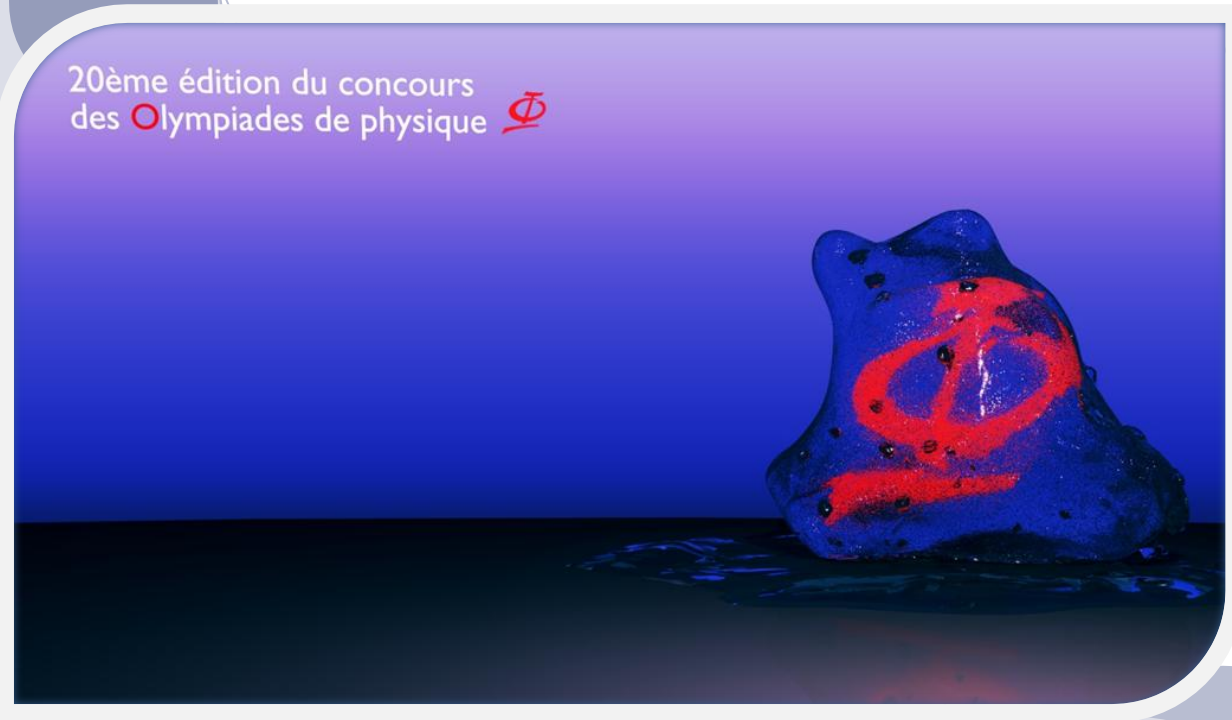




De l'eau douce à l'eau salée, rude migration !



20ème édition du concours des Olympiades de physique 



Sciences à l'École



Fondation pour la culture scientifique et technique



Sommaire

Présentation	3
Introduction.....	4
I) Observation.....	5
1) Expérience préliminaire	5
2) Expérience de vitesse de fonte	6
II) Mesures et simulation	7
1) Expériences de vitesses comparées	7
2) Surface et volume en fonction du temps.....	8
i) Expériences et pointage Aviméca®.....	8
ii) Simulation.....	9
iii) Critiques de la simulation	12
III) Etude du mouvement des convections.....	13
1) Thermomètre.....	13
2) Conductimètre.....	13
3) Automatisation.....	14
IV) Procédés expérimentaux.....	16
1) La géométrie du glaçon	16
2) La suppression du facteur perturbateur « colorant ».....	16
3) Remarques pratiques	17
V) Conclusion.....	18
VI) Remerciements	19
VII) Annexe.....	20

Présentation

- **Etablissement :** Lycée René Cassin, à Tarare (69)
- **Elèves du groupe :**
Hugo BLANC
Claire DELORME
Quentin GUYE
Mathias ROUX
Élèves de terminale scientifique, option sciences de l'ingénieur
- **Professeur coordinateur :** Mustapha ERRAMI
- **Professeur collaborateur :** Fabien BRUNO
- **Partenaires :**
Rectorat de l'académie de Lyon
Conseil Régional de Rhône-Alpes
M. Roger DUFFAIT, Université Claude Bernard de Lyon
M. Romain VOLK, École Normale Supérieure de Lyon
M. Florent JOYET, École Centrale de Lyon



De gauche à droite, M.Mustapha ERRAMI, Quentin GUYE, Hugo BLANC, M. Romain VOLK, Mathias ROUX, M. Fabien BRUNO et Claire DELORME dans les couloirs de l'ENS de Lyon après une discussion enrichissante avec M. VOLK.

Introduction

Au début de l'année scolaire, nous sommes tombés sur un article alarmiste prophétisant la fin des icebergs d'ici 10 ans (c'est peu !). Nous nous sommes alors demandés si les sources n'étaient pas un ramassis de superstitions en tout genre qui prônait une apocalypse imminente. Pas question de se rendre au Pôle Nord et de faire nos mesures sur place, nous avons donc voulu reproduire un iceberg en laboratoire. Quoi de plus ressemblant à un glaçon qu'un autre glaçon ? C'est donc tout naturellement que l'on a voulu faire fondre un glaçon dans l'eau afin d'observer le phénomène de fusion du bloc de glace. Très vite, nous avons observé des volutes transparentes dans l'eau douce lors de la fonte du glaçon.

La question qui s'est alors posée est simple « D'où viennent ces volutes ? ». La réponse a entraîné à son tour les questions « Sont-elles toujours présents avec l'eau salée, comme dans l'océan ? » et « La température influe-t-elle dessus ? ». Mais surtout, « quelle est l'influence de ces mouvements sur la fusion de l'iceberg miniature ? »

Nous avons donc énoncé la problématique suivante : « **Quels sont les vecteurs de la fonte des icebergs, peut-on les quantifier ?** ».

Nous vous livrons maintenant nos travaux dans leur globalité, quasiment dans la chronologie des évènements.

I) Observation

1) Expérience préliminaire



Figure 1 : Bloc de glace coloré fondant dans une cuve

La première expérience ayant piqué notre curiosité, nous avons retenté en colorant l'eau du glaçon afin de voir les volutes plutôt que de les deviner par transparence. Nous avons essayé quatre colorants différents et une cartouche d'encre effaçable. A l'œil le bleu est très visible, par photo, on privilégiera le vert mais cela n'altère en rien l'expérience. On remarque une séparation de phase en eau douce avec l'eau de fonte en bas et l'eau à température ambiante en haut. Nous nous sommes placés dans des conditions de température proche de la température ambiante pour éviter toute fluctuation.

Les filaments bleus sont assurément créés par la différence de densité entre l'eau à 20° et l'eau proche du glaçon de 0° (on suppose, ce qui se vérifiera, que le colorant « n'alourdit » pas ou peu l'eau).

En réitérant l'expérience en eau salée, on s'aperçoit qu'il y a une séparation de phase entre l'eau colorée froide en haut (une fine couche de 1 à 2mm d'épaisseur), et l'eau salée en bas. On en déduit que l'eau froide est de densité inférieure à l'eau salée à 20°.

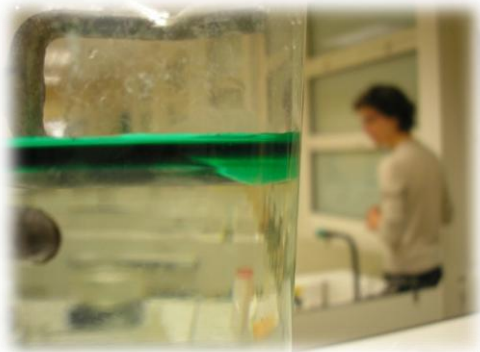


Figure 3 : Eau salée (phase froide d'eau douce en haut)



Figure 2 : Eau douce (phase froide d'eau douce en bas)

Autre fait intéressant, on observe juste autour du glaçon une fine pellicule d'eau froide qui remonte le long du glaçon.

2) Expérience de vitesse de fonte

Hypothèse :

Au regard de pellicule autour du glaçon en eau salée, nous avons émis la possibilité que *la couche agisse comme un « isolant » au chaud et donc protège le glaçon d'une fonte accélérée*. Nous avons donc relancé les deux expériences en mêmes conditions de volume de glaçon, de température, de quantité d'eau dans deux béchers côte à côte mais l'un contenant de l'eau douce, et l'autre une solution de plus de 200g/L de sel (NaCl).

Observations :

Nous avons filmé les deux expériences en mettant les glaçons au même moment dans l'eau, à peine sortis du congélateur dont la température est homogène. Conformément à l'hypothèse de départ, le glaçon en eau salée a fondu bien plus lentement comme l'atteste la vidéo et l'image prise à la fin de la fonte du glaçon en eau douce.



Figure 4 : Eau salée à gauche, douce à droite

On définira deux termes :

- Pellicule protectrice, l'eau de fonte qui englobe le glaçon
- Phase protectrice, la phase d'eau douce au-dessus de l'eau salée

Ces expériences nous ont permis de donner une direction à notre recherche : observer la forme des convections (les mouvements des volutes d'eau) en fonction de la température et de la salinité et observer où se situent les changements de salinité ainsi que de température lors de la fonte du bloc de glace.

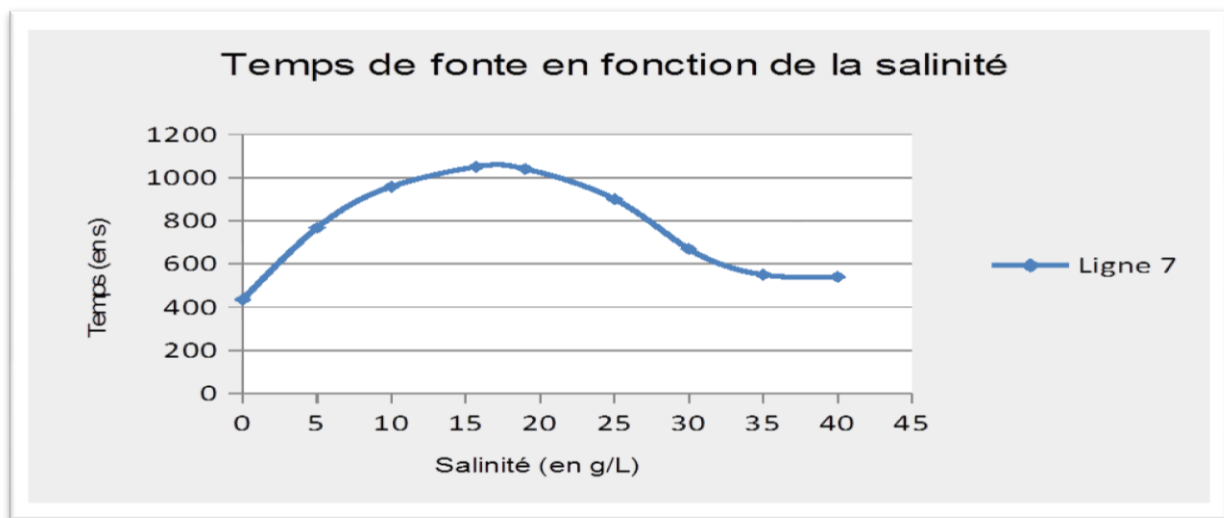
Afin de pouvoir observer cela, il nous faut donc permettre des mesures.

II) Mesures et simulation

Dans une optique de quantifier la vitesse de fonte des icebergs, nous avons ensuite fait des expériences dans des milieux de températures identiques mais de salinités différentes en étudiant le glaçon au cours du temps. Pour des raisons de commodités expérimentales nous avons choisi de faire varier la salinité plutôt que la température. Nous avons élargi un peu le champ de mesure. Toutefois dans l'arctique, la température de l'eau ne varie que de quelques degrés entre 0 et 5 °C. La salinité par contre diminue avec la fonte des Icebergs puisque le milieu aqueux environnant gagne en eau douce sans gagner en sel en même temps. C'est l'autre raison qui nous a poussés à ne changer que la salinité.

1) Expériences de vitesses comparées

Pour des raisons de praticité encore, nous nous sommes placés à température ambiante de telle sorte que l'ensemble des solutions soit à même température. Ainsi nous avons pu obtenir une courbe du temps de fonte en fonction de la salinité. On remarquera que la courbe, contre toute attente possède un pic à 17g/L.



Notre courbe, dans notre plage d'étude, atteint son maximum pour 17g/L. On peut supposer que sur les basses salinités la pellicule protectrice s'épaissit ou englobe parfaitement le glaçon. Or à partir d'un certain point (17 g/L), en augmentant la salinité, cette couche n'engloberait plus totalement le glaçon et se concentrerait en haut du glaçon ce qui réduirait le temps de fonte puisque le glaçon se retrouve en contact immédiat avec l'eau salée plus chaude. L'hypothèse est confirmée d'une part par une vidéo où l'on voit le glaçon fondre en cône, et d'autre part par une courbe avec le glaçon totalement immergé présentée en Annexe.

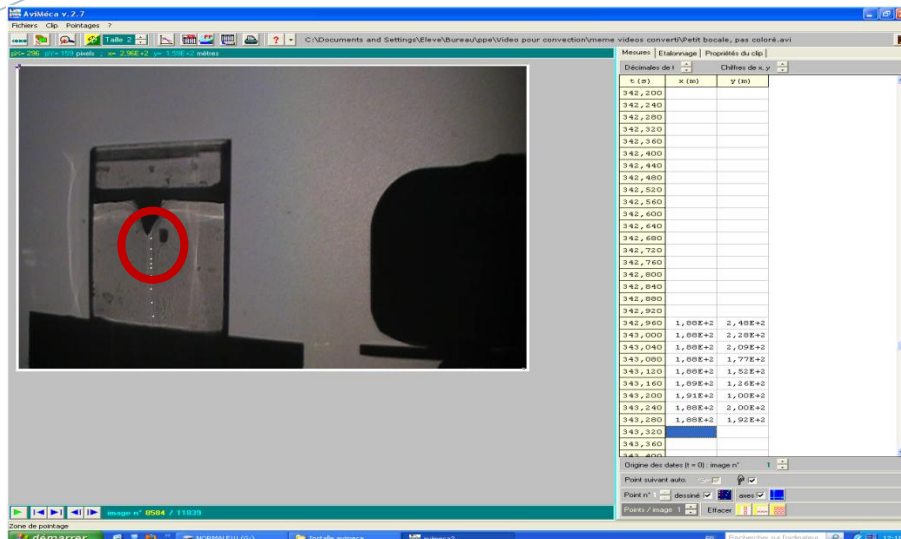


Figure 5 : Environnement Aviméca® et glaçon conique

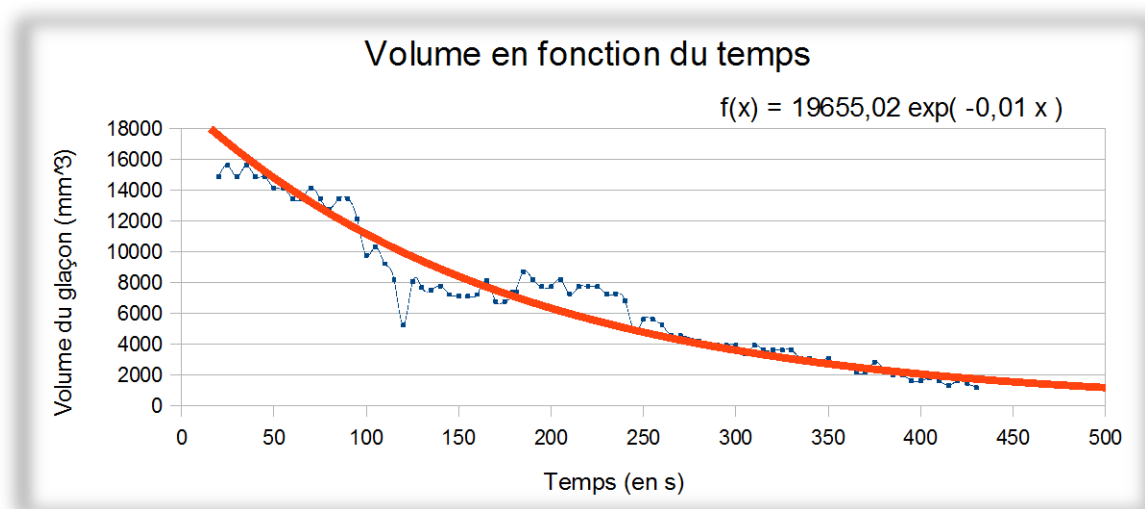
2) Surface et volume en fonction du temps

i) Expériences et pointage Aviméca®

On part de l'hypothèse que le glaçon sphérique au début le reste jusqu'à la fin. De fait, il existe une symétrie autour des axes diamètres de la sphère. On peut alors simplifier le problème en l'appliquant à un modèle en deux dimensions.

Grâce à la projection de l'éclairage en lumière parallèle, on peut déterminer le diamètre et le volume du glaçon. Comme dans l'expérience, le glaçon n'est pas parfaitement sphérique on mesure deux diamètres perpendiculaires dont on fera la moyenne pour obtenir le diamètre. En pointant à intervalles de temps réguliers, où tout du moins à des dates connues, on peut tracer une courbe du volume en fonction du temps.

Concrètement, ces mesures nous permettent d'estimer combien de temps notre glaçon va mettre pour fondre connaissant son volume.



ii) Simulation

Afin de pouvoir extrapoler, nous avons élaboré en parallèle une simulation en ajoutant à la simulation les phénomènes découverts pendant les expériences. La première étape est de simplifier le modèle.

On garde l'hypothèse précédente et on force le liquide en un mouvement mimant celui des convections

On considère aussi que le glaçon est totalement immergé, ce qui n'est pas totalement exact mais le facteur d'erreur diminue avec la taille du glaçon.

Dans un second temps on partitionne le volume en cellules dont on pourra déterminer certaines caractéristiques, notamment, l'état et la température.



Soit donc notre glaçon sphérique de rayon R , on divise le disque projeté par N disques. On divise de même le disque par M rayons. On prend i l'indice du plus petit disque contenant la cellule en prenant pour les cellules centrales $i = 1$ et n l'indice des cellules délimitées par les rayons par le sens trigonométrique avec $n = 1$ pour les cellules à gauche de l'axe vertical.

On obtient $R_i = R * (i - \frac{1}{2}) * N^{-1}$ et $\Theta_n = 2\pi * (n - \frac{1}{2}) * M^{-1}$ pour coordonnées polaires du centre la cellule par rapport à l'axe vertical.

Enfin vient la mise en équation. D'après le premier principe de la thermodynamique, $\Delta U = \sum Q$ où la variation d'énergie interne à la cellule ΔU est égale à la somme des échanges de chaleur Q avec les autres cellules. La loi de Fourier de la chaleur permet de modéliser cette somme : où $j = -\lambda \cdot \text{grad}(T)$ représente le flux de chaleur par une unité de surface. Cette loi permet de modéliser le flux spontané de chaleur qui est proportionnel à la différence de température des deux points et inversement proportionnel à la distance les séparant. Le coefficient de conduction thermique λ est la conductivité thermique du milieu et augmente avec la capacité du milieu à transmettre sa chaleur.

Le flux de chaleur reçue par la cellule $(i ; n)$ et donnée par la cellule $(i-1 ; n)$ est donc :

$$j = \lambda \cdot \frac{T_{i-1;n} - T_{i;n}}{R/N}$$

De fait, au cours du temps ΔT la chaleur reçue est telle que :

$$Q = \lambda \cdot \frac{T_{i-1;n} - T_{i;n}}{\frac{R}{N}} \cdot (i-1) \cdot \frac{R}{N} \cdot \frac{2\pi}{M} \cdot \Delta t$$

Où $R \cdot N^{-1} \cdot 2\pi \cdot M^{-1}$ est la surface d'échange entre les deux cellules.

On obtient par simplification :

$$Q = \lambda \cdot (T_{i-1;n} - T_{i;n}) \cdot (i-1) \cdot \frac{2\pi}{M} \cdot \Delta t$$

De même, la chaleur reçue par la cellule (i ; n) et donnée par la cellule (i+1 ; n) est :

$$Q = \lambda \cdot (T_{i+1;n} - T_{i;n}) \cdot i \cdot \frac{2\pi}{M} \cdot \Delta t$$

Le flux de chaleur reçue par la cellule (i ; n) et donnée la cellule (i ; n-1). On assimile la distance entre les deux centres des deux cellules avec la longueur d'arc entre les deux centres des cellules :

$$j = \lambda \cdot \frac{T_{i;n-1} - T_{i;n}}{\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{R}{N} \cdot \frac{2\pi}{M}}$$

Donc la chaleur reçue au court du temps est telle que :

$$Q = \lambda \cdot \frac{T_{i;n-1} - T_{i;n}}{\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{R}{N} \cdot \frac{2\pi}{M}} \cdot \frac{R}{N} \cdot \Delta t \quad \text{soit} \quad Q = \lambda \cdot \frac{T_{i;n-1} - T_{i;n}}{\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{2\pi}{M}} \cdot \Delta t$$

De même le flux de chaleur reçue par la cellule (i ; n) et donnée la cellule (i ; n+1) est :

$$Q = \lambda \cdot \frac{T_{i;n+1} - T_{i;n}}{\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{2\pi}{M}} \cdot \Delta t$$

On a aussi : $\Delta U = U_{i,n}(t + \Delta t) - U_{i,n}(t) = \sum Q$

Ce qui nous permet de savoir l'énergie actuelle de la cellule en sachant l'énergie à l'étape précédente. Or, comme $U = V.C.T \Leftrightarrow T = U.V^{-1}.C^{-1}$ (avec V le volume de la cellule, C sa capacité calorifique volumique et T sa température) on peut déterminer la température de la cellule. On peut aussi déterminer son état suivant que la température soit inférieure ou supérieure à la température de fusion.

La suite appartient à MATHLAB.

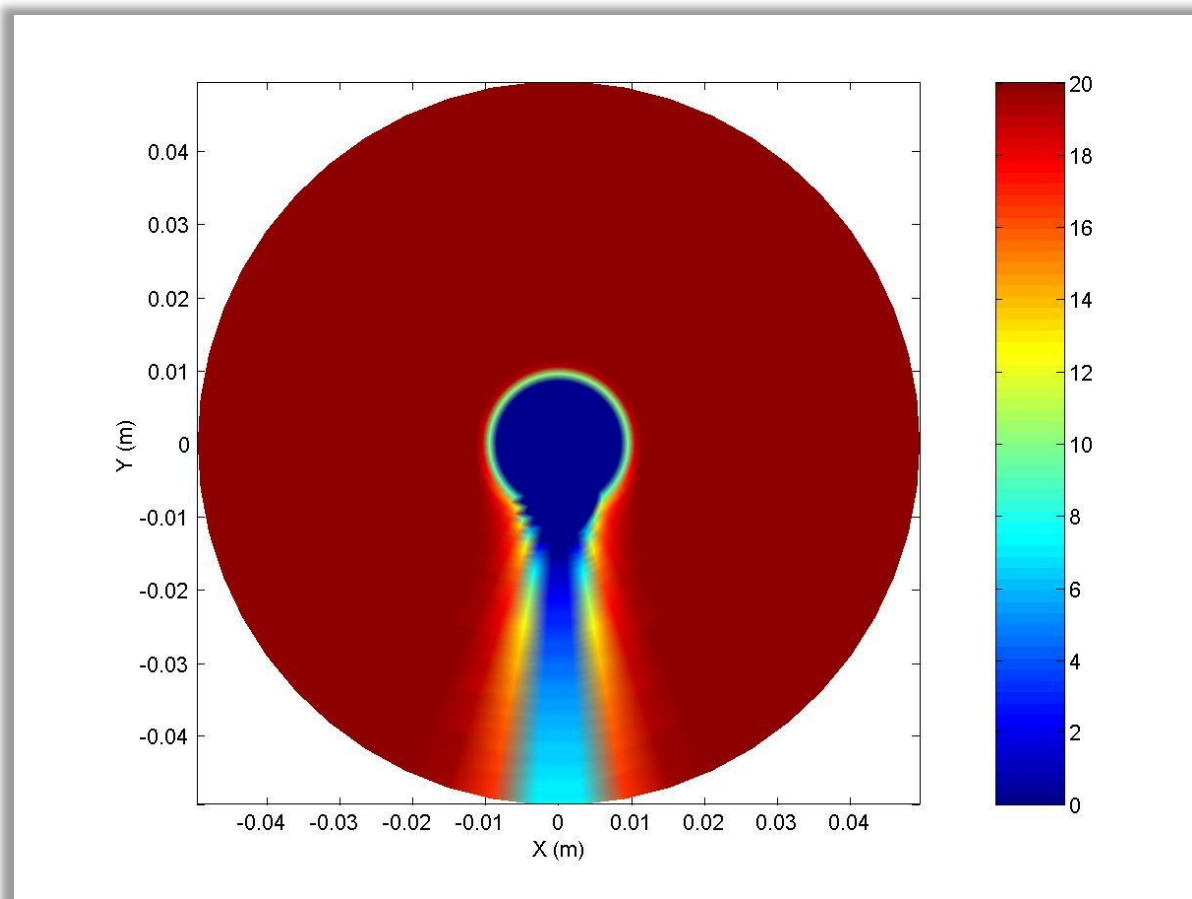


Figure 6 : Rendu Matlab

iii) Critiques de la simulation

Une première critique pourrait être de ne pas avoir compté dans les calculs la partie émergée du glaçon. Celle-ci fond en effet plus lentement du fait que l'air a une conductance thermique très faible par rapport à l'eau (0,0262 pour l'air à 20°C et à 100kPa contre 0.6 pour l'eau en mêmes conditions). Seconde critique, on observe en Annexe, des courbes montrant que la proportion du volume influence la vitesse de fonte, or dans le cas de la simulation, on le considère totalement immergé, et, on considère que l'eau est douce ou peu salée (convection vers le bas).

III) Etude du mouvement des convections

Pour arriver à nos fins et étudier le mouvement des convections, et surtout de quelle manière les convections s'étalent sur le fond et donc créer des courants, nous avons eu pour idée de fabriquer un tapis de capteurs.

Le principe étant de faire un maillage de capteurs pour étudier la répartition de l'eau de fonte et de l'eau salée.

1) Thermomètre

Le premier réflexe a été d'étudier les changements de températures. En effet, les deux eaux sont à des températures différentes, il suffirait donc de les comparer. Nous avons donc fabriqué des sondes thermiques. Pourquoi en fabriquer alors que nous avons des thermomètres ? Pour l'aspect ponctuel. Il existe des thermomètres sur le marché qui soit très petits, mais nous n'en avons pas. En revanche, nous possédons des CTN et des générateurs, ce qui satisfait à la demande.

Nous avons donc créé de nous même cet instrument de mesure. Mais, car il subsiste un problème, c'est que les deux eaux s'harmonisent sur la température au cours du temps et donc plus l'expérience avance dans le temps et plus les résultats sont faussés.

2) Conductimètre

Nous savons que la conductivité de l'eau dépend de sa salinité, mais aussi de la température. En cumulant ces deux types de capteurs nous pouvons établir la salinité de l'eau en le point de mesure.

Pour créer nos conductimètres, nous utilisons le montage de Kohlrausch (voir figure 9), qui nous permet d'obtenir la conductance entre les deux électrodes par la loi inverse à la loi d'Ohm : $G = R^{-1} = \frac{I}{U}$

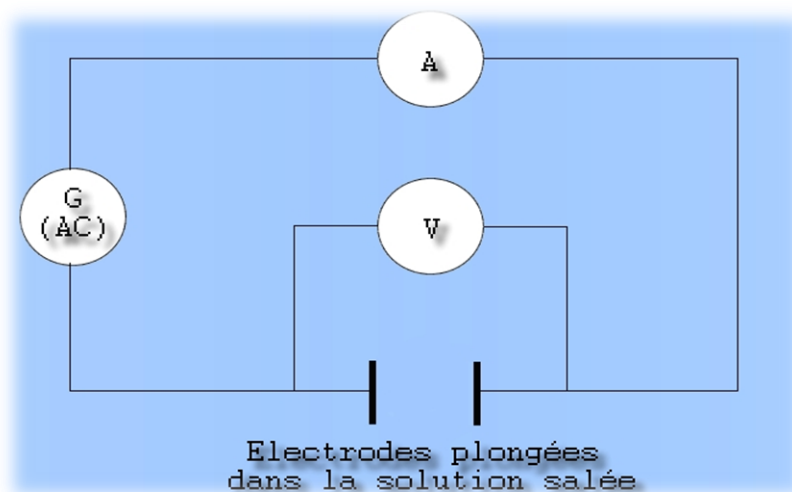


Figure 7 : Schéma du montage de Friedrich Kohlrausch

Pourquoi ce montage et pas simplement un Ohmmètre ? L'Ohmmètre est un appareil fonctionnant grâce à un courant continu. Or s'il y a un courant continu dans un liquide inique, il y a électrolyse.

Nous avons la conductance, mais la conductance dépend aussi de la distance entre les électrodes et de la surface en vis-à-vis (constante de cellule). Nous avons besoin de la conductivité. L'expression :

$$G = \sigma \times \frac{S}{L} \Leftrightarrow \sigma = G \times \frac{L}{S}$$

Avec G la conductance en Siemens (en milli Siemens pour nous), S la surface d'une électrode en m^2 (pour nous en cm^2) et L la distance séparant les deux électrodes en m (de même en cm pour nous). S et L sont des constantes qui pour nous sont respectivement $1,56cm^2$ et $1cm$. S et L étant constantes on peut conclure avec $k = \frac{L}{S}$ sur :

$$\sigma = k \cdot I \cdot U^{-1}$$

3) Automatisation

On compte deux mesures par couple de capteur (d'intensité pour le conductimètre et de tension pour le thermomètre), nous visons à avoir un minimum de 9 couples, il nous faut donc pour construire un maillage automatiser la prise des résultats. Pour ce faire, nous utilisons le microcontrôleur Pic 16F690 doté de 11 broches analogiques, ainsi que le logiciel Logipic® qui permet une programmation en organigramme du microcontrôleur.

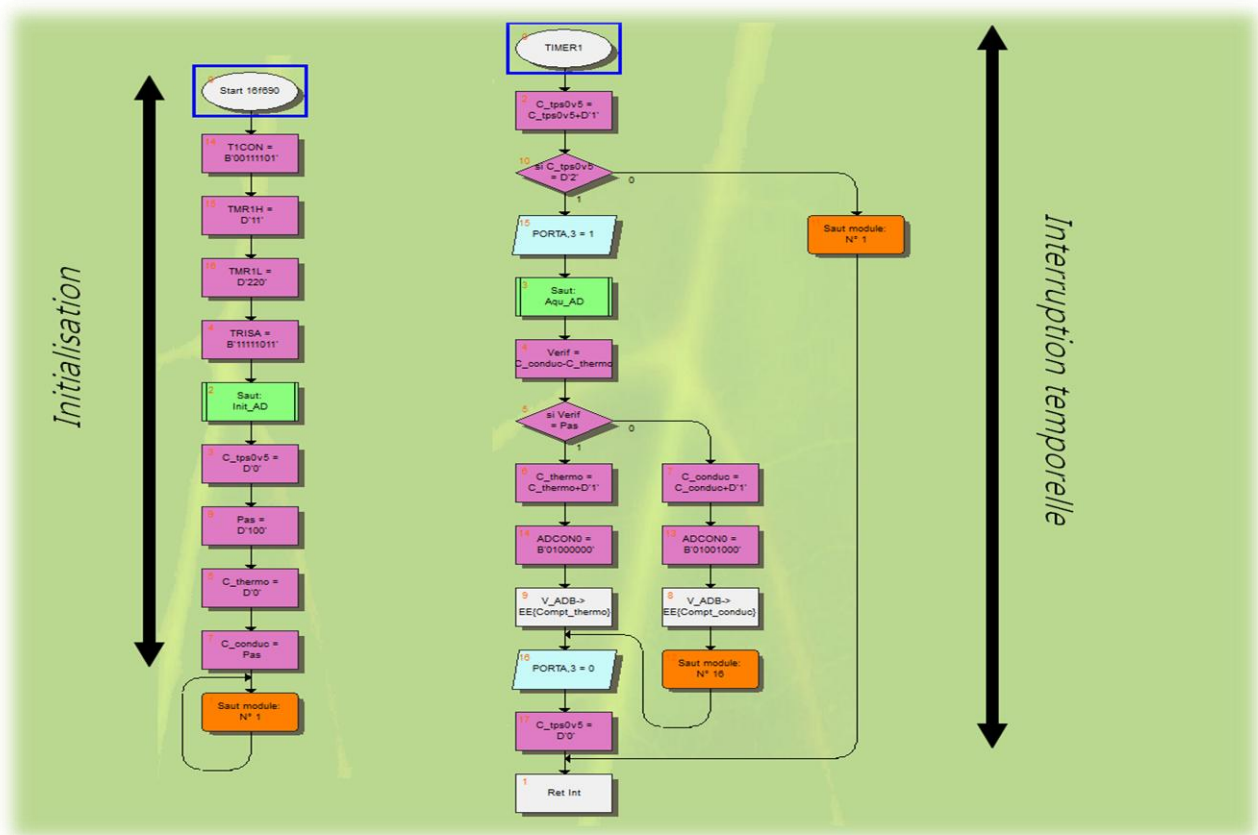


Figure 8 : Version étalonnage, gestion d'un couple

Pour les mesures, pour éviter l'électrolyse, nous procédons avec un signal carré synchronisé avec la prise de valeur du Pic.

Pour l'instant nous n'avons pas encore de résultats, mais les objets capteurs sont créés ainsi que le programme sous Logipic®, il ne manque que l'étalonnage avant de pouvoir passer aux mesures.

Nous avons aussi schématisé le système sous Proteus® pour pouvoir n'avoir que des réglages de type étalonnage.

IV) Procédés expérimentaux

Nous avons utilisé certains montages et procédés expérimentaux dans nos travaux que l'on a mentionnés sans détail pour ne pas alourdir le discours. Les informations complémentaires se retrouvent ici.

1) La géométrie du glaçon

Dans l'eau salée on observe la formation d'un cône inversé de glace qui se retourne lorsque les forces ne sont plus équilibrées. La géométrie du glaçon devient préoccupante pour l'étude de la vitesse de fonte en conséquence. M.Volk nous a prêté généreusement deux presses de tailles différentes formant des glaçons parfaitement sphériques.

La forme sphérique a de plus pour caractéristiques importantes de posséder un axe de symétrie dans toutes les directions (d'où la possibilité d'une simulation 2D), et d'avoir un rapport Volume/Surface le plus faible des solides, donc une faible surface d'échange par rapport au Volume.



Figure 9 : Nous disposons d'une presse semblable qui forme des glaçons aussi parfaitement sphériques

2) La suppression du facteur perturbateur « colorant »

Nous utilisons pour cela un montage en lumière parallèle. Très simplement, nous plaçons une lampe sur un banc optique, devant une cuve dans laquelle fondra le glaçon, et entre les deux, toujours sur ce banc, nous plaçons une lentille pour rendre « moins divergents » les rayons et donc les avoir parallèles. Nous obtenons une projection sur une surface (le mur blanc du fond de la pièce dans notre cas) du glaçon et des mouvements de convections dus au changement d'indice de réfraction de l'eau chaude, de l'eau froide, et des bulles d'airs coincées dans le glaçon. L'image projetée ainsi est parfaitement nette et lisible, plus encore qu'avec du colorant.

3) Remarques pratiques

Nous avons apporté un soin particulier à la température interne des glaçons. Une plage de mesure ne peut se faire qu'avec des glaçons mis au congélateur à la même date et sortis ensemble pour éviter des fluctuations de température entre les deux .

Du fait du temps que mettent les expériences à être réalisées, nous ne pouvons en faire plus de 2 à trois séries identiques ? Donc nous ne dépassons pas 2 à 3 chiffres significatifs.

V) Conclusion

Ce projet a occupé tout notre année scolaire 2012-2013 jusqu'à aujourd'hui et nous occupe encore, nous permet de mieux comprendre comment fond un iceberg et donc par extrapolation, comment fondent les glaces Arctiques. Nous sommes désormais capable d'estimer le temps que va mettre un Iceberg à fondre dans l'eau arctique (simulation), à supposer qu'il ait un rapport Volume/Surface s'approchant de celui de la sphère, et qu'il soit compacte (les icebergs qui ne subissent aucun choc sur un sol dur restent couverts de neige sur une large épaisseur ce qui a une forte tendance à accélérer le processus de fonte du fait que la neige fonde vite).

Nous travaillons actuellement sur la mécanique des fluides pour les convections, suivant un raisonnement assez complet mais encore trop peu fournis pour être présentable. Très complexe, le soutien de nos professeurs de Physique nous est salvateur. Il y a fort à parier que nous pourrons vous présenter une étude théorique sur la répartition des fluides sous le glaçon (épaisseur de la couche protectrice, profondeur de l'eau de fonte, courants,...) que nous allons étudier aussi expérimentalement, dès que nous aurons finis l'étalonnage.

VI) Remerciements

Nous adressons de sincères remerciements à nos professeurs :

M. Mustapha ERRAMI, notre professeur coordinateur, pour sa disponibilité et son enthousiasme à encadrer des projets.

M. Fabien BRUNO, professeur agrégé de physique-chimie, pour son aide précieuse, et le temps passé avec nous.

M. François PINAULT et M. Christian VALLON, professeurs des sciences de l'ingénieur, pour leurs conseils avisés.

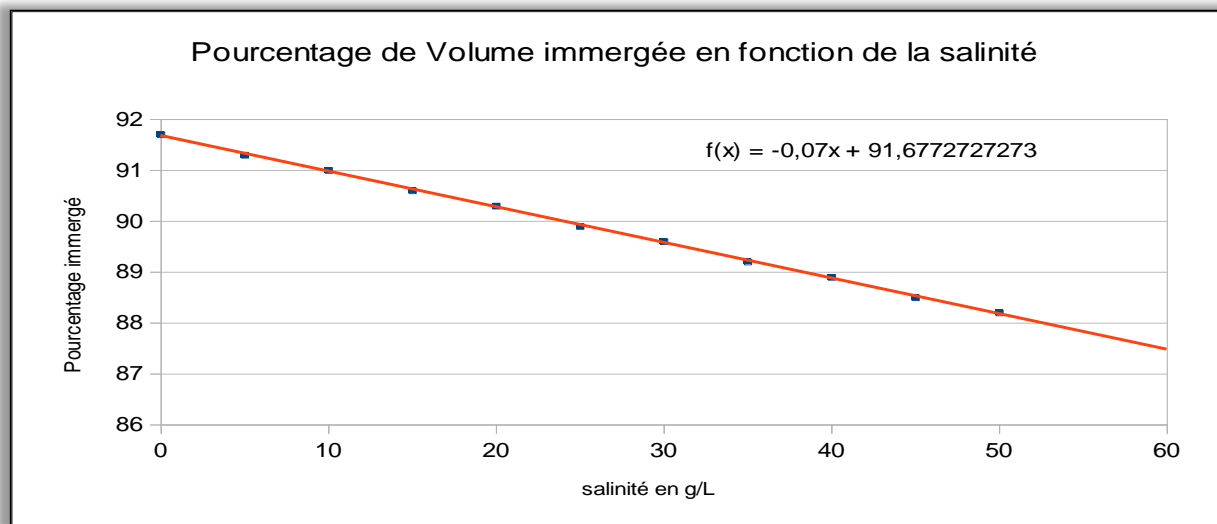
M. Roger DUFFAIT, maître de conférences à l'Université Claude Bernard qui a corrigé nos déviations.

M. Romain VOLK, maître de conférences à l'ENS de Lyon, qui nous a reçu à l'ENS.

Nous remercions aussi, bien qu'ils ne puissent ni le lire, ni l'entendre, les travaux de la famille Bernoulli, d'Euler, et d'autres grands Mathématiciens et Physiciens.

VII) Annexe

En parallèle de la courbe du temps de fonte du glaçon, nous avons édité une courbe du volume immergé par rapport au volume total. On observe une fonction affine quasiment parfaite de coefficient négatif relativement faible.



On peut aussi considérer la poussée d'Archimède de l'air car par calcul, la poussée d'Archimède de l'eau seule donne des valeurs très proches de celles expérimentales sans qu'on ait à lui additionner l'effet de la poussée d'Archimède de l'air.

Cette deuxième courbe nous permet de dissocier les effets causés par la couche protectrice en surface de la fonte causée par la salinité de l'eau en elle-même, le glaçon étant immergé 3cm en-dessous de la surface de l'eau.

