

# Tempête de cristaux dans une bulle !



Sacha MORIN  
Méline GOURDELIER  
Robin PARIS  
Joséphine BERGER  
Yenuli ALVITIGALA

Professeur encadrant : M. Patrice MICHEL

# SOMMAIRE

- I. Introduction - L'origine de notre projet
- II. Nos premiers dispositifs : bonnes et mauvaises surprises
  1. Comment créer une enceinte isolée thermiquement ?
  2. Comment refroidir ?
  3. Quel dispositif ?
  4. Comment mesurer ?
- III. Vers un dispositif optimisé
- IV. Comment gèle une bulle de savon ? ... enfin
- V. Et l'aventure continue...

## Conclusion-Annexes

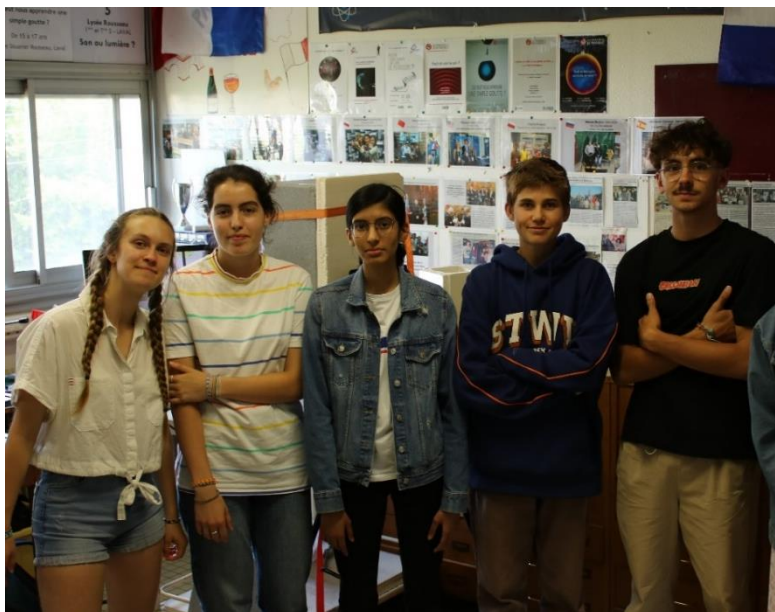
**Annexe 1** : Les « schémas de Robin »

**Annexe 2** : Une petite question « grand public » pour la « Fête de la Science »

**Annexe 3** : Surveillance de la pression de l'air dans notre hublot

**Annexe 4** : Les scripts Arduino

---



*Notre équipe dans notre ancien atelier...De gauche à droite : Méline, Joséphine, Yenuli, Sacha et Robin.*

## I. Introduction- L'origine de notre projet

(Octobre 2022)

Notre projet s'inscrit dans la continuité d'un projet mené par "les anciens" de *l'atelier science (années 2020-2022)*, projet nommé : Peut-on faire geler une bulle de savon ? [1]. Nous avons rencontré Mathilde, Rémi, Zoé, Djamilia, Florian et Daniella avant leur départ du lycée. Nous étions alors en fin de classe de seconde et avons pu suivre leur projet [2]. Nos échanges nous ont beaucoup intéressés car malgré leurs réussites, ils nous ont confiés les limites de leurs travaux, les erreurs qu'ils ont commises et leur frustration de ne pas pouvoir poursuivre au-delà. Ils nous ont invités à reprendre leur projet à la base, en abordant la problématique sous un autre angle. C'est avec enthousiasme que nous nous sommes ainsi plongés dans l'aventure...

Notre équipe s'est véritablement formée au début de notre année de première. Nous étions une dizaine. Nous avons rencontré très vite des difficultés pour trouver des créneaux communs de travail et de concertation. Aussi, rapidement, nous nous sommes retrouvés à cinq très motivés par ce projet. Nous y travaillons dès que nous avons un créneau disponible, seul ou à plusieurs, notamment sur les pauses déjeuner dans une salle au lycée que nous appelons "l'atelier" et où nous avons à disposition du matériel pour mener nos recherches. Nous y sommes libres d'essayer, de bricoler, d'expérimenter, souvent de rater et parfois...de réussir.

Malheureusement, aux dernières vacances d'automne des travaux importants ont débuté au lycée et nous ont conduits à un déménagement dans un local temporaire beaucoup plus exigü. Mais malgré ces conditions difficiles, nous poursuivons nos travaux avec enthousiasme.

En veillant à ne pas reproduire les mêmes erreurs que nos prédécesseurs, nous avons imaginé, conçu et progressivement réalisé un dispositif qui répond au mieux au cahier des charges que nous nous sommes fixés. Le but étant de permettre l'observation de la formation des cristaux d'eau au cours du gel des bulles de savon, afin d'en faire une étude physique.

### **Nous avons établi progressivement le cahier des charges suivant :**

- Créer une enceinte peu encombrante et la plus isolée thermiquement possible.
- refroidir l'air intérieur à une température la plus basse possible
- créer différents accès pour introduire l'eau savonneuse, l'air et les surfaces supports des bulles.
- permettre la mesure de la température de l'air à l'extérieur et l'intérieur de l'enceinte.
- permettre la mesure du taux d'hygrométrie de l'air à l'intérieur de l'enceinte.
- permettre les meilleures conditions d'observation des bulles et des cristaux : observation à l'œil nu ou à l'aide d'un appareil photo ou caméscope.
- assurer l'éclairage de la bulle et de ses cristaux.

Nous nous étions fixés 4 à 6 mois pour réaliser ce nouveau dispositif...mais il nous a fallu près d'un an pour y parvenir car de nombreuses difficultés ont été rencontrées.... Les « anciens » qui nous ont rendu visite au lycée à plusieurs reprises, puis au village « fête de la science » à Laval, nous ont dit que c'était normal !

Voici donc notre histoire



Photo 1 : Avec les « anciens » Rémi et Mathilde, à gauche, à la « Fête de la science »

## II. Nos premiers dispositifs : bonnes et mauvaises surprises

### 1. Comment créer une enceinte isolée thermiquement ?

L'isolation thermique parfaite existe-t-elle ?

Nous nous sommes posés cette question et notre tableau blanc à l'atelier s'est vite noirci d'idées. Au final, après avoir réfléchi sur les isolants existants pour le bâtiment, nous avons fini par imaginer l'enceinte « rêvée » (voir figure 1) :

La conduction est un premier mode de transfert d'énergie donc l'absence de matière permet de ne pas avoir ce mode d'où l'idée du vide entre deux parois. Le rayonnement est également un mode de transfert d'énergie, il faudrait donc que la paroi extérieure soit totalement réfléchissante à tous les rayonnements (visible, mais aussi ultraviolet, infrarouge ...).

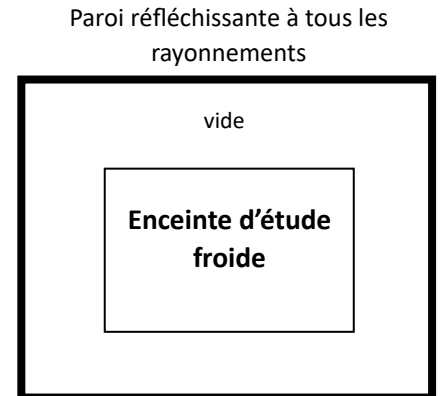


Figure 1 : Le dispositif idéal

Comment enfin maintenir les parois entre elles et avec l'environnement extérieur ? Des attaches, des supports sont nécessaires pour les maintenir en place. Donc d'inévitables « ponts thermiques ». Evidemment, nous avons renoncé et compris que nous ne parviendrons pas à « interdire » totalement le transfert d'énergie intérieur/extérieur, mais nous pouvons le ralentir au maximum.

Pour cela, quel matériau pourrait isoler le mieux l'enceinte dans laquelle nous poserons la bulle ? Nous avons listé certains matériaux utilisés dans l'habitat. Une grandeur physique s'est imposée à nous : la conductivité thermique car elle permet de mesurer la résistance du matériau au transfert thermique (voir figure 2). Il s'agit de l'énergie traversant une paroi du matériau sur un mètre d'épaisseur en une seconde et pour une différence de température entre les surfaces de 1°C.

Matériau	Bois	Laine de verre	Laine de roche	Polystyrène (expansé)	Air	PVC	Verre
$\lambda$ (en $W.m^{-1}K^{-1}$ )	$\approx 0,15$	0,030-0,046	0,033-0,044	0,036	0,026	0,17	1,2

Figure 2 : Quelques valeurs de conductivité thermique. D'après Internet.

Finalement, en tenant compte de son prix, de sa facilité à être usiné, nous avons décidé de procéder à nos premiers essais avec une plaque de polystyrène expansé.

### 2. Comment refroidir ?

Très vite, nous avons songé à introduire des blocs réfrigérants dans notre enceinte fermée. Mais que pouvons-nous en espérer ? Nous souhaitons qu'ils absorbent l'énergie thermique de l'air afin que sa température dans l'enceinte diminue suffisamment pour permettre l'apparition des cristaux sur les bulles de savon. A la première utilisation, les pains de glace que l'on met couramment dans les glaciers ne nous ont pas paru très performants. En cherchant une meilleure solution, nous avons découvert la notion d'eutectique et le schéma ci-contre (voir figure 3, d'après [3]).

(d'octobre 2022 à juin 2023)

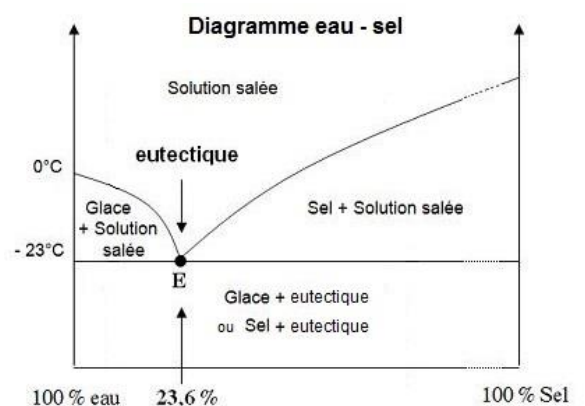


Figure 3 : Le diagramme eutectique eau-sel. D'après [3]

Pour réaliser nous-mêmes des mélanges réfrigérants performants, nous devons réaliser des solutions d'eau salée à 23,6% en masse. Pour un tel mélange d'eau salée appelé « eutectique », le comportement lors d'un changement d'état est similaire à celui d'un corps pur. Notamment la température du mélange reste constante lors des changements d'états de fusion et de solidification. Si nous parvenons donc à réaliser un tel mélange et à le solidifier en le refroidissant suffisamment dans un congélateur, sa température une fois sortie se maintiendra à  $-23^{\circ}\text{C}$  ( $-21,6^{\circ}\text{C}$ , selon une autre source confirmée par M. Bulou) tant que la fusion des blocs ne sera pas terminée.



Introduits dans notre enceinte fermée (voir photo2), les blocs réfrigérants nous permettent d'espérer que la température de l'air dans l'enceinte soit maintenue constante, et à des températures basses et ce, pendant de longues durées.

Photo 2 : mélanges « eutectique » dans l'une de nos enceintes

L'idée de préparer nous-mêmes un liquide réfrigérant nous a séduit, d'autant plus que cela nous permettrait de remplir des récipients de notre choix. De plus, la température de l'eutectique est basse ( $-21,6^{\circ}\text{C}$ ) et le sel n'est pas couteux ! Nous avons donc réalisé des solutions d'eau salée à 236g/L, rempli différents récipients que nous avons déposés dans notre petit congélateur. Celui-ci est parvenu à solidifier nos mélanges, parfois péniblement si les récipients étaient trop grands et si la température dans notre atelier était trop élevée (jusqu'à  $30^{\circ}\text{C}$ , dans ce cas le congélateur ne descend pas en dessous de  $-19^{\circ}\text{C}$  !). Nous avons atteint la limite des performances de notre congélateur, mais il est parvenu jusqu'à présent à solidifier tous nos mélanges.

La dissolution du chlorure de sodium nous paraissait aisé. Cependant, nous nous sommes rendus compte récemment d'une erreur dans la réalisation de nos solutions. En effet, une solution de concentration en masse égale à 236g/L n'est pas une solution de pourcentage en masse 23,6%. A cette forte concentration en effet, 1 litre d'eau salée ne pèse pas 1000g, comme nous avons pu le constater par la suite !

Nous avons décidé d'établir la relation entre la concentration en masse d'une solution salée et le pourcentage massique de celle-ci. Après discussions et comme nous ne souhaitons pas consommer trop de sel, nous avons opté pour le protocole suivant :

Nous avons décidé de préparer une solution à 25% en masse de sel. Pour cela nous avons pesé 25,00 g de sel dans un bécher auquel nous avons ajouté de l'eau distillée pour atteindre 100,00 g au total. Après avoir bien homogénéisé la solution, nous avons prélevé à l'aide d'une pipette jaugée, 50,0 ml de cette dernière que nous avons versé dans un bécher propre et sec et préalablement taré avec une balance électronique de précision. Nous étions ainsi certains d'avoir 50,0 mL d'une solution concentrée à exactement 25% de sel. La masse totale de cet échantillon est 59,36g. Il contient nécessairement  $0,25 \times 59,36 \text{ g} = 14,84 \text{ g}$  de sel.

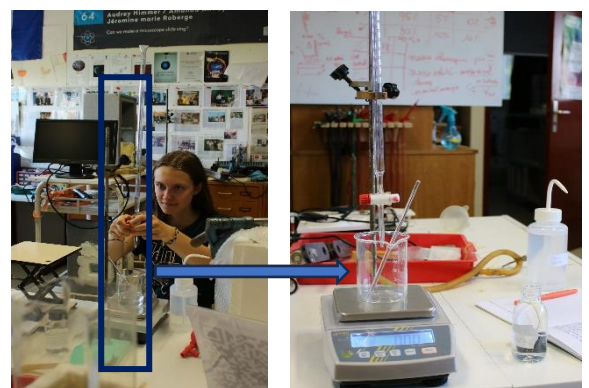


Photo 3 : Méline, en pleine

Nous ajoutons à cet échantillon, de l'eau distillée à l'aide d'une burette graduée par pas de 2,0 mL (voir photo 3). La masse de sel reste constante mais le volume de la solution augmente de 2,0 mL à chaque pas et nous mesurons la masse de chacune des solutions.

Solutions	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>
Volume de solution V <sub>sol</sub> (en mL)	50,0	52,0	54,0	56,0	58,0	60,0	62,0	64,0	66,0	68,0	70,0
Masse de la solution m <sub>sol</sub> (en g)	59,42	61,41	63,50	65,43	67,90	69,40	71,39	73,37	75,38	77,35	79,35

On en déduit, par calcul le pourcentage en masse de chacune des solutions (p) et leur concentration en masse (t) :

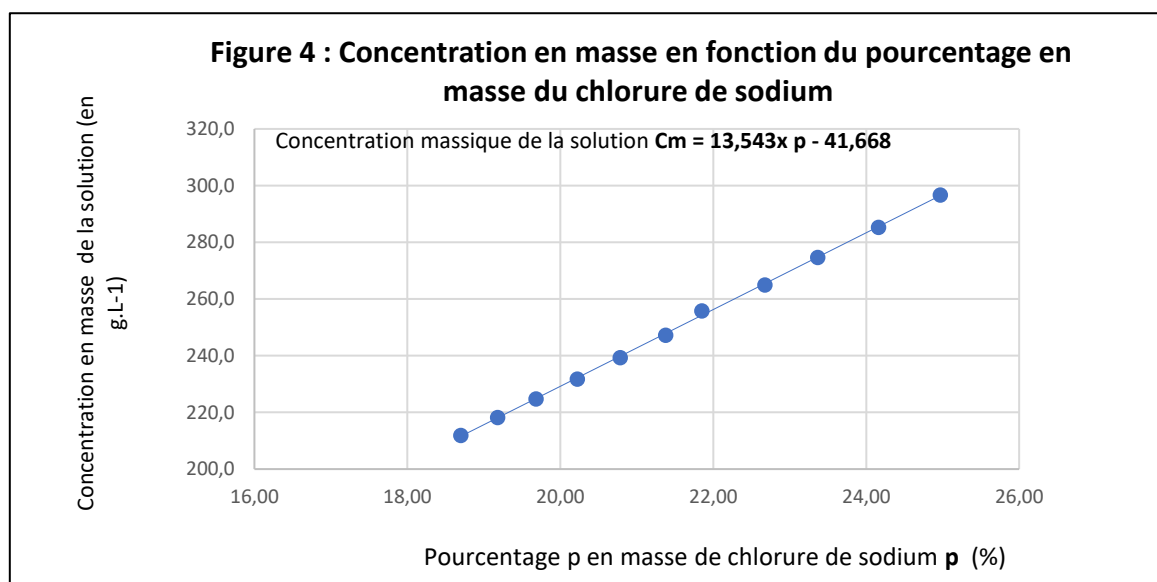
$$p_{(\text{en}\%)} = \frac{m_{\text{sel}}}{m_{\text{sol}}} \times 100 = \frac{14,84}{m_{\text{sol}}} \times 100$$

$$t_{(\text{eng.L}^{-1})} = \frac{m_{\text{sel}}}{V_{\text{sol}}} = \frac{14,84\text{g}}{V_{\text{sol}}}$$

Solutions	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	S <sub>7</sub>	S <sub>8</sub>	S <sub>9</sub>	S <sub>10</sub>	S <sub>11</sub>
Pourcentage en masse p (en %)	24,97	24,16	23,37	22,68	21,85	21,38	20,78	20,22	19,68	19,18	18,70
Titre en masse t (en g/L)	296,7	285,4	274,8	265,0	255,9	247,3	239,4	231,9	224,8	218,2	212,0

Pour toute cette étude, nous avons utilisé non pas du sel du commerce mais du chlorure de sodium fourni par une entreprise de produits chimiques. La pureté est alors assurée à 99%.

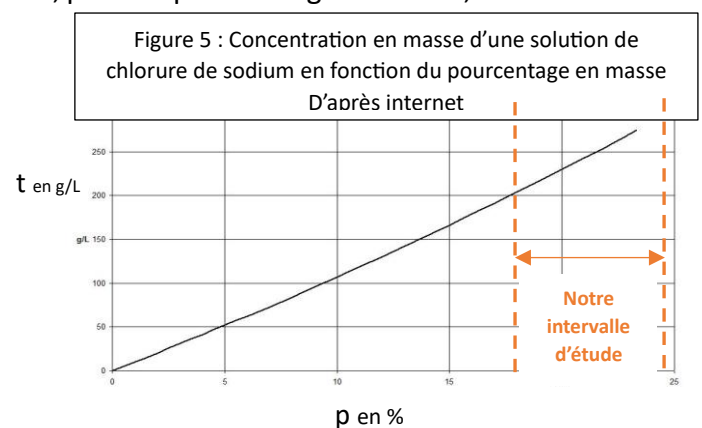
Nous avons pu tracer la courbe suivante (voir figure 4) :



Les points étant bien alignés, nous avons pu modéliser nos mesures à l'aide d'une fonction affine.

Nous avons tout de même eu un doute sur notre travail. En effet, nous nous attendions à une ordonnée à l'origine égale à 0 et donc à une fonction linéaire. En effet, pour un pourcentage de sel nul, la concentration en masse est forcément nulle.

Nous avons cherché une erreur de notre part et c'est finalement sur internet (figure 5, d'après internet), en espérant retrouver cette courbe que nous pensons avoir comprise. De fait sur une large échelle de 0 à 25% il n'y a pas de proportionnalité entre les deux grandeurs, mais en restreignant l'étude à un petit intervalle (ce que nous avons fait), nous pouvons assimiler la courbe à une portion de droite qui ne passe pas par l'origine.



Désormais confiants, nous pouvons donc utiliser la relation  $t = 13,543x p - 41,668$

Nous préparons donc une solution à  $13,543 \times 23,6 - 41,668 = 277,9\text{g/L}$ . Nous pesons donc 555,8g dans notre fiole jaugée de 2L (au lieu de 472g auparavant). Cela fait un très beau tas...et une très longue agitation pour le dissoudre ! (voir photo 4). Le préparateur nous a dit que pour dissoudre de grandes masses de sel, il était préférable de chauffer l'eau au préalable, mais comme nous procédons à la dissolution dans une fiole jaugée de 2L, nous n'avons pas osé la chauffer.

Sans en être certains, car d'autres paramètres ont été modifiés durant la même période, nous pensons que cette petite correction a apporté une meilleure efficacité de nos blocs réfrigérants.



Photo 4 : Yenuli en pleine « dissolution »

### 3. Quel dispositif ?

Le tableau blanc de notre atelier s'est très vite rempli des idées de chacun. Quelle taille ? Quels matériaux ? Comment voir ? comment refroidir ? Robin a fait de très nombreuses esquisses sur ses cahiers (photo 5) :

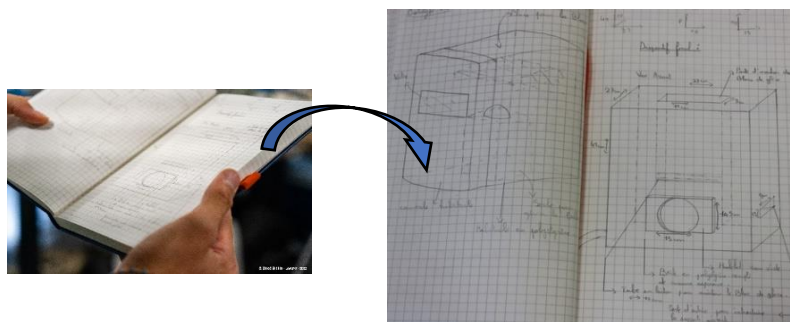


Photo 5 : Des esquisses parmi bien d'autres sur l'un de nos cahiers de laboratoire

#### Le premier dispositif...

Nous avons réalisé un premier dispositif en confectionnant une petite enceinte de 30 cm de large et d'environ 20 cm de profondeur à l'aide d'un isolant d'épaisseur 6 cm que nous avons découpé avec une scie (photo 6). Le volume intérieur est dimensionné pour accueillir un bloc de glace et une surface givrée sur laquelle nous espérons faire geler les bulles. Nous avons aménagé une entrée avec de la laine de verre permettant de disposer ou d'enlever le bloc, Nous avons prévu une fenêtre d'observation en verre à l'avant ainsi qu'une ouverture d'éclairage à l'arrière de l'enceinte.

Ce premier dispositif n'a jamais vu une bulle gelée !

(octobre-novembre 2022)



Photo 6 : Notre premier dispositif

En effet, nous avons sous-estimé l'effet suivant : au-dessus du pain de glace, la température de l'air augmente progressivement facilement de 4-5°C sur une dizaine de centimètres. Nous avons tenté de mettre en hauteur le pain de glace pour voir si le phénomène était de même ampleur pour l'air situé sous celui-ci, il n'en était rien et nous avons même été surpris de constater une bonne homogénéité de la température. Ce premier dispositif, très éphémère, nous aura convaincu de l'importance de disposer les blocs réfrigérants au-dessus de l'air que nous cherchons à refroidir. Nous avons également pris conscience qu'il n'est pas si évident d'obtenir une enceinte très bien isolée thermiquement. Nous avons appris à scier du polystyrène, utiliser un pistolet à colle, découper du verre... mais nous avons vite compris que nous allions devoir progresser en bricolage et réfléchir à un dispositif plus performant que ce premier dispositif qui a rejoint très rapidement notre "cimetière à projet" !

### Le deuxième dispositif...plus prometteur

(novembre 2022-juin 2023)

Pour réaliser le deuxième dispositif et simplifier notre travail de bricolage, nous avons adapté une boîte en polystyrène fournie par l'un de nos parents. Cette boîte dont les parois ont 40mm d'épaisseur, a une hauteur de 55cm, une largeur de 36cm et une profondeur de 25 cm. Etant bien grande pour accueillir une petite bulle, nous avons décidé de condamner un bon tiers de la boîte à l'aide de mousse expansive (1).

Nous avons découpé au cutter une fenêtre dans le couvercle et au fond de la boîte (2) et (4) pour y aménager les fenêtres d'observation et d'éclairage (voir figure 6).

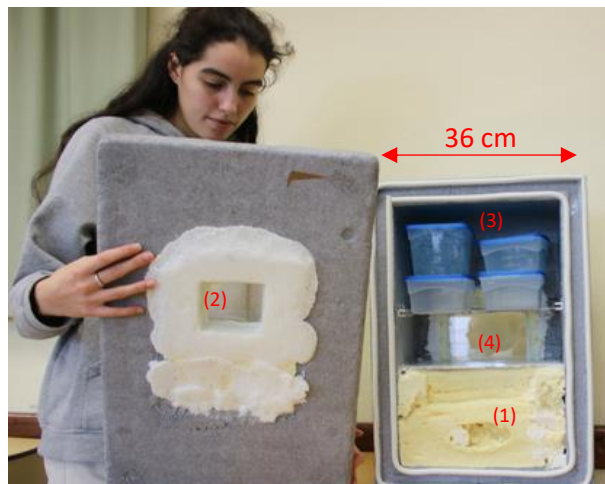


Figure 6 : Joséphine, refermant le dispositif

Pour réaliser nos fenêtres nous avons utilisé dans un premier temps du plexiglas, mais celui-ci est sensible aux rayures et n'est pas facile à découper. Nous avons donc opté pour du verre d'épaisseur 2,0mm, assez facile à découper avec l'aide du préparateur du lycée adepte du travail de la faïence.

Afin de supporter les blocs réfrigérants, nous avons disposé des barres que nous avons découpées avec une scie à métaux. Il nous paraissait important que le support des blocs puisse permettre autant que possible la circulation verticale de l'air. Nous nous sommes posé la question de la nature du matériau à utiliser : métal ? bois ? pvc ?

Les supports doivent être suffisamment solides pour supporter les quelques kilogrammes des blocs et ne pas être trop difficile à refroidir. En effet, une fois introduit dans l'enceinte, les blocs doivent absorber en priorité l'énergie de l'air et les matériaux disposés dont les supports de nos blocs doivent fournir le moins d'énergie possible lors de leur introduction. M.Michel nous a conseillé de nous intéresser à la capacité thermique des matériaux et d'« écouter les unités ». La capacité thermique d'un matériau s'exprime en effet en  $J \cdot ^\circ C^{-1} Kg^{-1}$ . Il s'agit donc de l'énergie nécessaire pour refroidir ou réchauffer de 1°C (ou 1 Kelvin) un Kg du matériau (voir figure7).

Figure 7 : Quelques valeurs de capacité thermique massique pour différents matériaux, relevées sur Internet

Matériau	Aluminium	Fer	Cuivre	Zinc	Laiton	PVC	Bois
$C_m$ (en $J \cdot K^{-1} Kg^{-1}$ )	897	444	385	388	377	>1000	1200-2700
Commentaire	Oui mais plus couteux	Non pur dans le commerce	Trop souple	Non pur dans le commerce	Oui en tube creux ou plein ou barres	Oui en tube creux ou non ou barres	Oui



Afin de ne dépenser que peu d'énergie pour refroidir le matériau choisi, il nous faut donc en choisir un possédant une capacité thermique massique la plus faible possible et minimiser la masse utilisée. Nous avons opté pour des tubes creux en laiton (un alliage de cuivre et zinc) avant finalement de choisir des barres fines en laiton, qui soutiennent mieux les blocs réfrigérants car ne roulent pas... ce qui évite de déstabiliser les blocs voire de provoquer leurs chutes.

Nous avons réalisé une ouverture rectangulaire sur le côté afin d'introduire nos supports sur lesquels nous déposons nos bulles, ainsi qu'un trou afin d'introduire le tube contenant la solution savonneuse et permettant d'insuffler l'air des bulles. Une fois les blocs introduits, nous faisons alors les essais en fermant le couvercle avec du scotch ou en ajoutant de la laine de verre afin de limiter autant que possible les fuites d'air.

Nous avons été rassurés de constater, balayant ainsi nos craintes, que les ouvertures latérales ne modifient en rien la température de l'air intérieur ! Par contre nous avons observé l'apparition de buée sur les vitres ce qui limite de manière évidente nos observations tout en étant certainement à l'origine de pertes thermiques. Malgré tout, nous avons été encouragés par un thermomètre indiquant  $-13^{\circ}\text{C}$   $-14^{\circ}\text{C}$  de manière très durable.

### **...Vers un double vitrage !**

Nous nous sommes très vite convaincus de l'importance de réfléchir à la réalisation d'un double vitrage. Nous avons repéré sur internet une entreprise capable de réaliser des doubles vitrages à nos dimensions, mais nous avons préféré les réaliser nous-même, craignant un achat coûteux et finalement inutile. Ce ne fût pas compliqué de réaliser ce double vitrage qui a permis la diminution de l'apparition de buée mais sans la rendre inexistante. Nous avons beaucoup essayé d'absorber l'humidité de l'air en utilisant dans un premier temps de petits sachets absorbant l'humidité. Nous avons même tenté de remplir l'intervalle entre les vitres d'un autre gaz tel que le gaz carbonique à priori moins conducteur thermiquement que l'air...

Mais les essais ne furent pas concluants et l'apparition de buée entre les vitres est resté longtemps un problème majeur.

Malgré cette difficulté, nous avons commencé à observer (et admirer) le gel des bulles en filmant et visionnant sur un écran d'ordinateur. C'est lors de ces multiples essais, que nous avons découvert la difficulté et l'importance de l'éclairage. Nous avons tenté l'éclairage naturel, l'éclairage par panneaux lumineux Del (même introduit à l'intérieur de l'enceinte). Nous avons essayé différents fonds etc...

Nous gardons de ces nombreux essais et de toutes nos observations quelques certitudes :

- Un fond noir permet un très beau contraste (cristaux blancs sur fond noir).
- Une lumière naturelle notamment rasante, permet d'obtenir de magnifiques couleurs des cristaux.
- Un changement d'inclinaison d'un écran ou d'une source lumineuse d'un ou de quelques degrés seulement influent beaucoup sur les observations.

## **4. Comment mesurer ?**

*(décembre 2022-juin 2023)*

La grandeur la plus importante à mesurer pour notre projet est bien sûr la température. Pour ce faire, nous avons préféré des thermocouples disponibles au lycée plutôt que des thermomètres à alcool. Peu encombrants, fins et longs, ils permettent de mesurer la température à différents endroits parfois difficile d'accès. Il est possible de le relier directement à des multimètres adaptés qui donnent alors des valeurs de

température, mais afin d'avoir l'évolution dans le temps de celles-ci nous avons préféré exploiter directement la tension à leurs bornes.

Ces thermocouples sont de type K (fils d'alumel et de chromel). Leur sensibilité  $s$ , grandeur qui correspond à la tension à leurs bornes si une différence de température entre la « soudure chaude » et la « soudure froide » est égale à  $1^\circ\text{C}$  a pour valeur  $s = 42,0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

Nous espérons une différence de température d'une quarantaine de degrés entre l'extrémité du thermocouple (environ  $-20^\circ\text{C}$  espérée dans l'enceinte) et la soudure « froide » (environ  $20^\circ\text{C}$  dans notre salle-En réalité entre  $13$  et  $32^\circ\text{C}$  !) Nous pouvons espérer une tension, notée  $U_{th}$ , égale à environ  $40 \times 42 = 1680 \mu\text{V}$  soit  $1,680\text{mV}$  ce qui est très peu ! Il est donc important d'amplifier cette tension.

Même si nous ne sommes pas dans une filière technique et que nous n'avons jamais appris l'électronique, nous avons dû travailler en autodidacte, utiliser des ressources internet et nous avons finalement appris quelques bases de l'électronique. Tout d'abord, nous avons travaillé avec des maquettes pédagogiques dont les branchements sont limités aux deux entrées, à la borne de sortie et aux bornes d'alimentation. Le but était de maîtriser les montages simples avec un Amplificateur Opérationnel (AOP) ainsi que son alimentation. Ensuite, rapidement, nous avons travaillé sur les platines d'essais.

Pour amplifier la faible tension  $U_{th}$  attendue aux bornes de notre thermocouple, nous avons réalisé ainsi un montage « *amplificateur inverseur* » avec des valeurs de résistances égales à  $R_1 = 1\text{k}\Omega$  et  $R_2 = 10\text{k}\Omega$  (voir figure 8). La tension est dans un premier temps amplifiée d'un facteur  $-\frac{R_2}{R_1}$  donc ici d'un facteur  $-10$ . Nous avons voulu multiplier par  $-10$  et non par  $10$  car pour notre thermocouple la « soudure chaude » (son extrémité) qui sera introduite dans l'enceinte sera en fait à une plus basse température que la « soudure froide » restée à l'extérieur. La tension  $U_{th}$  à amplifier est donc négative. Elle devient positive après cette première amplification et égale à  $-10 \times U_{th}$

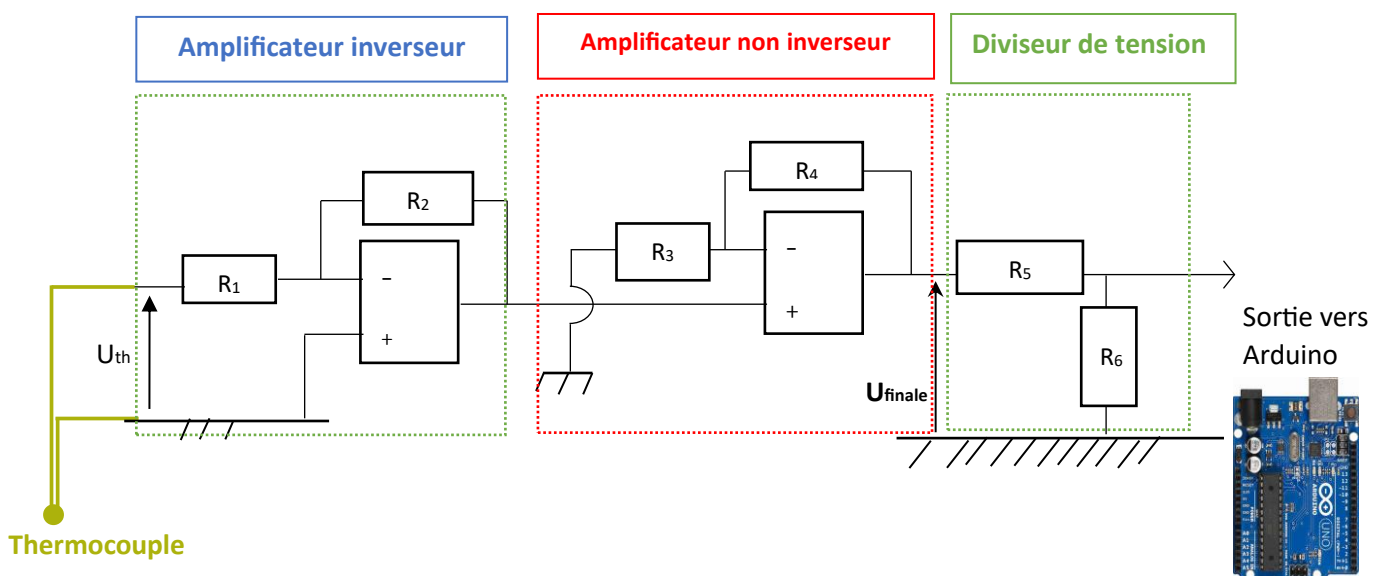


Figure 8 : Schéma de notre montage électronique permettant d'afficher la température

Cette amplification n'est pas suffisante. Nous amplifions donc une 2<sup>ème</sup> fois avec cette fois ci un montage amplificateur *non inverseur*, la tension est amplifiée d'un facteur  $\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$  (voir figure 8). Nous avons choisi par exemple  $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$  et  $R_4 = 820 \text{ k}\Omega$  et donc une amplification de  $821$ . Notre tension  $U_{finale}$  est désormais égale à  $-8210 \times U_{th}$ . Si nous notons  $A$  l'amplification globale de notre circuit, alors ici  $A = -8210$ .

Pourquoi avons-nous ajusté nos valeurs de résistance pour obtenir un tel facteur d'amplification et pourquoi avons-nous procédé en deux étapes ? D'une part, il est recommandé de ne pas amplifier au-delà d'un facteur 1000 avec un seul montage amplificateur. D'autre part avec un tel facteur nous espérons une tension comprise entre 0V (pas de différence de température entre l'intérieur de l'enceinte et l'extérieur) et  $-1,68\text{mV} \times (-8210) = 13,8\text{V}$  (si la différence de température est environ égale à  $40^\circ\text{C}$ ). Or cette tension est proche de la tension d'alimentation de nos montages (tension symétrique  $-15\text{V}/15\text{V}$ ) qui ne peut être dépassée sinon il y a saturation. Nous devons donc nous restreindre à une tension amplifiée inférieure à 15V.

Une difficulté majeure que nous avons rencontrée est la compensation de l'offset. En effet, nous amplifions une tension initialement très faible de l'ordre du mV. Or tous les AOP présentent un petit défaut : une petite tension continue parasite nommée « offset ». Le facteur d'amplification étant important, l'offset est également amplifié. Cette tension indésirable peut être facilement évaluée. En effet, en l'absence de différence de température entre les 2 soudures nous nous attendons à mesurer une tension nulle. Or ici elle peut être égale à quelques dixièmes de Volt et varie d'un AOP à l'autre.



Photo 7 : Robin, en plein « essais »

En cherchant (photo 7), nous avons appris que sur certains AOP (les AOP81), il était possible de compenser l'offset à l'aide d'une résistance variable de  $100\text{k}\Omega$  reliés à deux broches du circuit intégré. Nous avons essayé et cela marche bien ! Nous portons les deux « soudures » du thermocouple à la même température et en quelques tour de vis, nous parvenons à rendre la tension de sortie nulle !

Au final, nous pouvons par exemple brancher une carte d'acquisition à la sortie de notre deuxième amplificateur. La nôtre étant limitée à des mesures de tensions comprises entre  $-10$  et  $+10\text{V}$ , nous devons adapter notre facteur d'amplification  $A$  en conséquence.

Nous avons alors  $s(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}) = U_{\text{th}}$  et  $U_{\text{finale}} = A \times U_{\text{th}}$

$$(\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}) = \frac{U_{\text{finale}}}{A \times s} \quad \text{et donc} \quad \theta_{\text{int}} = \frac{1}{A \times s} \times U_{\text{finale}} + \theta_{\text{ext}}$$

La sensibilité du thermocouple (de type K) est connue soit  $s = 42,0\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Par exemple si notre facteur d'amplification est égal à  $-8210$ , alors la relation reliant tension finale  $U_{\text{finale}}$  et température est :

$$\theta_{\text{int}} = \theta_{\text{ext}} - 2,90 \times U_{\text{finale}}$$

Parfois nous préférons mesurer la tension à l'aide d'une carte Arduino. Le problème est qu'une telle carte ne traite que les tensions comprises entre 0 et 5V. Dans ce cas, nous pouvons réduire le facteur d'amplification  $A$  ou le maintenir et réaliser un dispositif diviseur de tension à l'aide de deux résistances. Bien choisies (par exemple  $R_5 = 220\text{ k}\Omega$  et  $R_6 = 100\text{ k}\Omega$ ), la tension finale peut être divisée par un facteur 3, puis envoyée à la carte Arduino (voir figure 8).  $U_{\text{finale}}$  étant limitée à  $+15\text{V}$  (valeur de saturation), la tension traitée par la carte ne pourra être supérieure à  $+5\text{V}$ , ce qui nous rassure car cela « protège » celle-ci. Le script Arduino nous permettant la lecture directe de la température à l'écran de notre ordinateur est porté en annexe 4.

Actuellement, nous avons effectué 3 montages pour trois thermocouples et nous pouvons donc suivre l'évolution dans le temps de la température à trois endroits différents.

### III. Vers un dispositif optimisé

(octobre-novembre 2023)

Malgré nos premières satisfactions, nous avons trouvé trois défauts à notre dispositif :

- Le volume d'air à refroidir restant assez important, il faut un grand nombre de blocs réfrigérants et notre congélateur a du mal à atteindre des températures assez basses.
- La buée entre les vitres est très handicapante pour nos observations.
- Nous parvenons à atteindre des températures basses autour de  $-14^{\circ}\text{C}$  mais difficilement en dessous.
- Les bulles qui gèlent sont éloignées d'une vingtaine de centimètres de l'objectif de nos caméscopes ce qui nécessite de zoomer ce qui réduit la qualité de l'image.

Nous avons donc refait un dispositif plus optimisé, que nous avons testé avec succès lors de la « fête de la science » en octobre dernier. Le dispositif que nous avons présenté lors du concours interacadémique à Angers présente des parois très épaisses, un volume intérieur plus réduit afin d'utiliser moins de blocs eutectiques. Surtout nous avons diminué la taille des fenêtres et avons vraiment étudié le moyen d'éviter l'apparition de la condensation sur les vitres notamment entre les deux vitres de la fenêtre d'observation à l'avant du dispositif.

#### Le hublot !

Très frustrés par l'apparition de buée entre le double vitrage de la fenêtre d'observation qui souvent limite fortement nos observations, nous avons cherché à l'améliorer.

Notre première idée était de réaliser un double vitrage démontable afin de pouvoir essayer si de la condensation entre les vitres se forme. Notre idée a été de presser les vitres l'une sur l'autre et pour cela créer le vide entre les deux. Rendre l'espace entre celles-ci très hermétiques à l'air n'a pas été simple car de nombreuses fuites sont apparues. Il faut assurer une bonne adhésion entre les vitres et le support.

Nous avons trouvé des supports en caoutchouc souvent trop petits...avant que M. Michel en trouve de diamètre intérieur de 85mm, conforme à nos attentes. Nous avons découpé une portion de tube en plastique gris de diamètre 90mm sur une largeur de 25mm, et y avons percé un trou pour adapter le tube de la pompe à vide. Nous avons posé les joints, puis les vitres (photo 8). Nous n'avons pas osé utiliser des vitres en verre, car étant peu épaisses nous craignons qu'elles ne résistent pas à la différence de pression.

Nous avons donc opté pour du plexiglass de quelques mm d'épaisseur. Celui-ci ne rompt pas mais est totalement déformé sous l'effet de la pression de l'air extérieur. Nous avons donc finalement choisi des plaques de PMMA (polyméthacrylate de méthyle) d'épaisseur 10mm. Celui-ci, très rigide et très transparent convient parfaitement.



Photo 8 : confection d'un hublot

Thermiquement, il présente l'avantage d'être plus épais que nos vitres en verre et bien moins conducteur (conductivité thermique  $\lambda$  beaucoup plus faible et égale à  $0,18 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  au lieu de  $1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ).

La pompe à vide du lycée nous permet d'aspirer l'air et d'obtenir une pression inférieure à 40hPa. La différence de pression est très largement suffisante pour, sans colle, faire adhérer les vitres, les joints et le corps du hublot. Même si actuellement, le hublot est bien en place, cela n'a pas toujours été le cas et des fuites sont souvent apparues désolidarisant l'ensemble. La surveillance de la pression de l'air dans le

hublot permet de vérifier l'absence de fuite. Notre regard n'étant pas constamment porté sur l'afficheur du pressiomètre, nous avons mis en place un dispositif électronique très pratique en exploitant la tension aux bornes du pressiomètre (voir annexe 3). Ainsi une del verte nous signale une pression inférieure par exemple à 100hPa et une Del jaune puis rouge nous signale une augmentation anormale de pression et l'urgence de procéder à un pompage d'air.



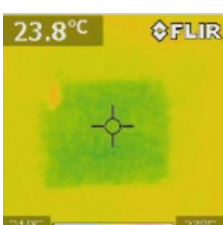
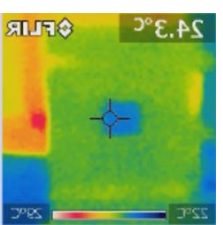
Tout au long de notre travail, *conductivité thermique* et *résistance thermique* ont été deux grandeurs très présentes. Nous avons cherché à déterminer par exemple la résistance thermique de notre nouveau hublot, pour la comparer avec celle de la fenêtre d'observation de notre dispositif précédent. La résistance thermique d'une paroi est d'autant plus grande que sa surface S est faible, que la conductivité thermique du matériau  $\lambda$  est faible et l'épaisseur e de la paroi grande. Elle est égale à  $R_{th} = \frac{e}{S \times \lambda}$  et s'exprime en  $K.W^{-1}$

Le diamètre intérieur du hublot est égal 8,5 cm alors que notre fenêtre initiale est un carré de 8 cm de côté. Également, nous avons fait l'hypothèse que la conductivité thermique de l'air diminue proportionnellement avec la pression de l'air. Ainsi, nous avons pu déterminer les trois grandeurs S, e et  $\lambda$  pour chaque paroi pour notre ancienne fenêtre d'observation puis pour notre nouveau hublot :

	Notre nouveau hublot		Ancien double vitrage (2 <sup>ème</sup> dispositif)	
	Vitre PMMA	AIR (40hPa)	Vitre en verre	AIR
Surface S (en m <sup>2</sup> )	$5,7.10^{-3}$	$5,7.10^{-3}$	$64,0.10^{-4}$	$64,0.10^{-4}$
épaisseur e (en m)	$10,0.10^{-3}$	$25,0.10^{-3}$	$2,0.10^{-3}$	$25,0.10^{-3}$
conductivité thermique ( $W.m^{-1}K^{-1}$ )	0,18	$9,5.10^{-4}$	1,2	0,024

Nos fenêtres d'observation sont assimilables à la superposition de trois parois : paroi vitre- paroi air-paroi vitre. Nous pouvons estimer la résistance thermique de chacune d'entre elles et obtenir par addition la résistance thermique totale de notre fenêtre d'observation dans les deux cas.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant :

	Notre nouveau hublot	Notre double vitrage verre.
Résistance thermique ( <b>en <math>K.W^{-1}</math></b> )		
Résistance thermique vitre (PMMA ou verre)	9,7	0,26
Résistance thermique de la couche d'air	4617	162,7
Résistance thermique vitre	9,7	0,26
Résistance <b>TOTALE</b>	≈ 4630	≈163
Photo infrarouge		

Notre hublot est beaucoup plus performant, à priori d'un facteur proche d'environ 28, et nous avons « thermiquement » bien progressé. Les premiers essais de ce nouveau dispositif ainsi équipé ont été très concluants, car l'air se refroidit très vite et nous avons pu obtenir une enceinte pour laquelle la température de l'air peut descendre jusqu'à  $-18^{\circ}\text{C}$  voire  $-19^{\circ}\text{C}$ , pendant de longue durée. Une caméra infrarouge, prêtée par un lycée voisin, nous a permis de confirmer les performances de notre hublot.

#### IV. Comment gèle une bulle de savon ? ... enfin (septembre-novembre 2023)

Nous espérons commencer à répondre à cette question au mois d'avril ou mai dernier, mais nous n'étions alors pas assez prêts et notre dernier dispositif n'a dévoilé tout son potentiel qu'au mois d'octobre dernier lors de la « fête de la science ». Depuis nous avons été « chassés » de notre atelier au lycée et nous nous réorganisons afin de procéder à une étude plus rigoureuse. Le rêve de notre groupe tout comme celui qui nous a précédé est à la fois d'observer et admirer au laboratoire le gel des bulles mais également d'étudier la formation et la croissance des cristaux. Une seule équipe américaine a procédé à cette étude en parti dans une chambre froide et rédigé un article [4]. Nous avons la chance d'avoir pour partenaire l'un des chercheurs de cette équipe Saurabh Nath, actuellement *au MIT Massachusetts Institute of Technology*.

Nous avons longuement filmé et beaucoup photographié l'apparition des cristaux et leur croissance Il n'a pas toujours été facile de noter nos observations tant il y a de paramètres (et parfois nous étions déconcentrés par le spectacle) mais voici à ce jour nos certitudes :

**La proportion de glycérine dans le mélange d'eau savonneuse est prépondérante dans la vitesse de formation des cristaux.** En l'absence de glycérine la formation des cristaux n'est pas ralentie et elle peut être très rapide au point que l'on semble voir des cristaux fins comme des flèches parcourir la bulle en une ou deux secondes.

**Il n'est pas possible d'obtenir des bulles givrées sur un support sec et propre.** Celui-ci doit disposer des aspérités, des défauts nécessaires à initier la cristallisation. Les tests auxquels nous avons procédé, nous ont conduit à quelques bulles à la vie longue, mais qui ne gèle pas malgré une température de l'air bien en deçà de la température de solidification de l'eau savonneuse. Sous les conseils de Saurabh Nath, nous gelons de l'eau dans les boites de Pétri que nous introduisons ensuite dans l'enceinte. C'est sur ce support glacé et givré que nous réalisons nos bulles.

**Nous avons clairement repéré deux modes de formation de cristaux :**

- **La formation de cristaux « dendrites » :**

C'est le mode que nous avons observé le plus facilement (photo 9).

Des cristaux en forme de dents, croissent dans le film d'eau savonneuse à partir du support. La vitesse de croissance des cristaux dépend de la proportion de glycérine. L'observation est très dépendante de l'éclairage (lumière naturelle, fond noir incliné avec lumière naturelle ou lampe « spot »). A un degré près pour le système d'éclairage l'observation diffère beaucoup !

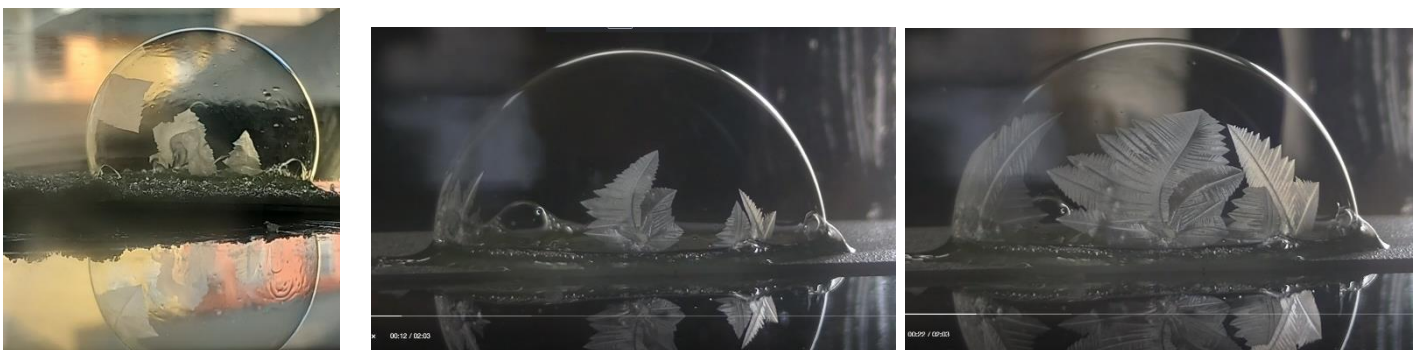
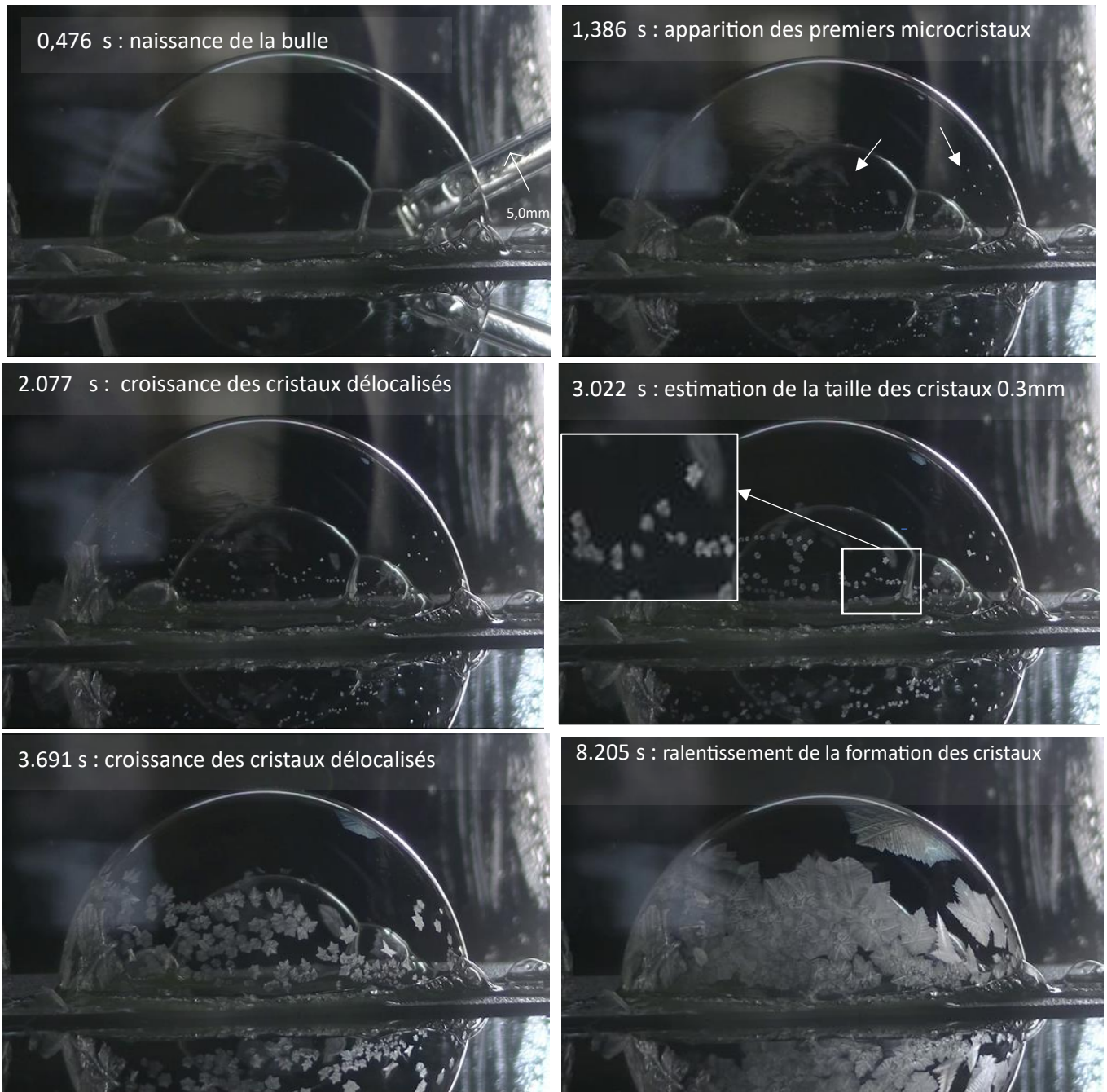


Photo 9 : Croissance de dendrites à partir du support

- **Emergence non locale de cristaux (l'effet « boule à neige »)**

Nous l'observons que depuis le mois de septembre. C'était un mode que nous espérions observer tant il est fascinant. Voici des instantanés des premiers films que nous avons pris du phénomène « boule à neige ».



*Photo 10 : Des instantanés de l'un de nos tous premiers films « boule à neige ».*

Cette vidéo est disponible sur une page de notre site de l'atelier [5] De nombreuses autres devraient l'y rejoindre. Nous y observons facilement l'apparition hors support de nombreux microcristaux qui croissent par la suite. Nous avons envoyé la vidéo à Saurabh Nath, qui nous a répondu :

« I saw the video - it looks absolutely beautiful! In our work, we did see a clear Marangoni effect driving the phenomena of non-local emergence of crystals. Hence I am tempted to say that it is not too different for your case as well. However, I must say that I do not see any visible Marangoni plumes during the freezing process itself. So it is a bit ambiguous.... »

Nous allons devoir améliorer notre maîtrise de l'éclairage pour observer les panaches de Marangoni, qui peuvent être liés ici à une différence de température entre le support et l'air, et vérifier que cet effet que nous découvrons à cette occasion est bien à l'origine de ce surprenant effet « Boule à neige »

## V. Et l'aventure continue... (décembre 2023-mars 2024)

Fin novembre, nous avons appris une bonne nouvelle : notre projet est retenu pour le concours CGénial 2024 ! De plus, le mercredi 6 décembre au Lycée Joachim du Bellay à Angers, nous avons eu la chance d'être sélectionnés pour la finale nationale du concours des olympiades de physique. Cette journée a été très riche en expériences pour nous, mais également en termes de rencontres et d'échanges notamment avec les membres du jury qui nous ont beaucoup encouragés et conseillés.

Dès le lendemain, de retour à Laval, nous avons fait un bilan de la journée, et, comme de nombreuses questions étaient sans réponse, nous avons repris contact avec M. Bulou, notre partenaire à l'Université du Mans. Il nous a accueilli à l'Université le 15 décembre et nous avons pu lui poser de nombreuses questions. Lors de nos échanges, nous avons évoqué notamment l'idée d'effectuer un bilan thermique de l'ensemble de notre dispositif.

Nous étions en effet très surpris par la stabilité de la température de l'air intérieur dans l'enceinte une fois la valeur de la température la plus basse atteinte. Le jury, lors du concours académique nous a invité à réfléchir à un bilan thermique de l'ensemble du dispositif.

### Evaluation thermique de l'ensemble de notre dispositif

Nous avons procédé ainsi. L'enceinte est refroidie avec des blocs eutectiques pendant une heure environ, puis la température de l'air étant stabilisée au plus bas, nous retirons les eutectiques très rapidement et déclenchons l'enregistrement de la température au cours du temps à l'aide de notre thermocouple relié à notre dispositif électronique. L'air intérieur se réchauffe et la température augmente.

Le flux d'énergie entrant dans l'enceinte est  $\phi = \frac{\theta_{\text{ext}} - \theta_{\text{int}}}{R_{\text{th}}}$

avec  $\theta_{\text{ext}}$ , la température constante de l'air extérieur et  $\theta_{\text{int}}$  la température de l'air croissante à l'intérieur de l'enceinte. Par la suite, dans ce paragraphe, nous noterons la température intérieure plus simplement  $\theta$ .

Ce flux entrant permet de réchauffer l'intérieur à savoir l'air et les différents supports dont ceux des eutectiques. Le flux emmagasiné est  $C \frac{d\theta}{dt}$  avec C la somme des capacités de l'air et des supports.

L'égalité des flux conduit à

$$C \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_{\text{ext}} - \theta_{\text{int}}}{R_{\text{th}}}$$

puis à l'équation différentielle du premier ordre

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{R_{\text{th}}C} = \frac{\theta_{\text{ext}}}{R_{\text{th}}C}$$



La solution d'une telle équation est  $\theta = Ke^{-t/\tau} + \theta_{\text{ext}}$  avec la constante de temps  $\tau = R_{\text{th}} \times C$

Au moment du déclenchement de l'enregistrement, nous mesurons une température initiale  $\theta_i$ . Cette mesure nous permet de déterminer K. En effet, pour  $t=0$ ,  $\theta_i = K + \theta_{\text{ext}}$  soit  $K = \theta_i - \theta_{\text{ext}}$

La solution de l'équation est donc  $\theta = (\theta_i - \theta_{\text{ext}})e^{-t/\tau} + \theta_{\text{ext}}$

### Evaluation des capacités thermiques de l'air et des supports.

En l'absence des blocs eutectiques, le volume d'air est égal à 5 litres. La valeur de la capacité thermique volumique de l'air est connue soit  $1,256 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$  et nous pouvons donc évaluer la capacité de l'air à l'intérieur de l'enceinte soit  $C_{\text{air}} = 1,256 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{m}^{-3} \times 5.10^{-3} \text{ m}^3 \approx 6 \text{ J.K}^{-1}$

La capacité thermique massique du laiton, matériau utilisé pour nos supports est égale à  $377 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
La masse de nos supports est proche de 15g. La capacité thermique de nos supports est donc égale à  $C_{\text{support}} = 377 \times 0,015 \approx 6 \text{ J.K}^{-1}$

Une petite plaque en plexiglass blanc posée à la base de l'enceinte et destinée à recevoir les supports givrés a une masse proche de 30g. La valeur de la capacité thermique massique de ce matériau est proche de  $1,47 \text{ J.Kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  d'où  $C_{\text{plaque}} = 1,47 \times 30 \approx 44 \text{ J.K}^{-1}$

Nous estimons donc la capacité thermique globale de l'enceinte intérieure :  $C \approx 56 \text{ J.K}^{-1}$

L'évolution  $\theta$  de la température de l'air dans l'enceinte au cours du temps est la suivante :

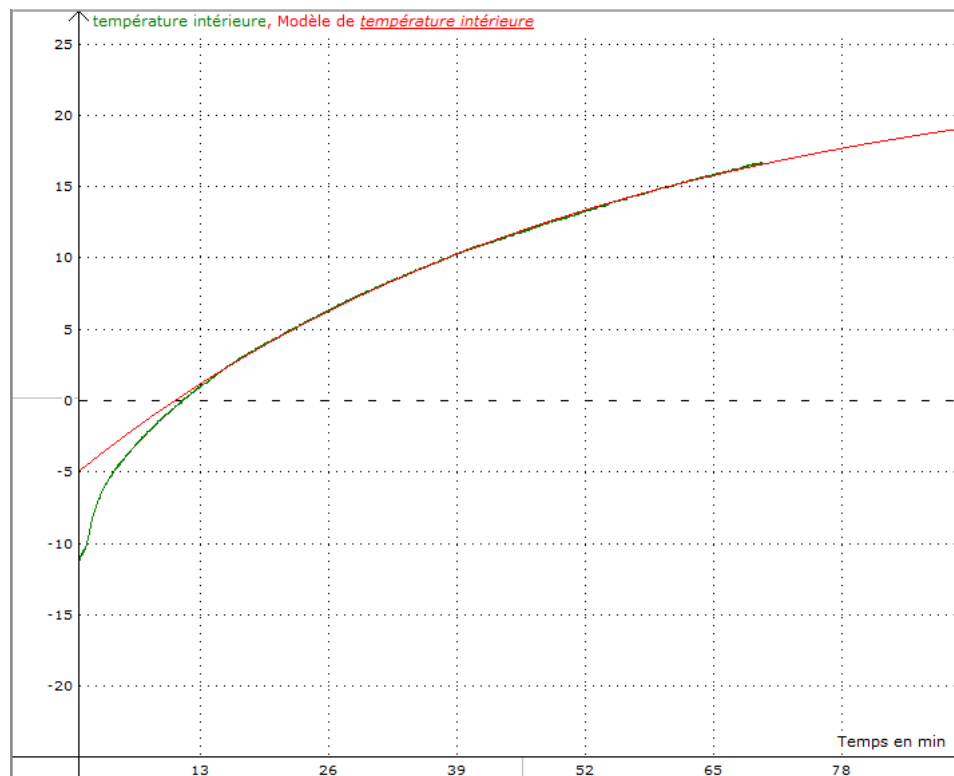


figure 9 : Evolution de la température au cours du temps dans l'enceinte (en vert) et modélisation (en rouge)

Sur l'ensemble de la courbe expérimentale (en vert), il est difficile de modéliser suivant une fonction exponentielle. Dans les premières minutes, le système intérieur est très perturbé par le retrait rapide des blocs eutectiques, aussi avons-nous considéré la courbe après seulement 15 minutes. La modélisation proposée par le logiciel est alors bien exponentielle et la constante de temps est proche ici de 3100 s.

La résistance thermique du dispositif peut être alors évaluée à  $3100/C=3100/56 \approx 55 \text{ K.W}^{-1}$

Nos différents essais ont conduit en fait à des valeurs de constante de temps assez variables (entre 1000 et 3500s). Notre estimation, selon M. Bulou est un peu élevée et nous pensons que notre protocole peut être amélioré. Nous devons par exemple nous assurer d'une meilleure homogénéité de l'air à l'intérieur. La convection doit y être en effet importante. Pour ne pas modifier notre protocole et notre bilan thermique, nous n'avons pas osé pour l'instant introduire un ventilateur dans l'enceinte.

## Exploitation

En présence des eutectiques et quand le régime permanent est installé, traduit par une température de l'air la plus basse et stable, nous pouvons considérer que l'énergie transmise de l'extérieure vers l'intérieure est absorbée par les eutectiques qui permettent le maintien de cette température tant que leur fusion n'est pas terminée. M. Bulou a trouvé une référence [6], précisant la valeur de la chaleur massique de fusion pour les eutectiques eau-sel soit  $L_f=233\text{kJ.Kg}^{-1}$ . La masse de nos blocs eutectiques  $m_{eu}$  est facilement mesurables. Nos blocs peuvent absorber l'énergie  $m_{eu} \times L_f$

En mode permanent, l'énergie qui permet la fusion des eutectiques provient nécessairement de l'air extérieur de l'enceinte. Elle traverse toutes les parois de celle-ci pendant la durée  $\Delta t$ .

Elle est telle que :

$$\phi \Delta t = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \Delta t$$

$$\text{On a donc l'égalité } m_{eu} L_f = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \Delta t$$

Ayant évalué précédemment la résistance thermique du dispositif, nous pouvons en déduire la durée de fusion des eutectiques, pendant laquelle la température de l'air à l'intérieur sera stable :

$$\Delta t = m_{eu} L_f \frac{R_{th}}{\Delta\theta}$$

Par exemple, pour  $m_{eu}=1,1\text{Kg}$  et un écart de température facilement mesurable, par exemple égal à  $35^\circ\text{C}$ , le calcul donne une valeur proche de 400 000s soit un peu plus de 4 jours !

Bien sûr, en pratique, le maintien de la température dans l'enceinte sera forcément réduit par les cycles d'ouvertures et de fermetures auxquelles nous procédons pour introduire notamment les supports givrés ; mais notre bilan nous permet de comprendre le bon maintien de la température basse pendant des heures, ce qui nous permet de procéder sans craindre une chute de la température, à nos essais de gels des bulles.

## Également...

En parallèle, nous poursuivons nos essais. Bien des pistes de travail stimulantes s'annoncent en effet :

Nous essayons d'améliorer nos supports givrés. Très souvent les premières bulles éclatent et notre support contient des restes de bulles gelées, ce que nous appelons « cimetière à bulle ». Les restes de ces bulles précédentes influent peut-être sur l'apparition des premiers cristaux voire leur croissance.

Malgré tout, nous avons obtenus de beaux effets « boule à neige » lors des deux jours de la « fête de la science » ou nous avons multiplié les essais devant le public. Cela nous amène à suggérer qu'il peut être intéressant de réaliser des supports non pas d'eau glacée mais de solution d'eau savonneuse.

Nous avons par ailleurs fait l'inventaire de tous les paramètres qui nous semblent susceptibles d'influer sur la formation et la croissance des cristaux :

- La température de l'air, de l'eau savonneuse, du support, de l'air insufflé.
- Le taux d'hygrométrie de l'air.
- La nature du support sur lequel on forme nos bulles.
- La composition de l'eau savonneuse que nous utilisons pour former les bulles.

Nous nous concentrons sur trois paramètres à savoir la température de l'air, celle du support (nos thermocouples devraient bien nous y aider). Nous cherchons également à étudier l'influence de la glycérine sur la vitesse de croissance des cristaux, la formation ultrarapide des cristaux nous a en effet en son absence parfois beaucoup surpris. Nous espérons pouvoir montrer des gels de bulles et nos toutes dernières observations et interprétations du gels des bulles, lors de notre présentation à la finale à Paris.

## Conclusion-Remerciements

En relisant notre présent compte-rendu, nous nous apercevons du chemin parcouru et de tout ce que nous avons exploré et travaillé pour parvenir à apporter un début de réponse à la question : « Comment gèle une bulle de savon ? ». Nous prenons conscience que plus nous travaillons sur la question, plus les questions se multiplient ... Actuellement, même si nous sommes absorbés par le tournage de notre vidéo « CGénial », nous poursuivons nos recherches sur cette problématique.

Les nombreux travaux de recherche autour de ce projet (et les nombreuses heures passées à travailler), nous ont permis de découvrir de nombreuses notions scientifiques telles que l'électronique, les eutectiques ou encore bien d'autres phénomènes physiques et chimiques très particuliers. Cela nous a permis d'explorer et de comprendre l'étendue infinie du travail de recherche scientifique. En effet, celui-ci peut parfois être décevant, mais il est également rempli de rebondissements et nous as rendus émerveillés plus d'une fois.

Ces recherches autour de notre projet nous ont également amené à travailler avec de nombreuses personnes très intéressantes qui nous ont beaucoup aidé et apporté en termes de conseils. Ainsi, nous souhaitons tout d'abord remercier Laurent BARBIER, préparateur au lycée pour ses nombreux services et conseils, mais également les enseignants pour leur compréhension vis-à-vis du dérangement occasionné au fond des salles de travaux pratiques, l'ancien « atelier » étant détruit pendant cette période de travaux. Nous voulons aussi remercier chaleureusement M. BULOU, chercheur émérite au CNRS du Mans, qui nous a éclairé sur le sujet d'eutectique, de bilan thermique etc...et a eu la gentillesse de nous accueillir sur son lieu de recherche pour que nous puissions lui poser de nombreuses questions. Nous remercions également les organisateurs du concours interacadémique des olympiades de physique à Angers, et les membres du jury notamment M. FORTIN-RIPOCHE rapporteur de notre projet, qui nous a donné de nombreux conseils pour la poursuite de notre projet et de la préparation de la finale nationale.

Ce projet a aussi reçu l'aide de M. NATH, chercheur aux Etats Unis qui, à distance, suit notre projet et interprète nos vidéos.

Enfin, on ne peut pas finir ce dossier sans remercier M. MICHEL, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour, pour nous avoir donné des pistes mais en nous laissant chercher. Pour nous avoir montré comment confectionner notre dispositif et surtout nous permettre d'étudier ce sujet passionnant.

## Bibliographie-Webgraphie

- [1] [mémoire olympiades "Peut-on faire geler une bulle de savon ?"](#) Site des olympiades de Physique
- [2] <https://www.ateliersciencerousseau.fr/bullesdesavon>
- [3] [https://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/devoir3\\_correctiondetaillee2.htm](https://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/devoir3_correctiondetaillee2.htm)
- [4] <https://www.nature.com/articles/s41467-019-10021-6>
- [5] <https://www.ateliersciencerousseau.fr/notre-projet-actuel>
- [6] [https://www.researchgate.net/publication/7431357\\_A\\_quantitative\\_analysis\\_on\\_latent\\_heat\\_of\\_an\\_aqueous\\_binary\\_mixture](https://www.researchgate.net/publication/7431357_A_quantitative_analysis_on_latent_heat_of_an_aqueous_binary_mixture)
- [7] Hachette-Physique-Chimie Terminale spécialité.

## Annexes

**Annexe 1** : Les « schémas de Robin »

**Annexe 2** : Une petite question « grand public » pour la « Fête de la Science »

**Annexe 3** : Surveillance de la pression de l'air dans notre hublot

**Annexe 4** : Les scripts Arduino

## Comment gèle une bulle de savon ?

### Annexes

**Annexe 1** : « Les schémas de Robin »

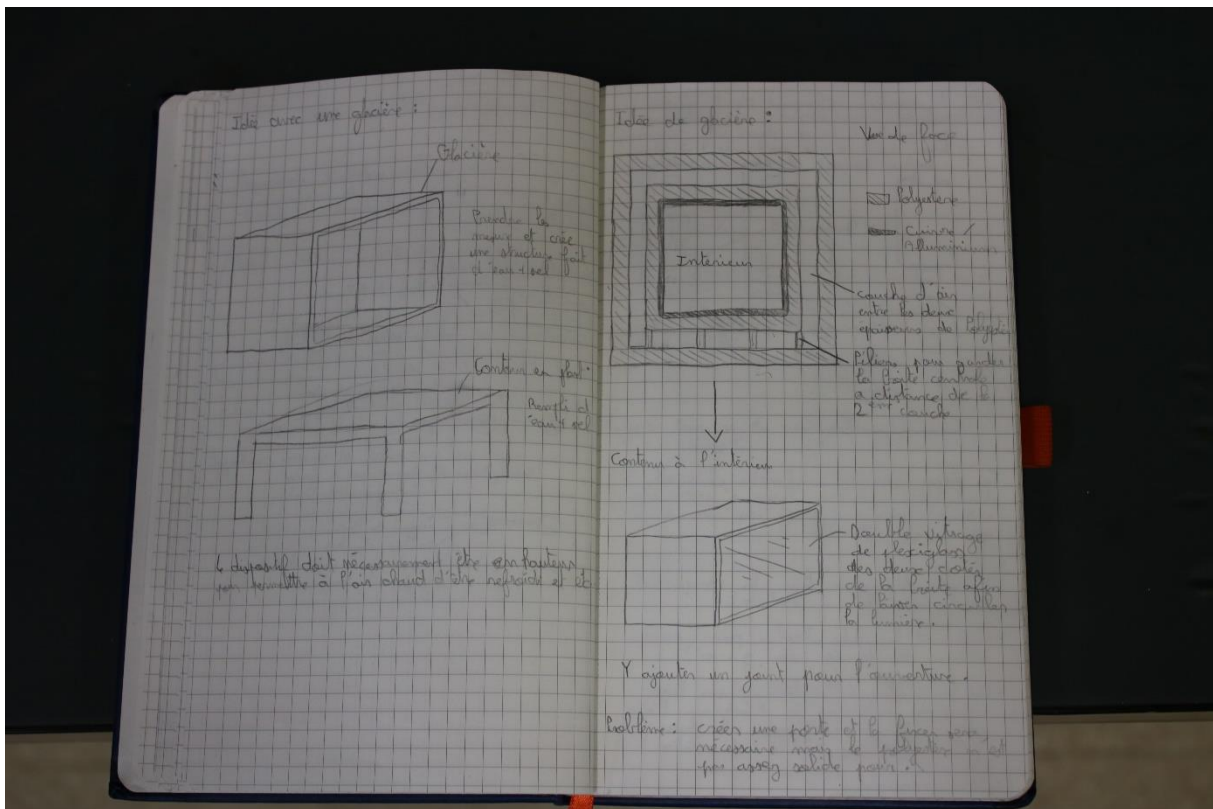
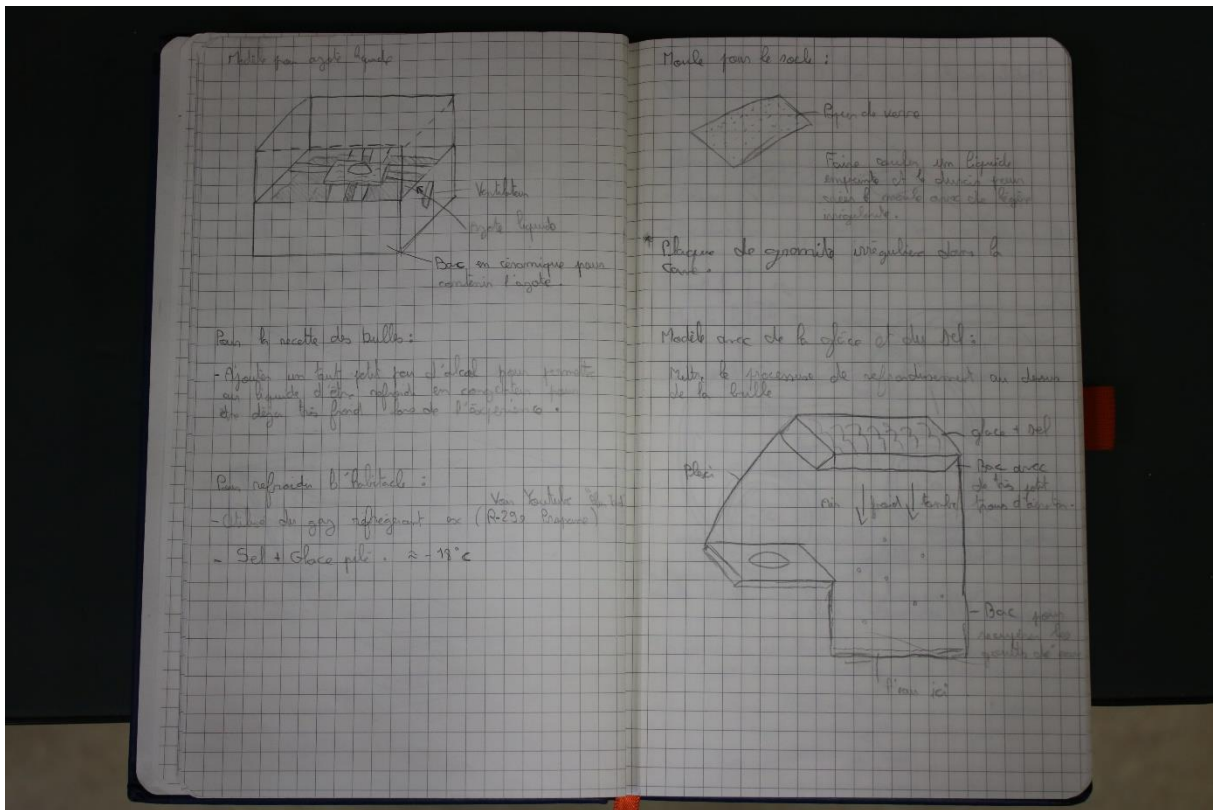
**Annexe 2** : Une petite question « grand public » pour «la Fête de la Science »

**Annexe 3** : Surveillance de la pression de l'air dans notre hublot

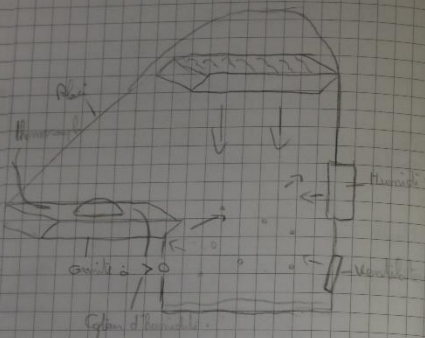
**Annexe 4** : Les scripts Arduino

# Annexe 1 : « Les schémas de Robin »

...sur le cahier de Robin, quelques esquisses parmi bien d'autres...



Modèle simple avec sel + glace :



Quand on mélange l'eau avec du sel la température diminue à  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Avec l'eau + sel la température de fusion diminue à  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Un pain de glace est fait d'eau et de sel et par conséquent se fait de la glace.

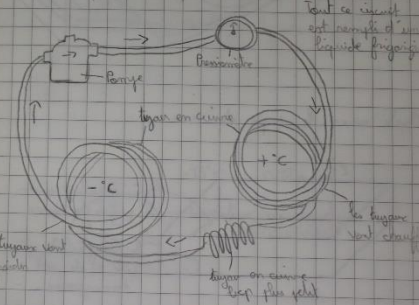
Comment créer un réfrigérateur :

Voir vidéo YouTube "Water table".

Idées du groupe :

- Glace carbonique
- Électrique ou du moins non constante.

Modèle liquide sous pression :

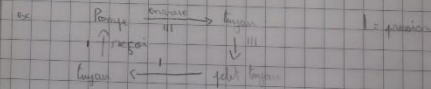


Tout ce circuit est rempli de liquide frigorigère.

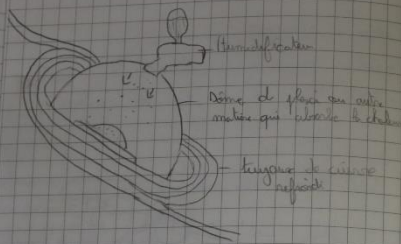
Les tuyaux sont refroidis.

Les tuyaux sont chauffés.

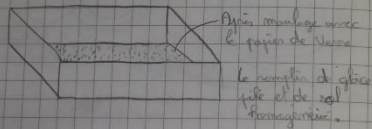
La pompe va permettre d'augmenter la pression grâce au fait que le tuyau de cuivre qui se réchauffe l'entraîne au liquide.



Si on prend le montage de liquide sous pression on peut faire ceci :



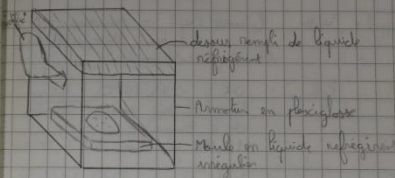
Modèle avec le papier de verre :



Idée de refroidissement :

Voir des pains de glace pour savoir de liquide et créer un montage réfrigérant pour aller aux congélateurs.

- Eau + saumure



$-15^{\circ}\text{C}$   $0,18\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Formation de cristaux.

Idée : Sable + eau autour pain réfrigérant.

## Annexe 2

### Une petite question « grand public » pour la « Fête de la science »



Nous avons participé durant le week-end du 14 au 15 octobre 2023 à l'événement « Fête de la science » à Laval-Virtual. Ce centre a accueilli tout le week-end diverses associations et écoles pour faire découvrir la science au grand public sous la forme de stands.

Cette expérience a été très enrichissante pour nous. En effet, elle nous a permis de faire une première présentation à destination du « grand public », qui fut un succès. Les visiteurs étaient tout de suite attirés par notre démonstration, les enfants comme les plus grands, qui étaient curieux voire émerveillés de voir des bulles geler.

Afin de rendre plus ludique la visite, notamment pour les plus jeunes, les organisateurs nous ont demandés de fournir une petite question à poser au public. Les visiteurs devaient alors reconstituer une phrase avec les différentes lettres gagnées.

Une question sur la résistance thermique, la tension de surface ne nous paraissait pas adapté au « grand public ». Finalement, nous avons proposé la question : « **Quel est le principal constituant d'une bulle de savon ?** ». La question nous paraissait pertinente et amusante, car ainsi posée, elle conduit pour beaucoup à la réponse « eau » ou « savon », oubliant qu'une bulle est remplie d'air. La réponse attendue était donc bien l'air, car nous sous-entendions que le constituant le plus volumineux soit le principal constituant d'une bulle. Nous avons tout de même voulu vérifier par calcul, ce qu'il en était notamment si nous considérons cela en quantité de matière. Y a-t-il alors plus d'air ou plus de solution d'eau savonneuse dans une bulle de savon ?

On sait qu'une bulle est constituée d'une simple couche de savon qui contient à l'intérieur de l'air. Considérons par exemple, une bulle « moyenne » de 5cm de diamètre. Quel est son volume d'air ? Quel est le volume d'eau savonneuse ?

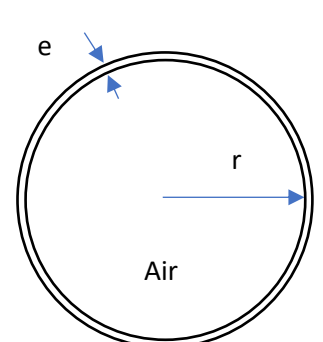
Si nous assimilons la bulle à une sphère parfaite de rayon  $r$  et donc de volume  $V_{\text{air}} = \frac{4}{3}\pi r^3$ , nous calculons :  $V_{\text{air}} = \frac{4}{3}\pi \times 2,5^3 \approx 65 \text{ cm}^3$  soit 65mL ou  $65 \cdot 10^{-3} \text{ L}$

Le volume de l'épaisseur  $e$  de la couche d'eau savonneuse est alors  $V_{\text{eau savonneuse}} = 4\pi r^2 e$

Si on évalue à  $10\mu\text{m}$  l'épaisseur d'une bulle, alors nous pouvons trouver :

$$V_{\text{eau savonneuse}} = 4\pi r^2 \times e = 4\pi \times 2,5^2 \times 10 \cdot 10^{-4} = 0,079\text{cm}^3$$

Sans surprise le rapport  $\frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{eau savonneuse}}}$  est très grand et égal ici à 823.





Comme attendu, nous trouvons que le volume d'air est beaucoup plus important dans une bulle de savon que le volume d'eau savonneuse.

Cependant, qu'en est-il pour les quantités de matière ?

Si nous considérons que l'air est un gaz parfait, alors à 20°C le volume molaire est égal à 24,0 L.mol<sup>-1</sup>

$$n_{\text{air}} = \frac{V_{\text{gaz}}}{V_m} = \frac{65 \times 10^{-3}}{24,0} \approx 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol d'air}$$

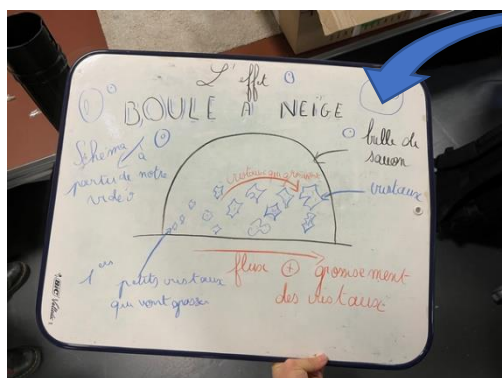
Si nous assimilons l'eau savonneuse à de l'eau pur de masse molaire  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18,0 \text{ g.mol}^{-1}$  et de masse volumique 1,0g.L<sup>-1</sup> alors la quantité de matière est :

$$n_{\text{eau savonneuse}} = \frac{m}{M} = \frac{0,079}{18} \approx 4,4 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Le rapport  $\frac{n_{\text{air}}}{n_{\text{eau savonneuse}}}$  est alors égal à 0,61.

Dans l'exemple que nous avons choisi, il y a donc davantage de molécules dans la couche d'eau savonneuse que de molécules d'air dans la bulle de savon !

Le rayon  $r$  et l'épaisseur  $e$  de la couche d'eau peuvent varier et modifier ce rapport, mais nous pensons que celui-ci sera toujours proche de 1 et nous pensons pouvoir généraliser en écrivant, que le nombre de molécules d'eau dans une bulle de savon est comparable au nombre de molécules d'air dans celle-ci.



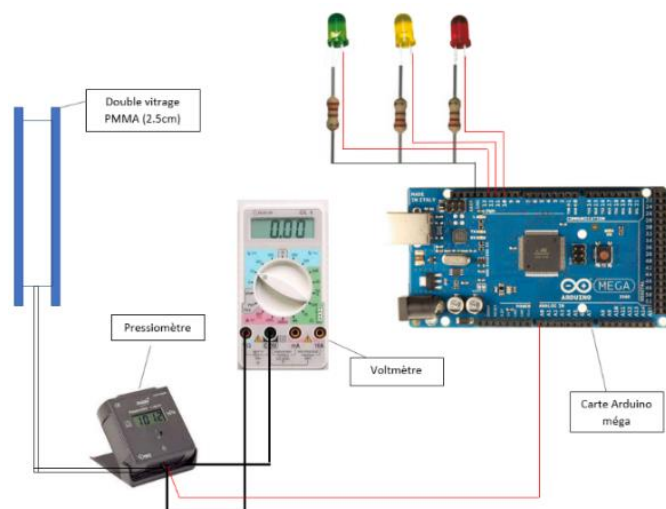
## Annexe 3

### Surveillance de la pression de l'air dans notre « hublot »

La réalisation de notre hublot d'observation, formée de deux plaques de PMMA emprisonnant de l'air sous faible pression, n'a pas été aisée. Nous avons dû longuement lutter contre les petites fuites d'air notamment au niveau des joints. Même si désormais il nous semble beaucoup plus performant qu'à ses début une fuite d'air au niveau des joints est toujours possible et difficilement détectable une fois le hublot installé. L'air est en effet incolore et les fuites souvent légères. Notre idée est de mesurer la pression de l'air entre ces deux vitres PMMA pour assurer une surveillance, ce que nous sommes parvenus à faire en adaptant un pressiomètre. Nous pouvons désormais mesurer la pression à chaque instant à l'aide de son afficheur.

Malgré tout, notre regard ne peut être sans cesse fixé sur celui-ci.

Nous avons donc cherché un système plus visuel pour nous alerter de l'état de la pression et de la présence d'éventuelles fuites. Pour ce faire, nous avons utilisé la sortie analogique de notre pressiomètre délivrant, d'après le constructeur, une tension allant de +2,5V pour une pression nulle (exactement 2,8V selon nous) jusqu' à -2,5V pour une pression de 2000 hPa. Nous avons ensuite relié la sortie analogique du pressiomètre à une entrée analogique de notre carte Arduino afin d'allumer ou non des Dels en fonction de la pression mesurée.



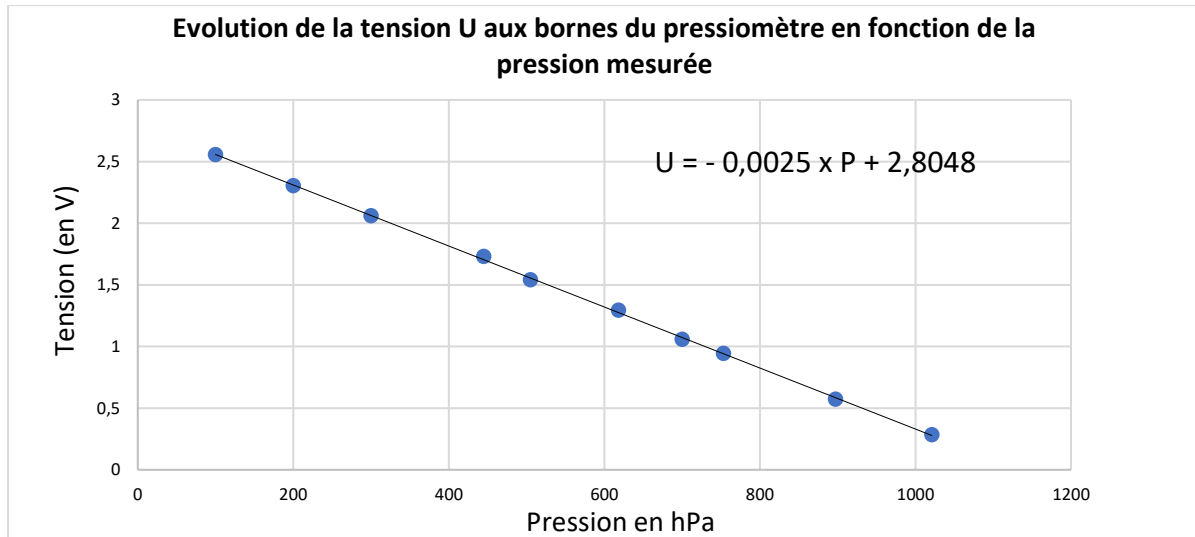
#### Par exemple :

- Une pression inférieure à 100hPa conduira à allumer la del Verte ;
- Une pression comprise entre 100hPa et 200hPa conduira à allumer une del Jaune. Si la del verte s'éteint et la jaune s'allume, nous sommes alors alertés d'une fuite.
- Une pression supérieure à 200hPa allumera une del rouge (et dans ce cas un pompage d'air est à effectuer pour ne pas risquer que les vitres n'adhèrent plus sur le caoutchouc et que les performances du hublot soient très réduites.

Pour réaliser ces commandes nous avons codé un script que nous avons téléversé dans la carte Arduino (Annexe 4)

La carte mesure une tension d'entrée mais ne connaît pas la relation entre celle-ci et la pression de l'air, nous avons donc dû étalonner notre appareil de mesure à l'aide du montage en adaptant une grosse seringue à notre pressiomètre. En appuyant plus ou moins sur le piston de la seringue, nous avons fait varier la pression

de l'air dans celle-ci et avons relevé des couples de valeurs ((P)Pression, U(Tension)) et avec celles-ci pu tracer la courbe suivante :



On modélise à l'aide d'une fonction affine d'équation :  $U = -0,0025 \times P + 2,8048$  où U est la tension (en V) délivrée par le pressiomètre et P la pression mesurée en hPa. On remarque que pour une pression nulle la tension est de 2,8V (et non pas de 2,5V comme indiqué par le constructeur)

Les entrées de la carte Arduino ne mesurent que des tensions. Dans notre script Arduino (Annexe 4), nous avons donc défini la grandeur P et introduit la relation :

$$P = \frac{U - 2,8048}{-0,0025} \text{ soit } P = -\frac{U}{0,0025} + \frac{2,048}{0,0025} = -400 U + 819,2$$

Il nous suffit alors d'indiquer dans le script nos valeurs limites (par exemple 40hPa et 200hPa) afin de faire fonctionner le programme. Quand nous faisons des bulles, et observons, nous sommes accaparés par bien d'autres tâches et les dels nous aident et nous alertent dans le cas d'une urgence à relier le hublot à notre pompe à vide afin de recréer du vide.

## Annexe 4 :

### Les scripts Arduino

Etant donné que nous relient nos montages électroniques à une carte Arduino, nous avons dû nous pencher sur les scripts afin que la carte réalise les actions souhaitées à savoir :

- affiche la température mesurée à chaque extrémité de nos thermocouples
- déclenche le clignotement de nos Dels pour nous indiquer l'intervalle entre deux valeurs de pression « références » de l'air entre nos deux vitres

Nous avons donc dû apprendre à coder sur Arduino à l'aide de beaucoup de vidéos Youtube et de forum notamment ...

#### **Voici le Script Arduino permettant d'allumer des Dels selon la pression entre nos deux vitres (partie III)**

```
void setup()
{
  pinMode(8, OUTPUT); // ces trois pin Modes définissent les ports de sorties
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
}
void loop()
{
  Serial.begin(9600);
  int Sortie = analogRead(A0); // cet sortie sert à la lecture de la tension envoyé par le Pressiomètre
  float Tension = Sortie / 1023.0 * 5.0;
  float Pression = (-Tension*385.56+1126); // relation trouvé afin de transformer la Tension reçu en Pression
  Serial.print("La pression est de ");
  Serial.println(Pression);
  delay(250);

  if (Pression <= 200){ // si la pression est < ou = a 200 hPa la Led verte s'allume
    digitalWrite(8, HIGH);
  }
  else
  {
    digitalWrite(8,LOW);
  }
  if (Pression > 200 and Pression< 500){ //si la pression est > a 200hPa et < a 500 hPa la Led jaune s'allume
    digitalWrite(9, HIGH);
    delay(800);
    digitalWrite(9,LOW);
  }
  else
  {
    digitalWrite(9,LOW);
  }
  if (Pression >= 500){ // si la pression est > ou = à 500hPa la Led rouge s'allume
    digitalWrite(10, HIGH);
    delay(250);
    digitalWrite(10,LOW);
  }
```

```

}
else
{
  digitalWrite(10,LOW);
}
}

```

**Voici le script permettant l'affichage de la température pour trois de nos thermocouples.**

```

// constantes échelle
#define echellemin -23
#define echellemax 30

void setup() {

pinMode(A0,INPUT); // pin d'entrée de nos 3 thermocouples
pinMode(A1,INPUT);
pinMode(A2,INPUT);

Serial.begin(9600);

while (!Serial); // cette fonction permet un lissage plus précis de la courbe
}

void loop() {

float Usortie1num = analogRead(A0);
float Usortie1=Usortie1num*5/1024;
float Usortie2num = analogRead(A2);
float Usortie2=Usortie2num*5/1024;
float Usortie3num = analogRead(A3);
float Usortie3=Usortie3num*5/1024;

float Oext = 20.4; //Température Extérieur à changer a chaque fois
float Oint1 = Oext-9.28*(Usortie1-0.242);
float Oint2 = Oext-9.28*(Usortie2-0.356);
float Oint3 = Oext-9.28*(Usortie3-0.164);

Serial.print(Oint1);
Serial.print(",");

Serial.print(Oint2);
Serial.print(",");

Serial.print(Oint3);
Serial.print(",");
Serial.print(echellemin);
Serial.print(",");
Serial.print(echellemax);
Serial.print(",");

Serial.println();
delay (100);
}

```