



Finale nationale des Olympiades de Physique France
vendredi 28 janvier 2011

Au Palais de la Découverte

Alexandre BEDLÉ, Estelle LIAUTÉ, Gwendoline LEDOUX

Mélanie CLÉTON, Raphaël DÉCAUDIN

présentent

L'énigme du lac Ladoga



À Philippe LANCEL

Résumé

Selon une légende rapportée par l'auteur italien Malaparte dans son livre *Kaputt* : des chevaux cernés par un feu de forêt en Russie se jetèrent dans un lac, qui se transforma en glace à leur contact et les emprisonna. Le phénomène physique en jeu est bien connu, il s'agit de la cristallisation d'une eau surfondue.

Lors de nos premiers contacts avec des scientifiques, tout le monde nous disait de travailler avec une eau ultra pure, nous avons suivi ces conseils et nous fabriquions notre propre eau distillée. Puis nous avons montré que cela était possible avec de l'eau du robinet, de l'eau minérale, de l'eau minérale gazeuse, du Coca-ColaTM, et pour le plaisir avec du Beaujolais nouveau.

Sur des enregistrements vidéo, nous sommes parvenus à mesurer la vitesse de l'onde de cristallisation dans différents cas. Nous sommes parvenus parfois à enregistrer le son produit par cette cristallisation. Nous avons également montré, à l'aide de différents objets, qu'il est quasi impossible de se dégager de la glace, une fois qu'on est pris dedans. Actuellement, nous étudions la possibilité de voir une bille tombant dans une eau surfondue d'être stoppée par la cristallisation de l'eau.

Sommaire

Résumé.....	3
I) La surfusion, qu'est ce que c'est ?	7
II) Les techniques :	8
A) À nos débuts :	8
B) Les mélanges réfrigérants :	11
C) Les liquides autres que l'eau :	12
1) Le Coca-Cola :	12
2) Le Beaujolais :	13
III) La vitesse de propagation et le son de la cristallisation :	15
A) La vitesse de propagation de la glace :	15
B) Le son produit par la cristallisation :	16
IV) Les chevaux et le lac Ladoga :	16
A) Un petit pas pour un Playmobil, un grand pour la surfusion :	16
B) La vitesse d'un cheval à la nage.....	18
Conclusion :	19

Après avoir lu le livre « Kaputt » de Malaparte, nous avons été intéressés par un de ses passages .Ce dernier racontant la triste histoire de plusieurs milliers de chevaux emprisonnés dans le lac Ladoga, en Russie durant l’hiver 1942. En effet, ces derniers voulant échapper à un feu de forêt se précipitèrent dans le lac, Mais une fois entrés dans le lac, il gela instantanément. Les chevaux, emprisonnés dans la glace, furent figés.



L'intrigue, venue de ce lac passant d'un état liquide à un état solide nous a donc poussé à commencer nos expériences. Nous nous sommes tout d'abord intéressé aux différents changements d'états puis aux conditions de surfusions. La majorité de nos recherches nous ont appris que pour obtenir un état de surfusion, il fallait avoir un liquide très pur ; mais cette histoire du lac Ladoga resterait alors énigme. Nous avons donc essayé à plusieurs reprises d'obtenir ce phénomène avec une eau distillée. Puis notre curiosité nous a poussé à essayer d'obtenir des surfusions avec d'autres liquides .La cristallisation du lac Ladoga serait alors possible ?

Lorsqu'on met une bouteille d'eau dans un réfrigérateur, la bouteille gèle, c'est la solidification de l'eau et ça nous paraît tout à fait normal que l'eau gèle à 0°C. Cependant, il est possible d'avoir de l'eau liquide en dessous de 0°C, ce phénomène s'appelle la surfusion. En fait, il suffit qu'il n'y ait pas de choc dans l'eau pendant qu'elle refroidit, et dans la majorité des cas que l'eau soit particulièrement pure.

A ce propos, il existe un lac en Russie, dont le nom est le lac Ladoga, qui a fait l'expérience d'une cristallisation géante. Voici un extrait du livre :

« Le troisième jour, un immense incendie flamba dans la forêt de Raikkola. Enfermés dans un cercle de feu, les hommes, les chevaux, les arbres poussèrent des cris terribles. Les sissit assiégeaient l'incendie, tiraient sur le mur de flammes et de fumée, empêchant toute sortie.

Fous de terreur, les chevaux de l'artillerie soviétique – ils étaient presque mille – se lançant dans la fournaise, brisèrent l'assaut du feu et des mitrailleuses. Beaucoup périrent dans les flammes ; mais une grande partie atteignit la rive du lac et se jeta dans l'eau.

Le lac, à cet endroit, est peu profond : pas plus de deux mètres, mais à une centaine de pas du rivage, le fond tombe à pic. Serrés dans cet espace réduit (à cet endroit le rivage s'incurve et forme une petite baie) entre l'eau profonde et la muraille de feu, tout tremblants de froid et de peur, les chevaux se groupèrent en tendant la tête hors de l'eau. Les plus proches de la rive, assaillis dans le dos par les flammes, se cabraient, montaient les uns sur les autres, essayant de se frayer passage à coups de dents, à coups de sabots. Dans la fureur de la mêlée, ils furent pris par le gel.

Pendant la nuit, ce fut le vent du Nord (le vent du Nord descend de la mer de Mourmansk, comme un Ange, en criant, et la terre meurt brusquement). Le froid devint terrible. Tout à coup, avec un son vibrant de verre qu'on frappe, l'eau gela. La mer, les lacs, les fleuves gèlent brusquement, l'équilibre thermique se brisant d'un moment à l'autre. Même l'eau de mer s'arrête au milieu de l'air, devient une vague de glace courbée et suspendue dans le vide.

Le jour suivant, quand les premières patrouilles de sissit, aux cheveux roussis, au visage noir de fumée, s'avançant précautionneusement sur la cendre encore chaude à travers le bois carbonisé, arrivèrent au bord du lac, un effroyable et merveilleux spectacle s'offrit à leurs yeux. Le lac était comme une immense plaque de marbre blanc sur laquelle étaient posées des centaines et des centaines de têtes de chevaux. Les têtes semblaient coupées net au couperet. Seules elles émergeaient de la croûte de glace. Toutes les têtes étaient tournées vers le rivage. Dans les yeux dilatés on voyait encore briller la terreur comme une flamme blanche. Près du rivage, un enchevêtrement de chevaux féroce ment cabrés émergeait de la prison de glace. »

Après plusieurs recherches, nous avons constaté que ce lac était situé près de St Petersburg, une ville où la température moyenne en hiver est d'environ – 5°C. De plus, l'hiver de 1942 (l'année où la cristallisation du lac s'est passée) avait été particulièrement froid (environ entre – 20°C et –30°C), ce qui a fait entrer le lac en surfusion. Les chevaux ont donc activé la cristallisation en entrant dans l'eau, et sont restés piégés dedans.

Ce phénomène, c'est la surfusion. Mais une question nous est venue à l'esprit : Est-ce que les chevaux auraient pu s'en sortir ? Pour répondre à cette question, nous allons réaliser diverses mesures sur ce phénomène.

I) La surfusion, qu'est ce que c'est ?

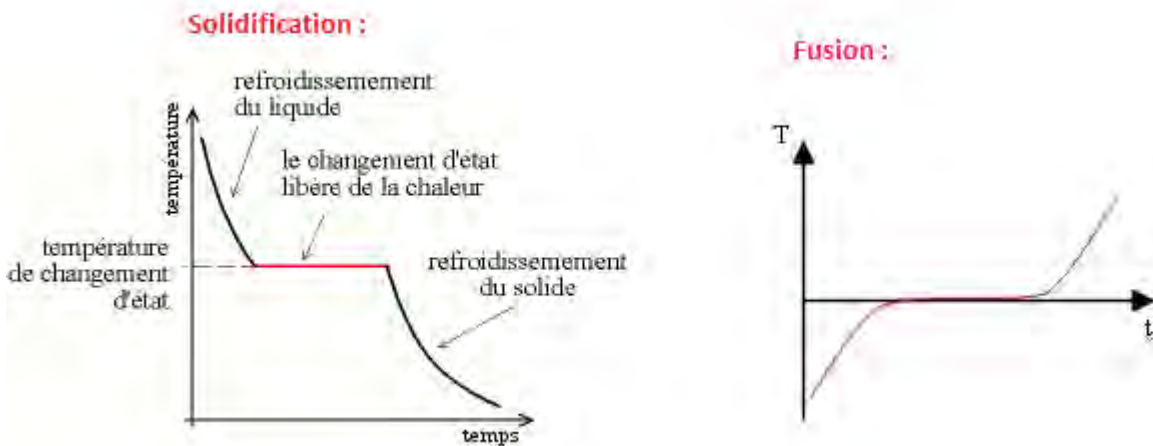
C'est un état dans lequel un corps reste liquide en dessous de sa température de solidification.

Les trois principaux états de la matière (par exemple l'eau) sont l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.

On observe de nombreux changements d'états de l'eau, ces derniers sont le plus souvent dûs aux variations de température. Ces changements d'états sont représentés par des courbes différentes qui montrent l'évolution de leur température en fonction du milieu.

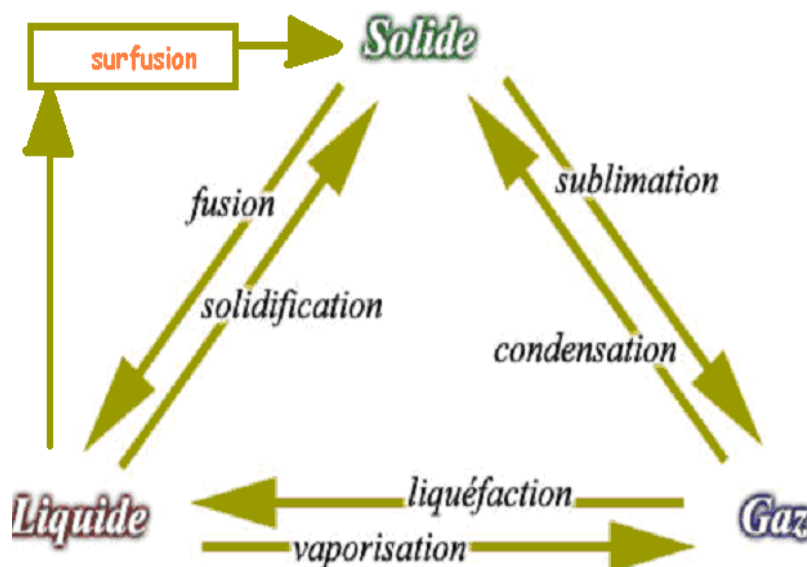
Dans des conditions de pression atmosphérique normale, c'est à dire 1013hPa, l'eau passe de l'état liquide à l'état solide à 0°C et de l'état liquide à l'état gazeux à 100°C (mais par exemple, l'eau bout à une température inférieure à 100°C en montagne, car la pression est moins élevée).

Dans ce dossier, on montre que le passage de l'état liquide à l'état solide ne se fait pas forcément à 0°C.



(Source Internet)

Schéma représentatif des principaux changements d'états :



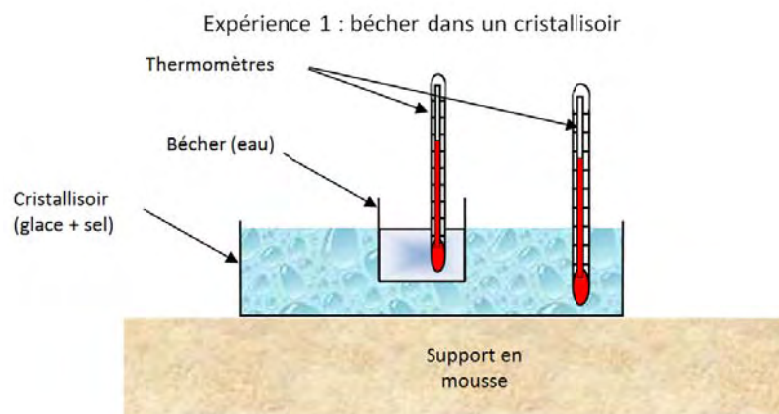
II) Les techniques :

Pour réaliser notre expérience, nous avons dû utiliser plusieurs techniques, et avec plusieurs mélanges réfrigérants. Nous avons aussi testé plusieurs liquides, autres que l'eau, pour regarder si ça marchait, juste par curiosité.

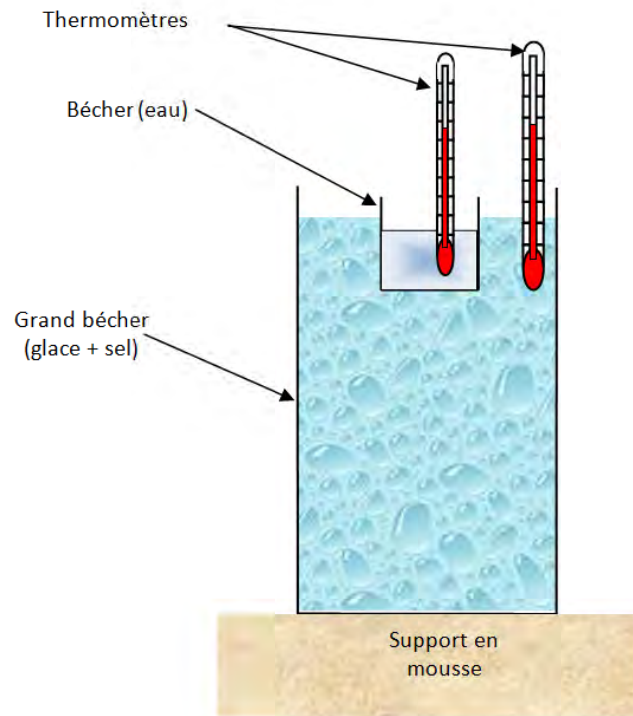
A) À nos débuts :

La première fois, nous avons tenté de mettre de l'eau distillée dans un flacon, puis de le poser au congélateur. Cependant, l'eau a gelé de façon normale. Nous avons pensé que l'eau a gelé à cause des vibrations du congélateur. Mais nous n'avons pas abandonné le congélateur et avons suspendu le flacon à l'aide d'un élastique dans le congélateur. Malheureusement, ça n'a pas marché non plus. Nous avons donc abandonné le congélateur.

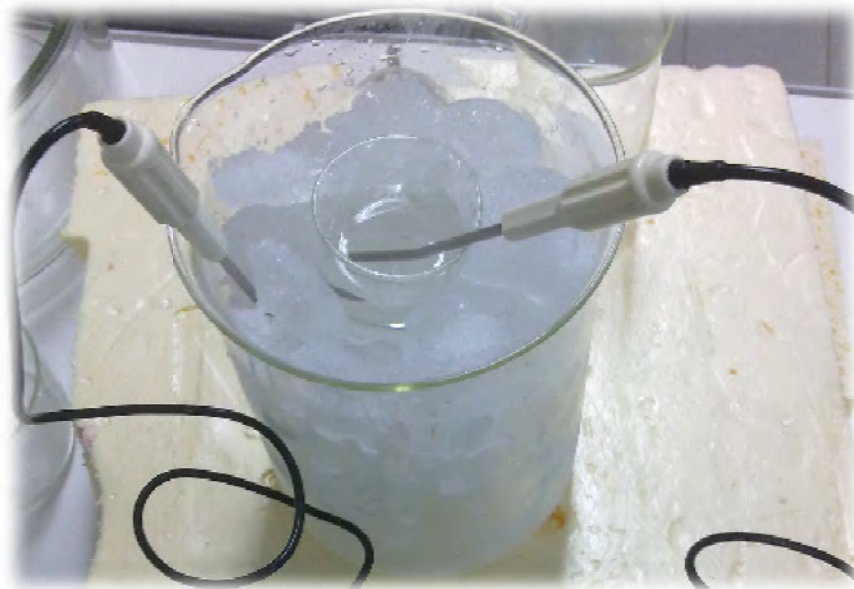
La deuxième fois, nous avons fait des glaçons dans le congélateur, et nous les avons disposés dans un cristalliseur, avec du sel (pour faire un liquide réfrigérant, cf partie suivante) et nous avons posé un bécher avec de l'eau distillée dedans, afin d'atténuer les chocs. Cette expérience a marché, mais elle ne fonctionnait pas à chaque fois, donc nous avons trouvé de la mousse pour la placer sous le cristalliseur, afin d'atténuer encore plus les chocs. Cette fois-ci, c'était la bonne technique.



Expérience 2 : bécher dans un grand bécher



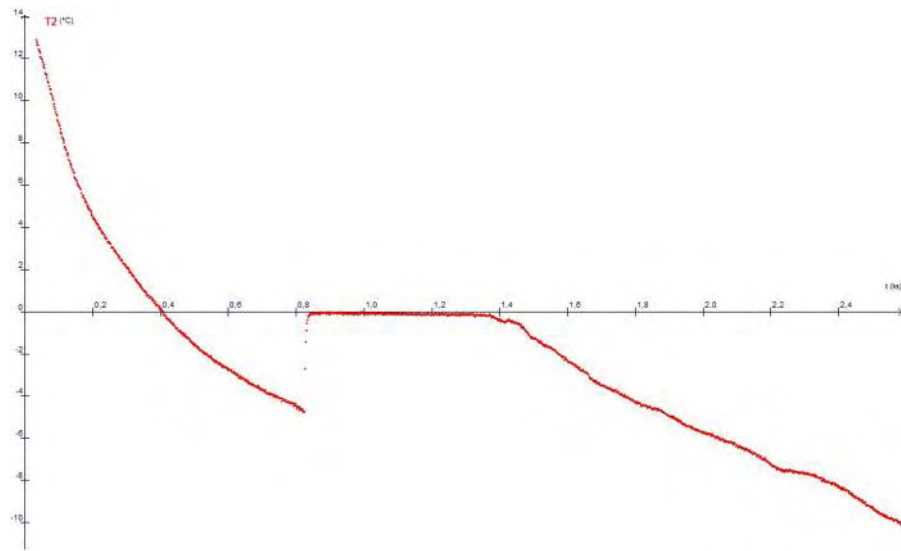
Ensuite, nous avons amélioré la deuxième solution, comme par exemple utiliser un grand bécher, à la place du cristalliseur, on a trouvé que ça marchait mieux. Comme l'expérience se faisait à l'air libre, nous avons pu poser des thermomètres dans le mélange réfrigérant, mais aussi dans l'eau distillée, afin de suivre la température de l'eau.



Après nous avons réalisé une courbe de l'eau lors de son refroidissement, ainsi nous avons observé la chute de la température.

Nous avons pu alors voir le passage de l'eau en état de surfusion et la cristallisation que nous avons provoquée.

Alors nous avons obtenu la courbe suivante :



Cette courbe n'est pas la seule que nous ayons réalisée et nous avons remarqué qu'à chaque fois que nous provoquions la cristallisation la température de l'eau remontait très rapidement pour se stabiliser aux alentours de 0°C puis au bout de quelques minutes l'eau recommençait à descendre.

Alors nous avons décidé de faire des recherches et donc d'expliquer ce phénomène :

Nous avons trouvé que lorsque l'eau gèle « normalement » il faut que l'intégralité de celle-ci ait atteint 0°C et soit donc totalement gelée, avant qu'elle ne puisse continuer à descendre à une température négative.

Dans le cas de l'eau surfondue, c'est ce même phénomène qui se produit, lors de la cristallisation seule une partie de l'eau devient solide, et donc il faut que l'eau encore liquide gèle. Ce qui explique cette zone de plat sur la courbe.

B) Les mélanges réfrigérants :

Afin de réaliser notre expérience, nous avons dû tester plusieurs mélange pour refroidir notre eau, dont :

- Le mélange glace/sel (NaCl)
- Le mélange glace/CaCl₂
- L'éthanol

D'abord, nous avons testé le mélange glace/NaCl, le plus courant et le plus connu. Il est très facile à faire, pas forcément « pratique », mais pas dangereux. La température baissait suffisamment, on a réussi à atteindre -20°C. Mais on a rencontré un problème : pour voir la cristallisation se dérouler, nous avons besoin de sortir le becher délicatement et de la poser sur la table, car on ne voyait pas à travers le mélange glace/sel (NaCl).

Donc, après plusieurs recherches sur Internet, on a pensé que l'éthanol était intéressant, car il avait une chaleur massique intéressante (2840 J.kg⁻¹ K⁻¹) et une bonne conductivité thermique (0,18 W.m⁻¹ K⁻¹). De plus, il était transparent et pratique, on n'avait qu'à verser l'éthanol dans un calorimètre, et le tour était joué. Cependant, on a trouvé que les résultats obtenus étaient semblables à ceux obtenus avec le mélange glace/sel, et comme l'éthanol était un peu plus dangereux que la glace, on l'a gardé seulement pour quelques expériences, où il était utile de voir l'eau directement.

Voici le calcul pour trouver la température à laquelle on peut descendre :

Chaleur → Q en J (joule)

Q cédée → négative

Q captée → positive

Q cédée + Q captée = 0

$$m_a c_a (\theta_f - \theta_{ia}) + m_e c_e (\theta_f - \theta_{ie}) = 0$$

Où :

- m_a, la masse d'eau
- m_e, la masse d'éthanol
- θ_{ie}, la température initiale de l'eau
- θ_{ia}, la température initiale de l'éthanol
- c_e, la chaleur massique de l'eau (4185 J.kg⁻¹ K⁻¹)
- c_a, la chaleur massique de l'éthanol (2840 J.kg⁻¹ K⁻¹)

Par exemple si on utilise 1 L d'éthanol à -20°C et 200 mL d'eau à 4°C, quelle est la température finale, θ_f?
θ cédée + θ captée = 0

$$m_e c_e (\theta_f - 4) + m_a c_a (\theta_f + 20) = 0$$

$$m_e c_e \theta_f - 4 m_e c_e + m_a c_a \theta_f + 20 m_a c_a = 0$$

$$\theta_f (m_e c_e + m_a c_a) = 4 m_e c_e - 20 m_a c_a$$

$$\theta_f = \frac{4m_e c_e - 20m_a c_a}{m_e c_e + m_a c_a}$$

$$\theta_f = \frac{4 \times 0,2 \times 4185 - 20 \times 0,780 \times 2400}{0,2 \times 4185 + 0,780 \times 2400}$$

$$\theta_f = -12.6^\circ\text{C}$$

Peu après, on a essayé le mélange glace/ CaCl_2 , mais les résultats obtenus étant identiques à ceux du mélange glace/ NaCl , on a laissé tomber, de plus la préparation était plus difficile et la dangerosité un peu plus élevée.

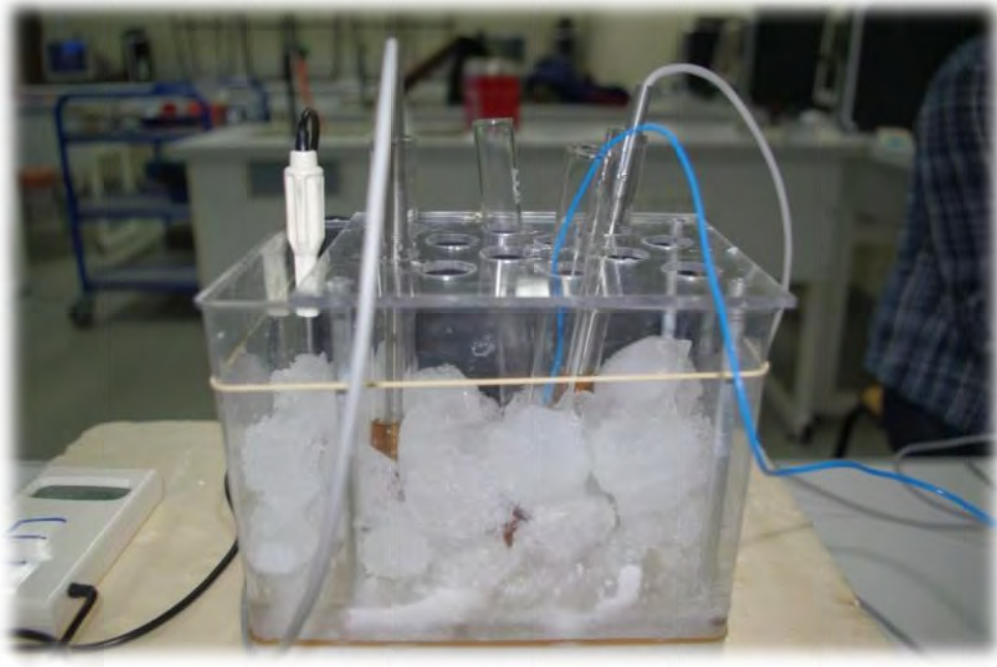
C) Les liquides autres que l'eau :

La surfusion dans le cas du lac Ladoga, dont l'eau n'est pas pure, peut rester un simple concours de circonstances. Nous avons vérifié si le fait que l'eau « pure » soit toujours à prendre en compte. Alors nous avons essayé avec de l'eau du robinet, ce fut peu concluant, l'eau gèle normalement. Sauf une fois, après que le lycée eut subi une coupure d'eau, nous avons remarqué que cette fois si l'eau contenait de petites bulles de gaz, le miracle se produisait.

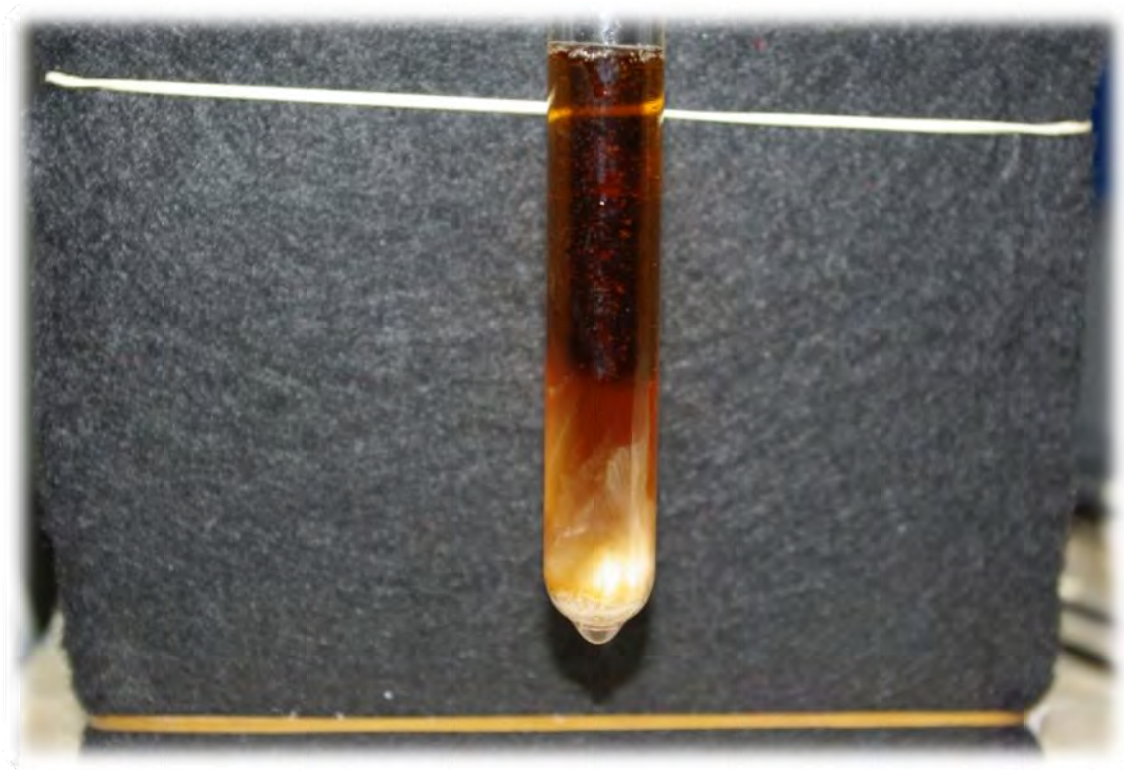
Heureux de notre réussite, nous ne nous sommes pas arrêtés en si bon chemin, « Eurêka », les bulles. Alors nous avons essayé avec de l'eau gazeuse, encore un succès. A ce moment là, les idées fusent et quelqu'un propose du coca-cola. Nous avons réalisé l'expérience et ce fut une réussite.

1) Le Coca-Cola :

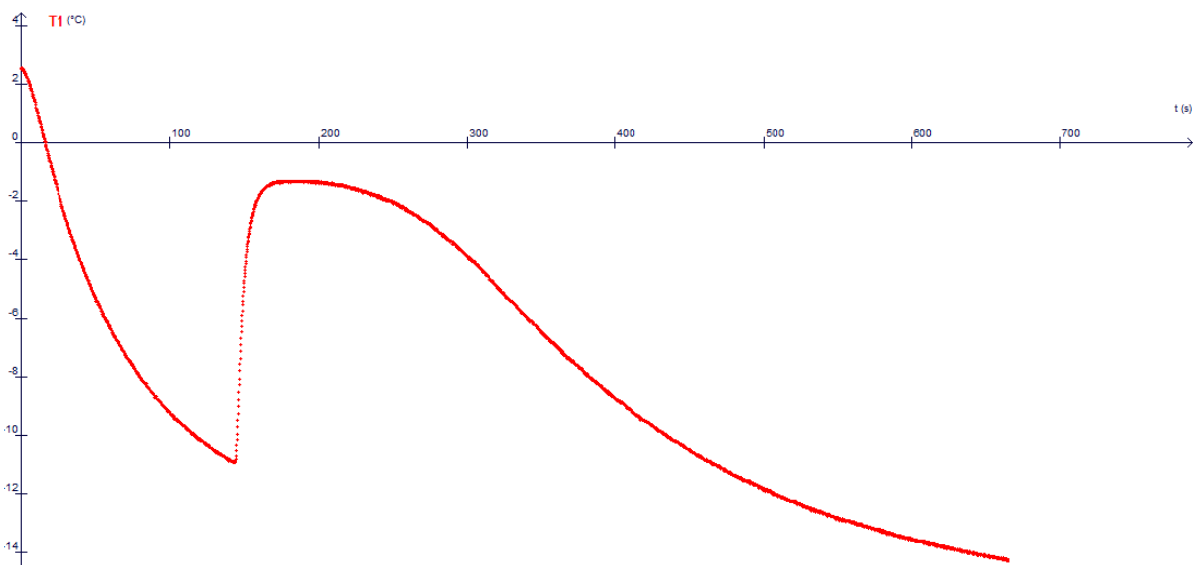
Photo de l'expérience avec le Coca-Cola :



L'expérience achevée, nous avons réussi à faire cristalliser du Coca-Cola sous 0°C , voici quelques photos :



Comme nous avons réussi avec le coca-cola, nous avons réalisé une courbe comme pour l'eau. Les deux courbes se ressemblent en tout point sauf sur le fait que la température, lors de la cristallisation, remonte à -2°C contrairement à l'eau, qui remonte à 0°C .



Nous avons montré le résultat à M. Buridant, un professeur de Sciences Physiques, et il nous a dit : « *Et puis quoi encore, vous n'allez pas me faire une surfusion avec du Beaujolais, pendant que vous y êtes ?* » Sérieux ou provocateur ?

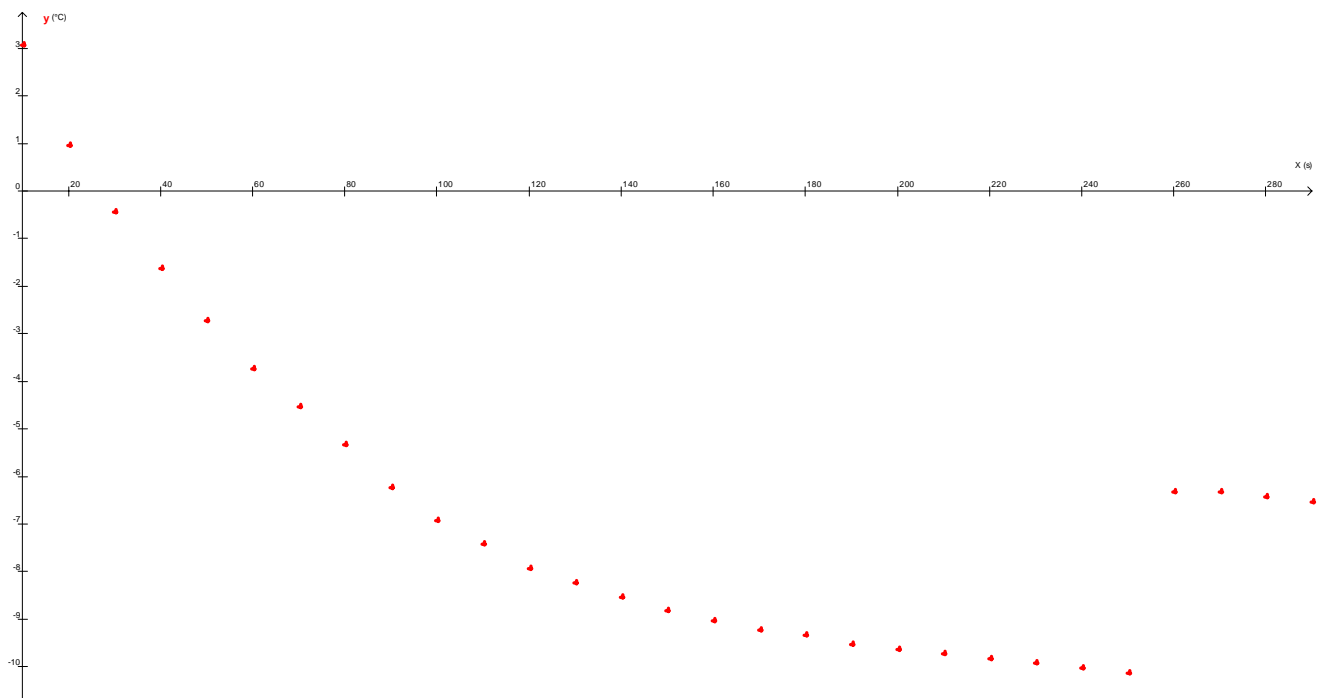
Bien sûr, nous avons essayé avec le Beaujolais nouveau puisque c'était la période.

2) Le Beaujolais :

Nous avons donc essayé de faire l'expérience avec du Beaujolais, voici une photo de Beaujolais cristallisé :



Ici, on peut malheureusement voir que le bas du tube à essai avait dégelé, le temps qu'on prenne en photo. La glace produite était présente dans tout le tube, avant d'avoir pris la photo. Nous avons réalisé une courbe avec le Beaujolais, la voici :



On peut voir que contrairement à la courbe avec l'eau, la température remonte à -6°C environ après la cristallisation, ce qui correspondrait à la température de solidification du Beaujolais.

Avec ces deux expériences, on a pu prouver que la surfusion est possible même avec un liquide non pur, donc le cas du lac Ladoga est tout à fait possible.

III) La vitesse de propagation et le son de la cristallisation :

A) La vitesse de propagation de la glace :

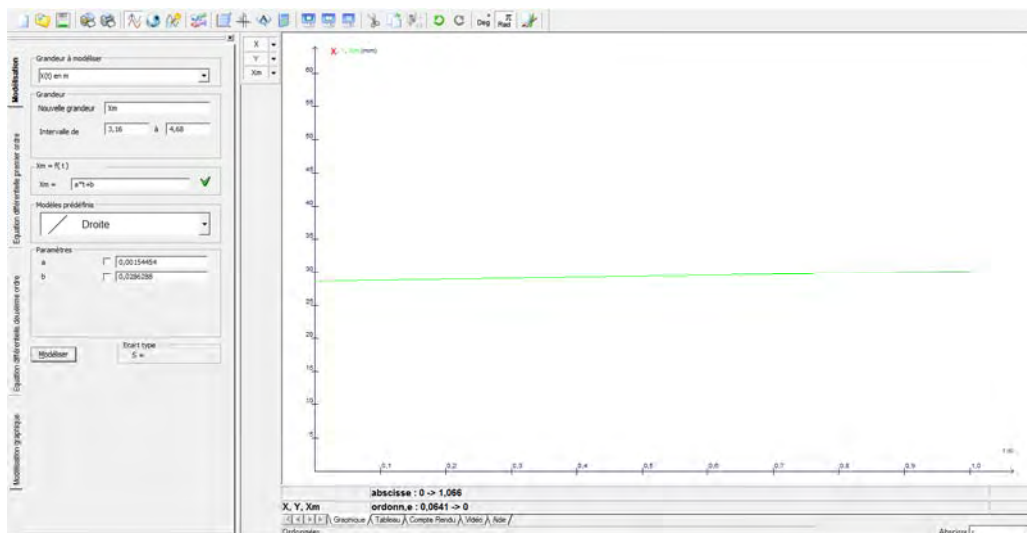
La première fois, pour évaluer la vitesse de propagation de la glace, nous avons simplement pris en vidéo avec un téléphone portable la cristallisation dans une éprouvette graduée, et avec les graduations, nous avons pu trouver la vitesse. Nous l'avons évaluée à ce moment là à environ $1,4 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ensuite, comme la méthode utilisée n'était pas vraiment précise, nous avons utilisé un logiciel, l'atelier scientifique de Jeulin, avec lequel nous avons pu déterminer plus précisément la vitesse de propagation de la glace quand elle cristallise sous l'eau. Plus clairement, comme nous savons qu'une vidéo est constituée d'images, nous avons placé des points correspondants à l'avancée de la glace dans l'eau sur la vidéo, image par image pour obtenir des valeurs dans un tableau, et ainsi obtenir deux droites, x et y. En modélisant ces droites, nous obtenons leurs coefficients directeurs (autrement dit, la vitesse de propagation en abscisse et en ordonnée), et donc en faisant le vecteur de chaque droite (x et y), et en additionnant les deux vecteurs, nous trouvons la vitesse exacte de la propagation de la glace.

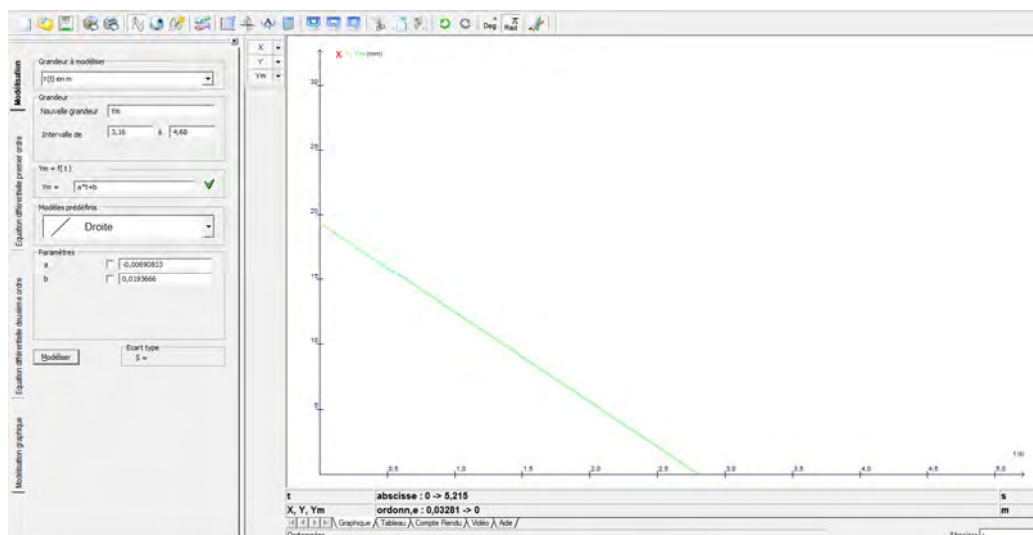
Nous avons fait cette expérience (avec le logiciel) deux fois. La première fois, nous avons trouvé une vitesse d'environ 2.2 cm/s , et une deuxième fois, une vitesse de $0,70 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Cela montre que la vitesse n'est pas toujours la même, cependant nous n'avons pas pu déterminer ce qui influe sur cette vitesse, mais nous pensons à la température de l'eau en surfusion.

Voici des captures d'écran de la deuxième tentative :

Pour x :



Pour y :



B) Le son produit par la cristallisation :

L'idée de chercher le son que produit la cristallisation vient du fait que dans le livre « Kaputt », lorsque le lac se fige, il y a comme un bruit de verre brisé ou comme quand on frappe sur du verre. Donc on a essayé d'exploiter cette voie.

Afin de trouver le son que produit la cristallisation, nous avons utilisé un micro, situé dans l'eau au moment de la cristallisation, et relié à un ordinateur avec le logiciel Audacity. De ce fait, nous avons enregistré des sons, pendant la formation de la glace (nous avons déclenché la cristallisation au moment voulu).

Avec cette expérience, nous avons obtenu des enregistrements, mais nous n'avons pas pu entendre de son particulier.

Cependant, une fois nous avons entendu un son se produire au moment de la cristallisation, qui ne pouvait certainement venir que de là. On peut donc en conclure qu'on peut obtenir un son, mais qu'on ne l'obtient pas toujours.

IV) Les chevaux et le lac Ladoga :

A) Un petit pas pour un Playmobil, un grand pour la surfusion :

Est-ce que des hommes auraient pu, par la force de leur bras, extirper les chevaux de la glace ? Nous nous sommes posé la question, et donc au départ, nous avons fait l'expérience avec un playmobil dans un bécher, qui sera ensuite retiré de la glace avec un dynamomètre, afin d'obtenir le résultat.

Voici une photo montrant le Playmobil coincé dans la glace :



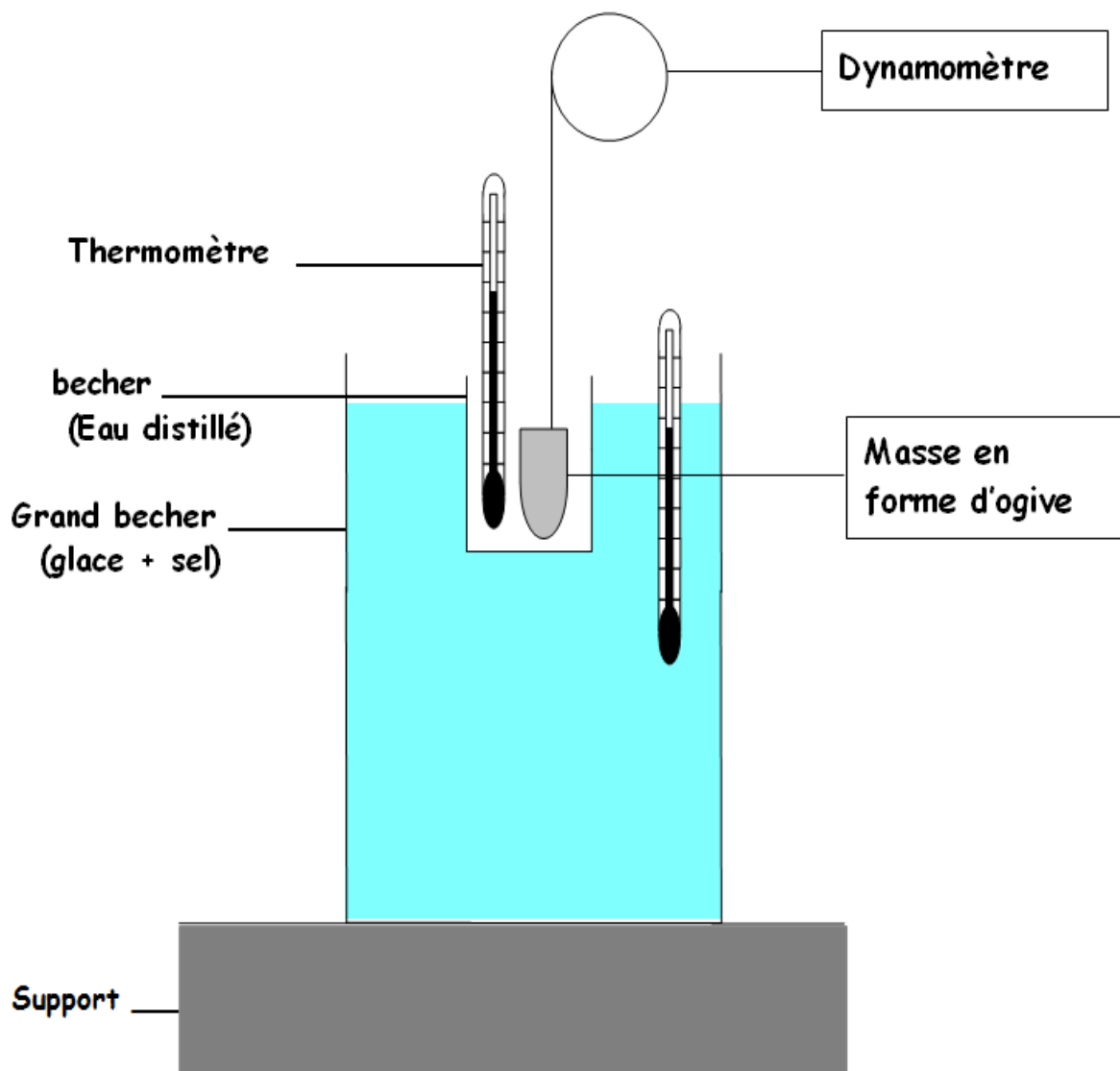
Grâce à cette expérience, nous avons trouvé les résultats suivants : Il a fallu la force 1,0 N pour soulever ce Playmobil™ de 12,8 g de la glace.

Nous comptons utiliser ce résultat en admettant qu'il y avait proportionnalité avec un homme.

Cependant à notre premier passage aux Olympiades de Physique, l'un des jurys nous avait fait remarquer qu'il ne voyait pas en quoi cela était proportionnel, car c'était plutôt une question de surface, et non de masse. Alors nous avons refait cette expérience avec des ogives de même volume et de même forme, puis nous avons provoqué la cristallisation à la même température. Ainsi, nous avons réalisé cette expérience pour vérifier s'il y avait bien une proportionnalité.

Dans cette nouvelle expérience, nous avons modifié la façon d'attacher l'objet (ici, l'ogive) au dynamomètre. Nous avons donc utilisé des aimants, en utilisant toujours la même quantité, afin de ne pas fausser les résultats.

Voici le schéma de cette expérience :



Masse de l'ogive (en g)	39,14	58,22	66,89	74,62	81,66	86,80
Force d'arrachement (en N)	0,8	1,3	1,2	1,1	0,9	1,2

Nous avons obtenu le même ordre de grandeur pour la force d'arrachement, même avec différentes masses. Cela montre que la masse n'influe pas dans la force d'arrachement.

Nous pensons que la qualité de la glace produite par la cristallisation influence un peu sur la force d'arrachement, d'où les petites différences au niveau des résultats.

Mais le problème qui se pose lorsque l'on veut faire le rapport avec les chevaux, c'est qu'il y a beaucoup plus de facteurs à prendre en compte que simplement la masse telle que la forme du cheval, la rugosité de la peau etc..

On ne peut donc pas facilement déterminer la force qu'il faut pour arracher le cheval de la glace, mais on peut donner un ordre de grandeur, en utilisant la proportionnalité entre la surface de l'objet arraché de la glace et la force d'arrachement.

En effet, les ogives ont été fabriquées dans un barreau d'acier de diamètre 18mm, et on sait qu'ils font tous 4,0 cm de hauteur, soit $4,0 \cdot 10^{-2}$ m. La surface, S, de l'ogive est donc de :

$S = \text{Surface disque} + \text{surface cylindre} + \text{surface demie-sphère}$

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h + (4 \pi \cdot R^2) / 2$$

$$S = 2\pi \cdot (0,9 \cdot 10^{-3})^2 + 2\pi \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \times 3,1 \cdot 10^{-2} + (4\pi \cdot (0,9 \cdot 10^{-3})^2) / 2$$

$$S = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

On admettra qu'il faut environ 1.1N pour arracher une ogive de l'eau, ainsi on trouve le résultat suivant :

	Ogive	Cheval
Surface de l'objet (en m ²)	$1,9 \cdot 10^{-4}$	3,0
Force d'arrachement (en N)	1.1	x

$$\text{On trouve donc } x = \frac{(3,0 \times 1,1)}{1,9 \cdot 10^{-4}} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ N}$$

Ainsi, on trouve que la force nécessaire pour retirer un cheval de la glace est de l'ordre de grandeur de $1,7 \cdot 10^4$ N

Il est donc tout simplement impossible d'arracher un cheval de la glace sans le tuer.

B) La vitesse d'un cheval à la nage

Pour savoir si les chevaux auraient pu s'en sortir, nous avons supposé la vitesse d'un cheval à la nage. Nous pensons que c'est de l'ordre de 2 ou 3 km.h⁻¹. Si on convertit en m.s⁻¹, ça donne au maximum $\frac{3}{3,6} = 0,8 \text{ m.s}^{-1}$, ce qui est largement suffisant pour dépasser la vitesse de cristallisation de l'eau.

Cependant, nous avons remarqué que la cristallisation commençait à un « germe », qui en l'occurrence est le cheval, puis qu'ensuite la glace se propageait autour du germe. Donc la glace, qui est partie du cheval, a continué sa traversée à travers l'eau, pour finalement s'arrêter à un obstacle, par exemple le rivage du lac. Les chevaux seraient ainsi pris au piège, même s'ils allaient plus vite que la glace dans l'eau.

Conclusion :

Ce lac se gelant brusquement, nous a donc amené à de nombreuses recherches et expériences. Ces dernières nous ont amenés à la connaissance de la cause de cette cristallisation instantanée mais aussi aux différents facteurs permettant cet état :

- Il est possible qu'une eau non pure soit surfondue, puisque nous l'avons obtenue avec de l'eau du robinet, de l'eau minérale, puis du Coca-cola™ et du Beaujolais nouveau.
- Les mesures de vitesses de propagation de « l'onde » cristallisation, montre qu'elle est de l'ordre du centimètre par seconde et donc très inférieure à celle des chevaux.
- La cristallisation semble produire un son caractéristique, celui-ci se propage à près de 340 m/s dans l'air et près de 1500 m/s dans l'eau, celui-ci aurait donc pu alerter les chevaux. A moins que ceux-ci ne soient le facteur déclenchant de la cristallisation.
- Dans ce cas, la force d'extraction de la glace étant très grande, il est impossible de se sortir de la glace lorsqu'on s'y trouve prisonnier

Nous en avons conclu que les chevaux n'auraient malheureusement pas pu s'en sortir, ni être sauvés. L'énigme du Lac Ladoga n'est alors plus pour nous un mystère !

Remerciements :

- ✚ M. Olivier BURIDANT, professeur Physique chimie, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Philippe LANCEL, professeur de maths/sciences lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Guillaume HERCOUET, professeur de SVT, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Thierry QUETU, professeur de Mathématiques, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme Céline BALY, professeure de lettres modernes, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme Nathalie JARNIER, documentaliste, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.

- ✚ M. Sébastien POTTIEZ, service informatique, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Fabien VIOLIER, service informatique, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.

- ✚ Mme RIGOLLET, proviseure, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ Mme GEORGE, proviseure adjointe, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.
- ✚ M. Alexandre KORBAS, chef des travaux, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer.

- ✚ M. François VENEL, Eric BRÉVIER, Jean-Luc DAVID, Alain ROCHES personnels du magasin de l'atelier du lycée, pour leurs précieux conseils.

- ✚ À tous les personnels du lycée qui ont fait ce qu'ils pouvaient pour nous aider dans notre travail,
- ✚ À nos professeurs de Français pour le travail de relecture.
- ✚ À nos parents pour le travail de relecture et leur patience.
- ✚ Merci aussi à tous ceux que nous avons oublié de citer et qui nous ont aidés.
- ✚ Merci à tous ceux qui ont eu la patience de nous écouter.