier. Nous avons songé à enfermer une source de lumière et une caméra dans le congélateur, mais pouvoir observer le phénomène directement à l'œil nu nous semblait plus motivant et, à priori moins difficile à mettre en œuvre. Nous avons alors imaginé remplacer la porte du congélateur par une porte vitrée, travail que nous décrivons un peu plus loin dans [la section 5](#).

En parallèle, nous nous sommes concentrés sur les deux questions suivantes :

- Comment mesurer une température ?
- À quelle température gèle une bulle de savon ?

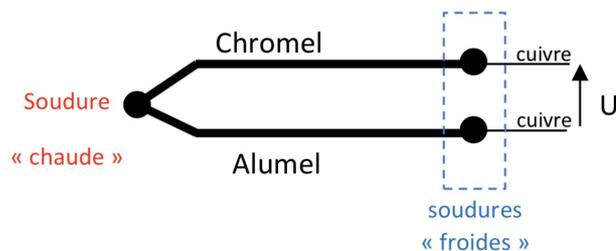
## 3. COMMENT MESURER UNE TEMPÉRATURE ?

Nous avons cherché un moyen pour mesurer efficacement et précisément la température en différents endroits du congélateur. Avec des thermomètres à alcool il est vite apparu que ce n'était pas la solution idéale. L'apparition de buée gêne le relevé des valeurs et l'encombrement est trop important.

M. Michel nous a alors proposé de nous intéresser aux thermocouples. Il y en a disposition au lycée. D'après le préparateur, ils sont fournis gratuitement avec un lot de multimètres possédant un mode "température".

Nos recherches sur le fonctionnement du thermocouple nous ont appris qu'il s'agissait d'un capteur de température constitué de deux fils de matériaux conducteurs différents. Il en existe plusieurs types qui sont définis par les matériaux qu'ils contiennent. Les nôtres sont de type K et contiennent donc, d'après le tableau de la figure 4, un fil en alliage d'Alumel et un fil en alliage de Chromel. Les deux fils sont soudés ensemble à l'extrémité qu'on appelle la « soudure chaude » et soudés séparément à deux fils de cuivre à l'autre extrémité (appelée « soudure froide »).

Type	Fil positif	Fil négatif
B	70% Platine 30% Rhodium	96% Platine 6% Rhodium
E	Chromel	Constantan
J	Fer	Constantan
K	Chromel	Alumel
N	Nicrosil	Nisil
R	87% Platine 13% Rhodium	Platine
S	90% Platine 10% Rhodium	Platine
T	Cuivre	Constantan



**Figure 4. Propriétés de différents thermocouples et schéma des thermocouples utilisés de type K**

Source : Les thermocouples : définitions et fonctionnement, [blog beamex](#), [4]

Un thermocouple est robuste et peu encombrant, cela permet d'espérer mesurer les températures en de nombreux endroits du congélateur sans trop de difficultés.

Nous avons branchés les thermocouples sur les multimètres et nous lisons les températures au degré près. Pour mesurer la température en différents endroits il faut donc autant de multimètres que de thermocouples ce qui ne fait pas la joie du préparateur technique du lycée à cause du matériel monopolisé. Par ailleurs c'est pour nous très vite encombrant !



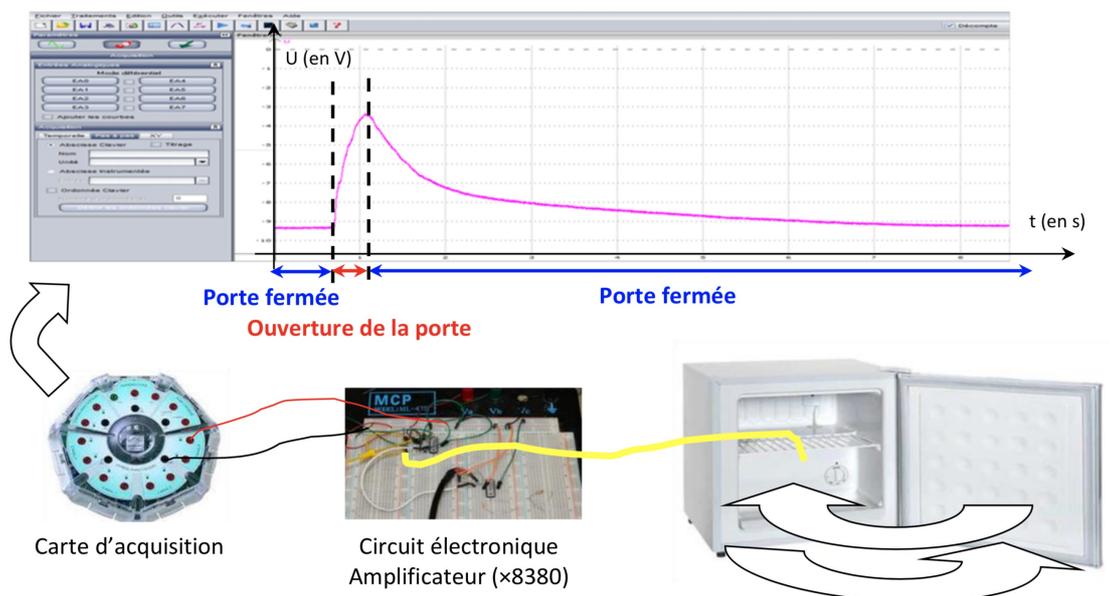
**Figure 5. Instrumentation du congélateur avec 8 thermocouples**

Alors comment peut-on utiliser les thermocouples sans les multimètres ? Le multimètre mesure avant tout une tension à ses bornes et non pas une température. On peut donc tout à fait imaginer récupérer cette tension pour l'exploiter nous-mêmes.

Aux bornes du thermocouple, même pour une différence de températures d'une dizaine de degrés entre la soudure chaude et les soudures froides, nous avons mesuré une tension très faible, de l'ordre de quelques dixièmes de volt seulement. Il est donc nécessaire d'amplifier cette tension pour qu'elle soit plus facilement mesurable. Nous avons donc dû apprendre à réaliser des montages électroniques en nous aidant notamment de sites sur internet [6] et en utilisant des circuits intégrés AOP (Amplificateur OPérationnel). Étant en lycée général, ce fut une découverte pour nous.

Nous avons réalisé un montage amplificateur non inverseur (figure 9). Nous avons fait le choix de mettre en cascade deux étages d'amplification pour éviter d'appliquer un facteur d'amplification trop grand avec un seul montage (ce qui n'est pas recommandé). Le dimensionnement des résistances du montage permet de choisir le facteur d'amplification. Le signal amplifié est envoyé vers une carte d'acquisition et nous pouvons afficher la tension à l'aide du logiciel Latispro.

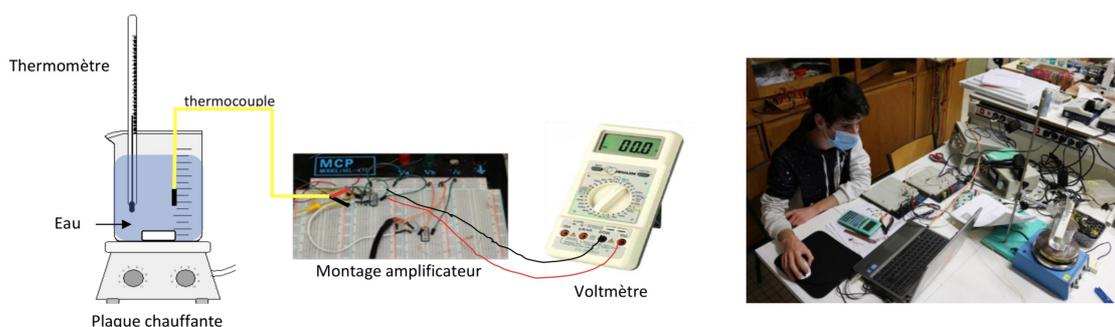
Nous avons testé notre montage en plaçant l'extrémité du thermocouple à l'intérieur du congélateur à  $-18^{\circ}\text{C}$ . Nous avons ouvert la porte du congélateur quelques secondes puis l'avons refermée pour simuler une intervention (observation, prise de photo, mise en place d'une bulle etc.). L'opération a duré une dizaine de secondes. Sans surprise, figure 6, nous constatons une augmentation rapide de la température à l'ouverture de la porte. Une fois celle-ci refermée la température redescend lentement. Cela confirme, si besoin était, la nécessité d'observer à travers une porte transparente et d'agir à l'intérieur du congélateur sans ouverture de la porte.



**Figure 6. Test du montage "thermocouple et amplification" lors de l'ouverture et de la fermeture de la porte du congélateur**

Ce premier essai nous a permis de prendre en main les thermocouples. Il reste encore une étape à franchir car le logiciel Latispro donne la courbe d'évolution de la tension au cours du temps or c'est la température qui nous intéresse. Il faut donc convertir la tension pour accéder à l'évolution de la température au cours du temps.

Pour déterminer comment température et tension sont reliées, nous avons relevé les valeurs des tensions pour différentes températures de la « soudure chaude » en réalisant le montage figure 7. L'extrémité du thermocouple est plongée dans de l'eau dont on augmente la température progressivement à l'aide d'une plaque chauffante. On note, pour chaque valeur de température  $\theta_2$ , la valeur de la tension amplifiée. Il faut également relever la température  $\theta_1$  des « soudures froides » c'est-à-dire la température de l'air ambiant que nous mesurons avec des thermomètres électroniques (nous en utilisons plusieurs afin de réaliser la moyenne des valeurs mesurées).



**Figure 7. Schéma du montage permettant de trouver la relation entre la température et la tension aux bornes d'un thermocouple**

Sur la figure 8, nous avons tracé la courbe  $U = f(\theta_2 - \theta_1)$ .



Dans l'idéal, nous souhaitons que pour une température  $\theta_2 = 0^\circ\text{C}$ , la tension  $U$  sortie soit nulle et que pour la température dans le congélateur au minimum de  $-16^\circ\text{C}$ , la tension sera égale à  $-16\text{ V}$ . Mais la carte d'acquisition est limitée à une plage de tension entre  $+10$  et  $-10\text{ V}$ . Nous devons donc choisir une autre échelle. Nous prendrons  $1\text{ V}$  correspond à  $2^\circ\text{C}$ , ainsi pour une température égale à  $-16^\circ\text{C}$ , la valeur de la tension doit être égale à  $-8,0\text{ V}$ . Connaissant la sensibilité du thermocouple ( $42,0\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), il suffit de modifier et d'adapter la valeur du gain de l'amplification à l'aide de résistances bien choisies.

Finalement, afin de rester dans la gamme de tension de l'interface et pour que la tension  $U$  soit une image directe de la température  $\theta_2$ , nous procédons ainsi :

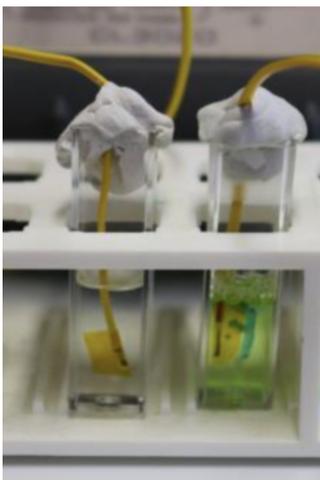
- Nous ajustons la valeur de l'amplification pour avoir la correspondance  $1\text{ V} \rightarrow 2^\circ\text{C}$  (cela correspond à un gain  $\times 11905$ ).
- Nous mesurons la température de l'air ambiant, correspondant à  $\theta_1$ , par exemple  $19,2^\circ\text{C}$ . Nous plaçons l'extrémité du thermocouple dans l'air ambiant et vérifions que la tension amplifiée est bien nulle (annulation de l'offset). Puis, pour avoir directement l'image de  $\theta_2$ , nous ajoutons une tension à l'aide du montage sommateur de telle sorte que la tension de sortie  $U$  soit égale à  $19,2/2 = 9,6\text{ V}$ . C'est comme si nous avions "fixé électroniquement" la température de la soudure froide  $\theta_1$  à zéro.

Le montage sommateur présente alors une double utilité. Il permet à la fois d'annuler le problème de l'offset évoqué plus haut et de décaler la tension de telle sorte que pour une température de  $0^\circ\text{C}$ , la tension visualisée par le logiciel d'acquisition soit de  $0\text{V}$ .

#### 4. À QUELLE TEMPÉRATURE GÈLE UNE BULLE DE SAVON ?

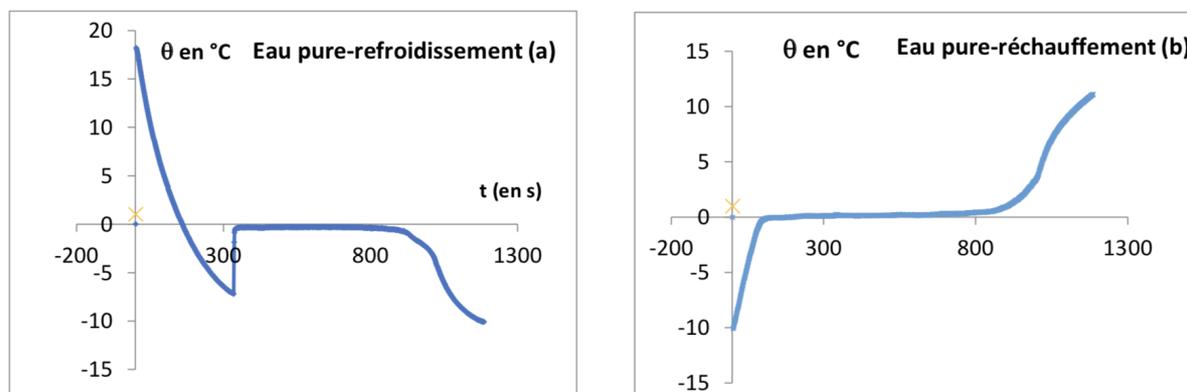
On sait que l'eau pure se solidifie à  $0^\circ\text{C}$ . Mais la bulle n'est pas constituée d'eau pure, c'est un mélange d'eau, de molécules tensioactives, de sucre et de glycérine.

Pour déterminer à quelle température l'eau savonneuse va se solidifier, nous avons placé dans deux cuves colorimétriques un petit volume (environ  $1\text{ mL}$ ) d'eau dans l'une et d'eau savonneuse dans l'autre dans le congélateur à  $-18^\circ\text{C}$ , figure 10. On place les thermocouples dans les liquides sans contact avec les parois.



**Figure 10.** Cuves d'eau pure et d'eau savonneuse instrumentées

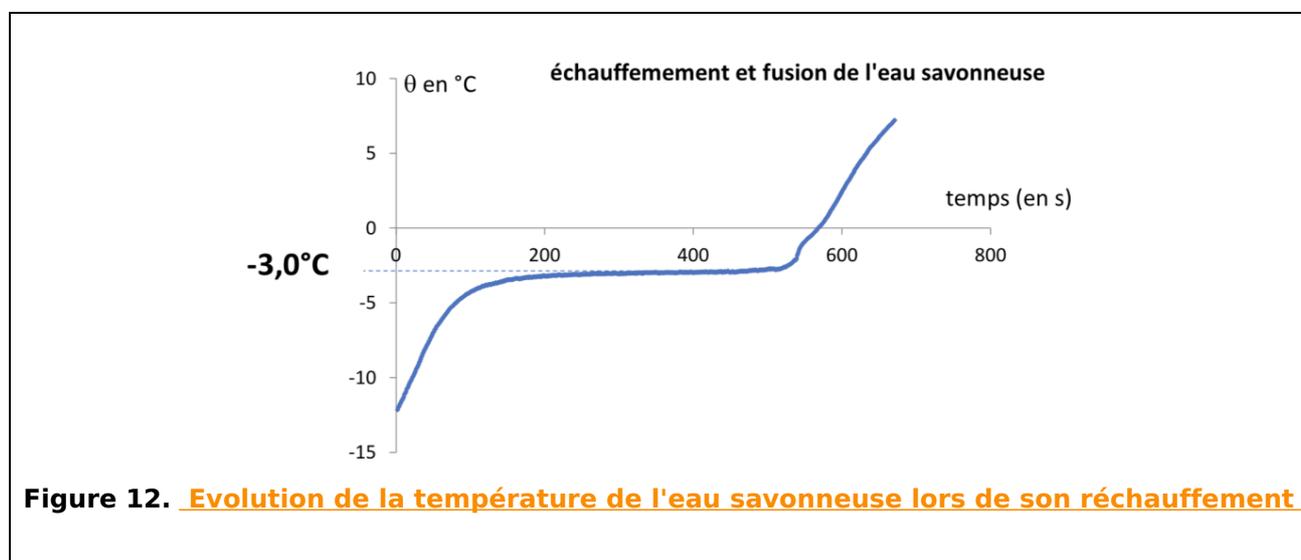
Nous avons tracé la courbe d'évolution de la température au cours du temps pour les deux liquides dans un tableur Excel, figure 11.



**Figure 11. Evolution de la température de l'eau lors de son refroidissement ou de son réchauffement**

Nous obtenons, pour l'eau pure, lors du refroidissement un phénomène de surfusion très net, phénomène que nous avons découvert à cette occasion. Nous observons un palier un peu en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ .

Ce travail préliminaire nous a permis, hormis de découvrir le phénomène de surfusion, de confirmer la fiabilité de notre montage électronique et de notre protocole. Nous pouvons donc analyser la courbe obtenue cette fois-ci pour l'eau savonneuse, figure 12.



**Figure 12. Evolution de la température de l'eau savonneuse lors de son réchauffement**

Sans grande surprise, la température de fusion et donc de solidification de l'eau savonneuse est négative. Nous la mesurons à  $-3,0^{\circ}\text{C}$ . Nous restons tout de même prudent sur la valeur de la température à laquelle la bulle gèlera. En effet dans une bulle, la surface liquide-air est très importante et l'organisation des molécules tensioactives est différente de celle dans notre cuve. Cette différence d'organisation a-t-elle une influence sur la température de solidification ?

## 5. AMÉNAGEMENT DU CONGÉLATEUR ET PREMIÈRE OBSERVATION

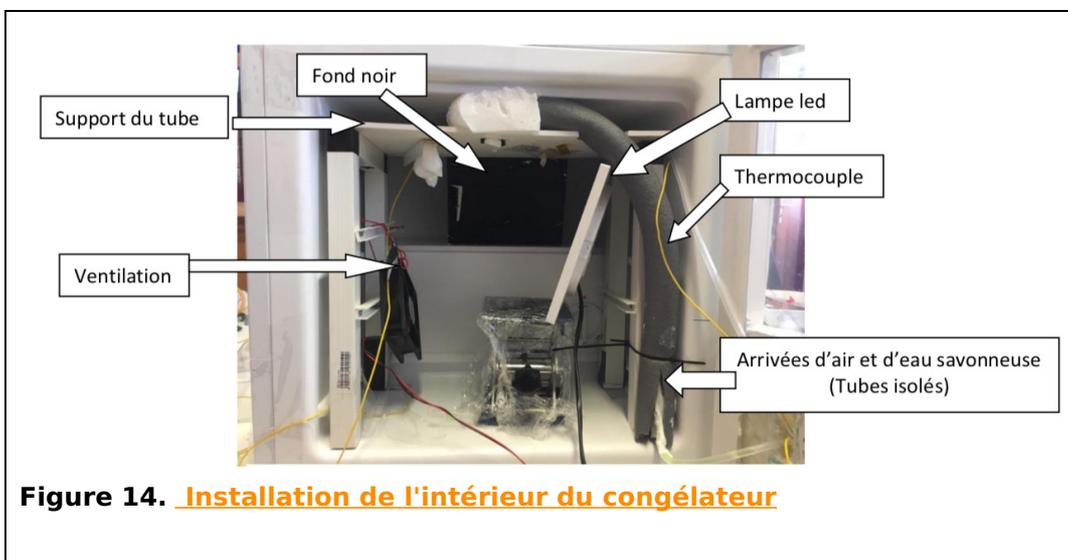
Lors des premiers essais, nous ne pouvions pas observer à l'intérieur du congélateur, nous avons donc très vite cherché à mettre en place une porte transparente. Nous avons choisi des tubes de PVC et du plexiglas pour concevoir une nouvelle porte. Ce sont des matériaux peu chers, faciles à travailler (découper, percer) et de bons isolants thermiques. Avec les tubes à section carrée, nous avons réalisé un cadre sur lequel nous avons pu adapter le joint magnétique de la porte d'origine. Nous avons ensuite réalisé un double vitrage avec deux plaques de plexiglas, en les collant bien fermement afin d'enfermer l'air entre les plaques. L'air est l'un des meilleurs isolants thermique ce qui est une bonne nouvelle pour nous car il est gratuit !

Nous avons aussi ajouté des gants dans la partie inférieure pour pouvoir accéder à l'intérieur du congélateur depuis l'extérieur sans avoir à ouvrir la porte. Nous avons percé la porte (figure 13 à droite entouré en rouge) pour faire passer tous les câbles d'alimentation des lampes, de la ventilation, les fils des thermocouples mais également les tuyaux des arrivées de fluides : eau savonneuse et air (pour gonfler la bulle).



**Figure 13. Réalisation de la nouvelle porte du congélateur**

L'aménagement intérieur est aussi compliqué, car il y a beaucoup de choses à mettre dans un petit espace de 32 L, figure 14. Pour déplacer un élément il faut faire attention à ne pas déstabiliser l'ensemble. Nous nous sommes également rendu compte que la température dans le congélateur n'est pas uniforme. Elle est plus basse en bas qu'en haut. L'ajout d'une ventilation est donc également indispensable.



**Figure 14. Installation de l'intérieur du congélateur**

### Observation des premiers cristaux :

Cette installation effectuée, nous avons pu observer et photographier les premières bulles gelées, figure 15. Malheureusement l'éclairage ne permettait pas d'avoir une vision d'ensemble, la lumière étant localisée sur certaines parties de la bulle. Nous avons observé plusieurs formes de cristaux et parfois nous constatons que la bulle était gelée sans avoir pu observer aucuns cristaux.



**Figure 15. Photographies des premières bulles gelées à travers la porte vitrée du congélateur**

## 6. COMMENT ÉCLAIRER UNE BULLE POUR L'OBSERVER ?

Dans le congélateur, nous avons introduit des panneaux LED de 20 cm de côté. On notera que les LED chauffent peu ce qui est important car nous les plaçons dans un congélateur (!). Nous avons essayé plusieurs dispositions mais n'étions pas satisfaits du résultat. Nous ne pouvions pas, comme dans la nature, disposer d'une lumière très diffuse provenant de nombreux objets diffusants parfois lointains.

Nous avons alors recherché la meilleure solution d'éclairage. Nous avons compris que nos bulles de savon se comportent vis-à-vis des lampes LED comme des miroirs sphériques. Nous nous sommes alors intéressés au phénomène de réflexion sur ces surfaces et avons réalisé une simulation à l'aide du logiciel de mathématique Géogebra pour étudier l'influence des différents paramètres. Finalement, nous avons décidé de placer la bulle dans un tunnel lumineux, que nous avons imaginé et progressivement mis en place après de nombreux essais et bricolages.

## 7. VERS UN NOUVEAU DISPOSITIF D'ÉCLAIRAGE

### 7.1 LE DISPOSITIF D'ESSAI À « TEMPÉRATURE AMBIANTE »

Nous nous sommes résolus à « sortir » la bulle du congélateur pour améliorer son éclairage et trouver le bon dispositif qui permettra les meilleures observations. Il est ainsi bien plus facile de jouer sur les paramètres : distance, intensité lumineuse, orientation.

Pour construire le tunnel lumineux, nous avons choisi du plexiglas translucide blanc pour obtenir une lumière diffuse et homogène. Nous avons repris scie, perceuse etc... pour construire le tunnel en utilisant des supports en PVC, figure 16.

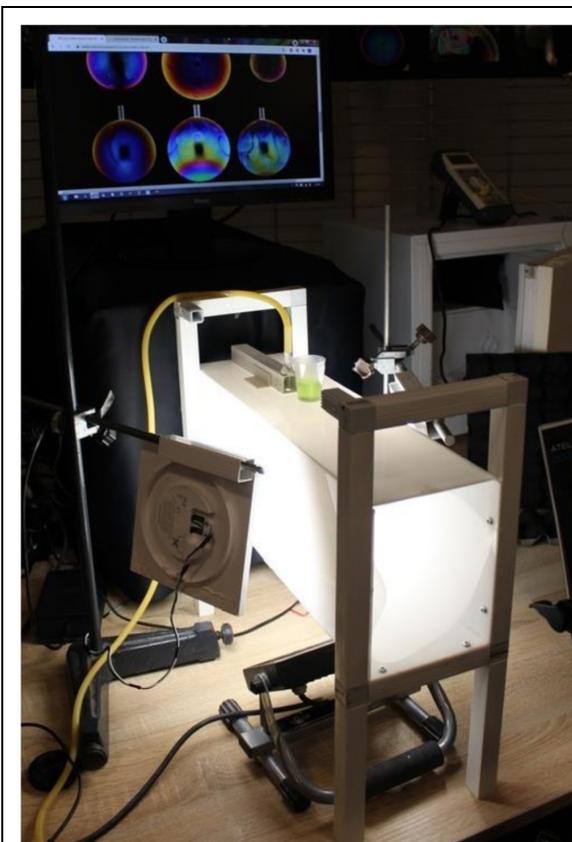


Figure 16. Tunnel lumineux

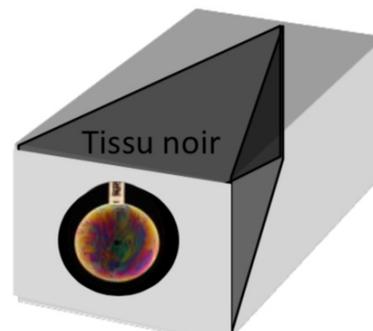
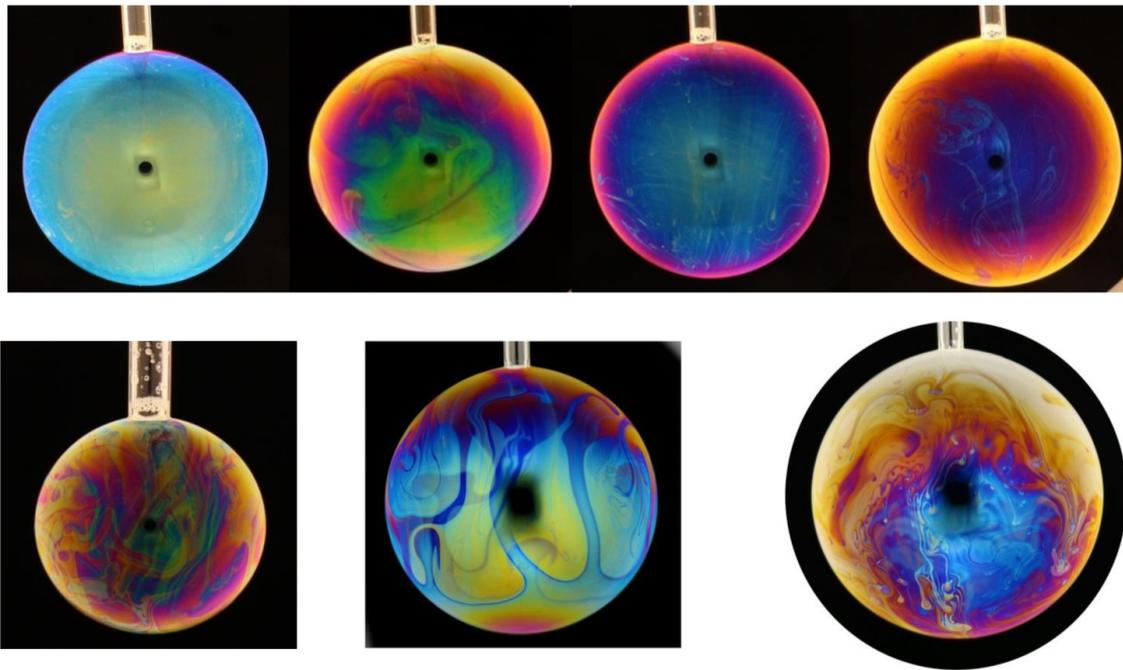


Figure 17. Réalisation du fond noir

Pour le fond noir, nous avons fait beaucoup de tests pour trouver le matériau capable d'absorber au maximum la lumière et faire ressortir au mieux la bulle et ses couleurs. Nous avons essayé différentes peintures, différents tissus ou cartons peints, mais nous étions toujours déçus car ils diffusaient trop de lumière. En échangeant, nous nous sommes fait la réflexion qu'il n'y a guère plus noir que l'entrée d'un tunnel routier non éclairé.

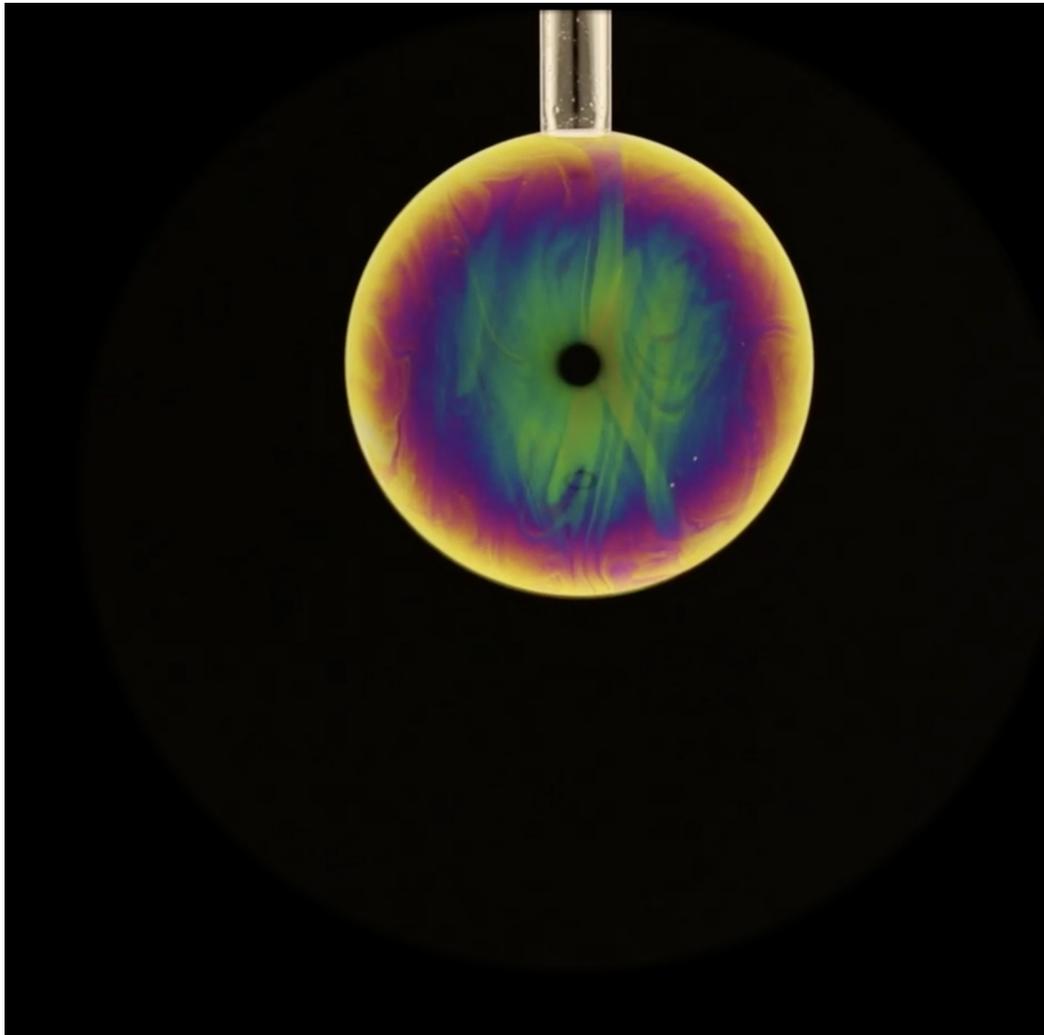
Nous avons donc percé un trou dans une grande boîte en carton profonde d'une soixantaine de centimètres. Nous y avons disposé du tissu noir comme sur la figure 17. Cette fois-ci, le résultat a été tout à fait conforme à nos espérances.

La longueur du tunnel doit être suffisante si l'on veut un éclairage homogène sur le devant de la bulle. Par ailleurs nous avons constaté qu'il est difficile de faire la mise au point sur l'ensemble de la bulle. Soit ce sont les contours qui sont nets, soit ce sont les turbulences au centre de la bulle. La profondeur de champ de nos appareils photos est donc insuffisante et nous allons devoir progresser également en photographie !



**Figure 18. Photographies de bulles de savon à température ambiante réalisées dans le tunnel lumineux**

Source : [Atelier Science Rousseau](http://Atelier Science Rousseau)



Format mp4Format webm

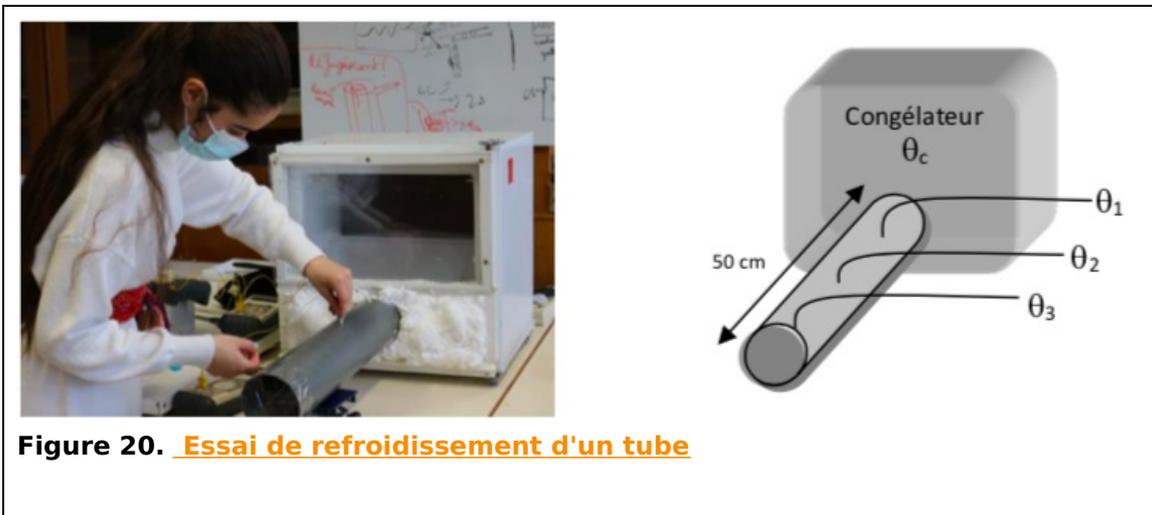
**Figure 19. Vidéo d'une bulle de savon à température ambiante réalisée dans le tunnel lumineux**

Source : [Atelier Rousseau](#), [7].

## 7.2 COMMENT INTÉGRER LE DISPOSITIF D'ÉCLAIRAGE DE LA BULLE DANS LE CONGÉLATEUR ?

Il nous reste à tester la possibilité d'une extension au congélateur sous la forme d'un tube réfrigéré qui accueillera la bulle (futur tunnel lumineux réfrigéré).

Nous avons repris la porte du congélateur et nous avons démonté la partie basse pour coller une plaque fine de PVC d'épaisseur 5 mm plus facilement usinable que le PVC transparent. Nous avons taillé un trou du diamètre du tube, puis avons positionné et collé celui-ci. Pour isoler nous avons bouché l'extrémité du tube et l'avons recouvert de mousse expansive après l'avoir percé de trois petits trous pour placer aux deux extrémités et au centre des thermocouples. Nous avons également placé un thermocouple à l'intérieur du congélateur pour pouvoir y suivre l'évolution de la température, figure 20.



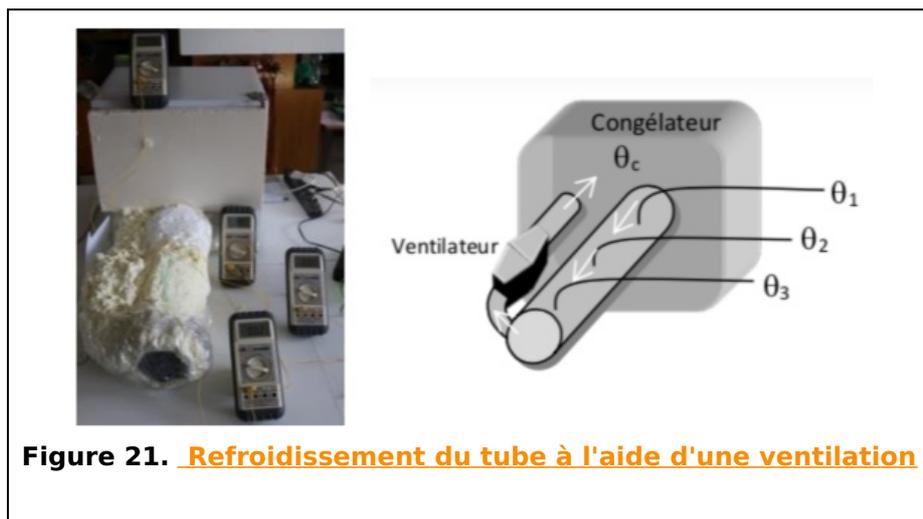
**Figure 20. Essai de refroidissement d'un tube**

Une fois le congélateur en fonctionnement nous avons relevé les températures :

$$\theta_c = -13^\circ\text{C}, \theta_1 = -3^\circ\text{C}, \theta_2 = -1^\circ\text{C} \text{ et } \theta_3 = -2^\circ\text{C}$$

Une fois stabilisé, on constate que l'air dans le tube se refroidit difficilement. L'air dans le tube étant bloqué et trop isolé de l'air dans le congélateur, il ne parvient pas à se refroidir.

Pour résoudre ce problème nous avons imaginé un système de ventilation permettant d'assurer l'homogénéisation de l'air (et donc de sa température) dans le tube. Nous avons trouvé un ventilateur dans un ordinateur hors service. Nous avons réalisé un petit caisson pour l'y placer, et nous avons relié ce caisson au tube, figure 21. Nous avons aussi collé une grande plaque de polystyrène bien davantage isolante sur la partie en plexiglas de la porte.



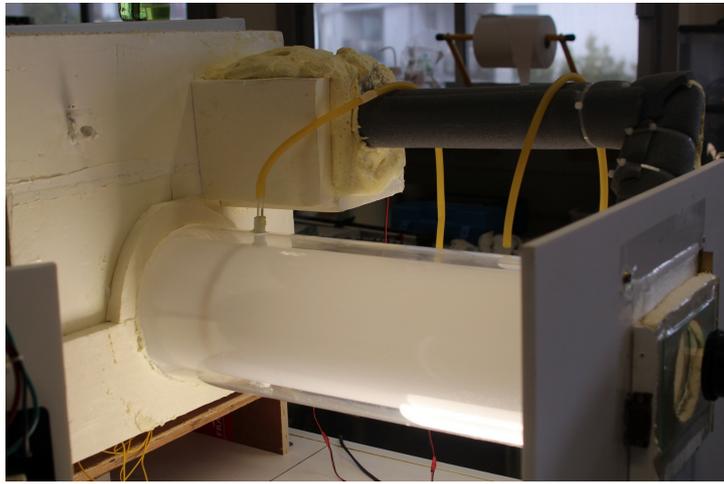
**Figure 21. Refroidissement du tube à l'aide d'une ventilation**

Après avoir fixé et isolé thermiquement l'ensemble, nous avons pu procéder à de nouvelles mesures et nos efforts ont été récompensés : les valeurs des températures relevées étaient proches :

$$\theta_c = -18^\circ\text{C}, \theta_1 = -18^\circ\text{C}, \theta_2 = -17^\circ\text{C} \text{ et } \theta_3 = -16^\circ\text{C}$$

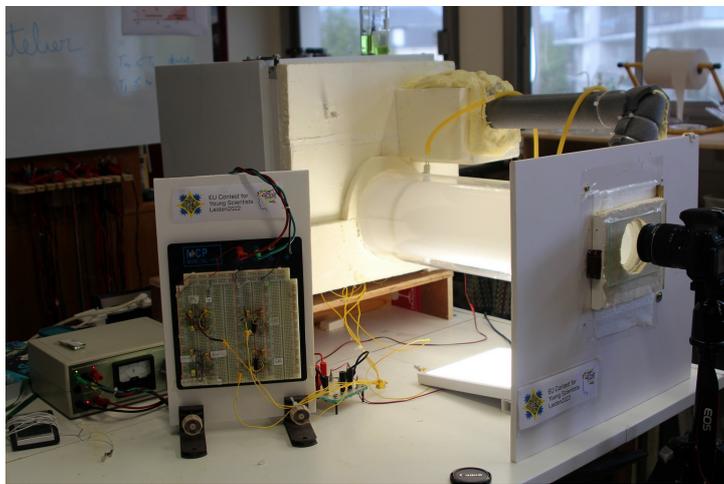
Le système semble donc opérationnel. Nous devons désormais non pas utiliser un tube opaque mais un tube transparent et diffusant la lumière qui l'éclaire et trouver une solution pour l'isoler thermiquement tout en maintenant la transparence de l'ensemble. Notre travail étant encourageant, M. Michel a commandé deux tubes assez coûteux. L'un translucide blanc de 15 cm de diamètre et l'autre totalement transparent et de diamètre 19 cm de diamètre.

Nous avons procédé à la mise en place de ces tubes en plaçant le tube translucide blanc dans le tube transparent tout en s'assurant que les surfaces soient séparées d'une couche d'air d'environ 2 cm. Ce « double vitrage » permet une isolation thermique qui laisse pénétrer la lumière, figure 22.



**Figure 22. Photographie du dispositif comportant le tunnel lumineux réfrigéré**

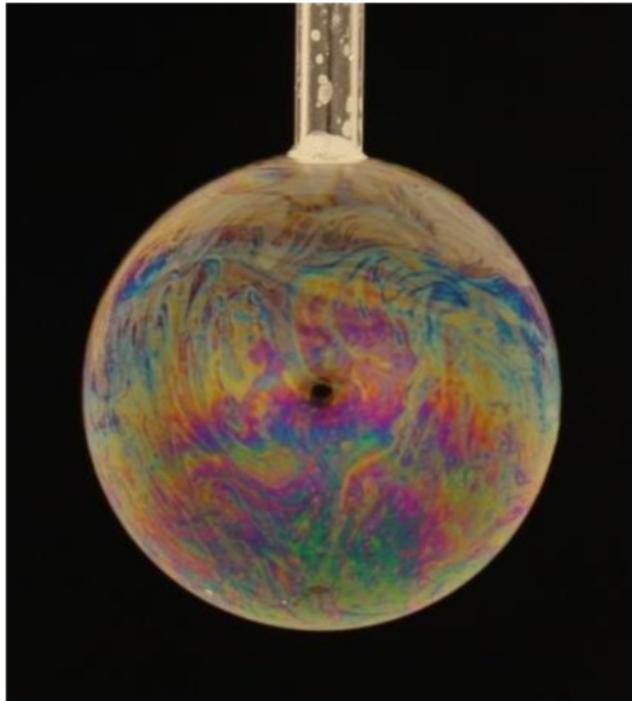
Le dispositif expérimental au complet est présenté sur la figure 23.



**Figure 23. Photographie du dispositif expérimental pour réaliser et filmer le gel des bulles de savon**

## 8. NOS PREMIÈRES OBSERVATIONS !

Au mois de décembre, lors de la phase interacadémique du concours des Olympiades de physique, nous avons eu le plaisir de présenter notre travail aux chercheurs de l'université de Poitiers. Ce jour-là, la chance fut avec nous : lors de l'exposé, la bulle que nous avons formée a gelé et est restée en place tout au long de notre présentation, et même bien en delà soit environ 3 heures.



**Figure 24. Bulle gelée lors de la phase académique des Olympiades de physique à Poitiers, 2h30 après sa formation**

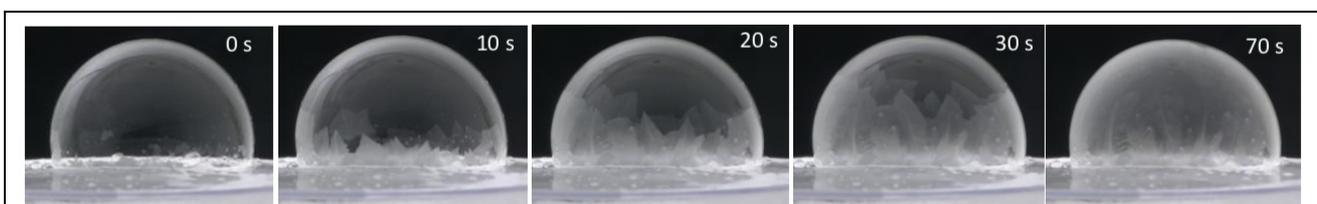
Dès notre retour à l'atelier, nous avons fait le bilan de cette belle journée et avons repris nos travaux en cherchant dans un premier temps à améliorer notre dispositif. Ainsi :

- Pour éviter la formation de la buée sur la vitre d'observation à l'extrémité du tube, nous avons installé un double vitrage, facilement amovible qui permet d'accéder temporairement à l'intérieur du tunnel sans trop nuire à la bonne isolation de celui-ci et sans modifier la température au niveau de la bulle.
- Nous avons modifié le système de gonflage des bulles pour souffler de l'air à une température la plus proche possible de celle de l'intérieur du congélateur.

Nos premiers gels de bulles nous ont surpris et frustrés car nous nous attendions à observer l'apparition de belles dendrites comme sur les photos ou vidéos disponibles sur internet. Aussi avons-nous repris le document des chercheurs américains [2] et regardé de nouveau les films amateurs. Dans tous les cas, les bulles sont déposées sur des branches, fleurs, carrosserie de voiture, neige. Dans le cas des chercheurs américains, il s'agissait d'un support bien plan sur lequel ils formaient des demi-bulles. La présence de ces supports semble donc initier le processus de cristallisation...

Nous pouvons essayer de l'interpréter : afin de se solidifier l'eau de la bulle doit perdre de l'énergie thermique qui doit être transférée vers l'extérieur. Nous pensons que le support permet d'absorber l'énergie nécessaire pour permettre la solidification.

Nous avons donc placé une plateforme dans le tube sur laquelle repose une boîte de pétri contenant de l'eau gelée après une nuit au congélateur à  $-18^{\circ}\text{C}$ . Nous avons formé des demi-bulles, puis des bulles presque entières sur ce récipient, figure 25. Le résultat a été immédiat : des cristaux (dendrites) envahissent la totalité de la bulle !



**Figure 25. Croissance des cristaux. Température de l'air et du support :  $-14^{\circ}\text{C}$**

L'importance d'un support semble donc se confirmer. Nous sommes par ailleurs convaincus qu'il faut une couche d'eau épaisse pour constater l'apparition de ces beaux cristaux !



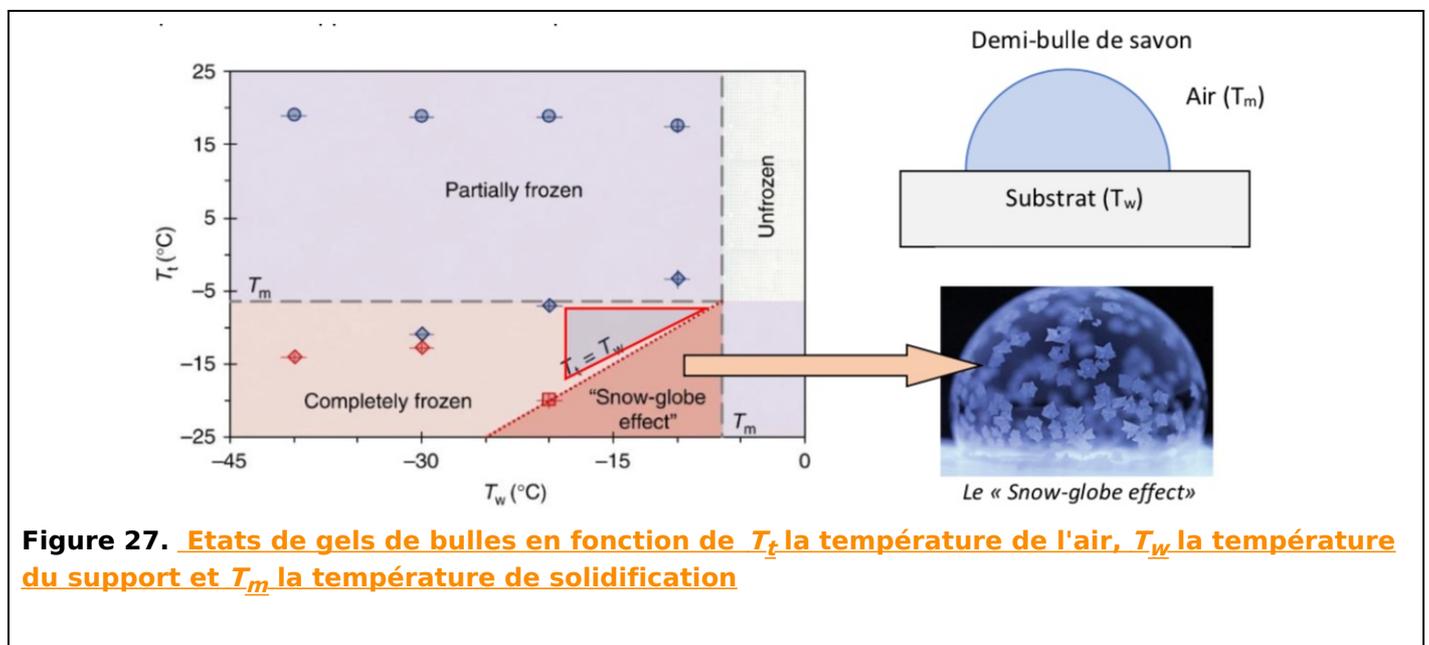
Format mp4Format webm

**Figure 26. Vidéo de la croissance de cristaux**

Source : [Atelier Rousseau](#), [7].

Beaucoup de questions ont accompagné ces premières observations et nous avons multiplié les essais, notamment sur l'éclairage. Il est ici nettement préférable de réduire fortement l'éclairage pour observer des dendrites. Les cristaux sont d'un blanc pâle et nous pensons que la composition de notre liquide à bulle est à réfléchir de nouveau. Nous pensons également que les bulles "colorées" (dont on voit les irisations) sont trop fines pour permettre l'apparition de dendrites. L'éclatement des bulles gelées lorsqu'on souffle dessus semble confirmer deux gels différents : On observe un éclatement comme du verre avec des bulles gelées où apparaissent des dendrites et un effondrement « toile d'araignée » pour les bulles colorées et donc fines.

Nous avons analysé avec M.Michel le graphe, figure 27, tiré de de l'article [2], qui représente les différents modèles de gel de bulles en fonction de  $T_t$  la température de l'air,  $T_w$  la température du support et  $T_m$  la température de solidification.



**Figure 27. Etats de gels de bulles en fonction de  $T_t$  la température de l'air,  $T_w$  la température du support et  $T_m$  la température de solidification**

Nous pensons que nos observations et les relevés des températures sont conformes à la partie encadrée en rouge sur la figure 27. D'après ce graphe, si la température de l'air est inférieure à celle du support, un effet « snow globe », c'est-à-dire un bel effet boule à neige, peut être observé. La physique de ce mode de gel a été étudiée par les chercheurs américains.

Quelques jours avant la finale nationale des Olympiades de physique, nous sommes parvenus à prendre contact par mail avec l'un des auteurs, Saurabh Nath [2]. Il a immédiatement accepté de nous aider et nous avons fixé une soirée « visio » un dimanche soir. Nous avons pu échanger pendant près de deux heures... en anglais. Saurabh Nath a confirmé qu'il n'est pas impossible que nous fassions des observations inédites. D'ailleurs, il était très surpris du gel de notre bulle suspendue. Avec son équipe, il n'avait pas procédé à de tels essais et avait restreint son étude à des demi-bulles sur support.

Nous avons beaucoup échangé sur la nature du support utilisé. Nous avons quelques difficultés à « lancer » la cristallisation à partir de galette d'eau gelée. Saurabh Nath nous a appris que l'important pour initier la cristallisation est l'irrégularité du support. Avec son équipe, il l'initiait avec des supports givrés qu'il nous a encouragé à mettre en œuvre.

## CONCLUSION

Notre aventure nous a beaucoup appris, par les nombreuses connaissances théoriques que nous avons acquises, mais aussi et surtout par la découverte de la démarche expérimentale et son exigence. Nous sommes très heureux et fiers d'avoir ensemble pu relever ce défi.

Seize mois ont été nécessaires et de nombreuses difficultés ont été surmontées. Nous n'avions pas pensé qu'un tel projet nous conduirait à autant d'essais, d'échecs à surmonter et qu'il ferait appel à tant de domaines différents : électronique, chimie, optique, thermique, étude des matériaux, mais aussi des domaines moins scientifiques mais tout aussi exigeants et enrichissants comme le bricolage, la photographie, le montage vidéo...

L'échange avec les différents chercheurs a également été très enrichissant pour nous.

Pour retrouver plus en détail notre projet, les photos, vidéo et les récompenses :

<https://www.ateliersciencerousseau.fr/peut-on-geler-une-bulle-de-savon>

À l'aide de ce projet nous avons gagné le prix de la meilleure vidéo du concours Cgénial 2022 :



Format mp4Format webm

Source : [Atelier Scientifique Lycée Douanier Rousseau](#), You tube [8].

## RÉFÉRENCES

- [1] Science & Vie n°1224, Article page 15.
- [2] [How soap bubbles freeze](#), S. Farzad Ahmadi, Saurabh Nath, Christian M. Kingett, Pengtao Yue and Jonathan B. Boreyko, **Nature Communications** **10**, n°2531, 2019.
- [3] Les couleurs éclatantes, [recette du produit à bulle](#) page 6, Lycée Douanier Rousseau, 2012.
- [4] Les thermocouples : définitions et fonctionnement, [blog beamex](#)
- [5] Documentation technique de l'AOP TL084, [alldatasheet.com](#)
- [6] Montages de bases de l'amplificateur opérationnel, [Wikipedia](#)
- [7] Site Internet de [l'Atelier Science Rousseau](#)
- [8] [Atelier Scientifique Lycée Douanier Rousseau](#), 2022, You tube

