



Projet Cool Canette

2018 - 2020



Alexis Balestra

Philomène Didierjean

Professeurs référents : JC. Jouan & Y. Chriqui



Lycée Militaire de
Saint-Cyr L'Ecole



LYCÉE MILITAIRE DE SAINT-CYR
DIRECTION DES ÉTUDES
2 avenue Jean Jaurès
78210 SAINT-CYR L'ÉCOLE



Table des matières

1	Introduction	3
2	Comment produire du froid ?	4
2.1	Les machines frigorifiques : le congélateur	4
2.2	Froid physique et changements d'état	5
2.3	Froid chimique et mélanges réfrigérants	6
2.4	Détente de gaz	8
2.5	Autres effets thermiques	8
2.5.1	Effet Peltier	8
2.5.2	Effet magnétocalorique	9
3	Le prototype	9
3.1	Solution de refroidissement retenue	9
3.2	Réalisation du prototype	12
4	Optimisation du réfrigérant	13
4.1	Aspect théorique	13
4.2	Ajout d'ailettes de refroidissement	15
4.3	Ajout d'un absorbeur de chaleur	16
5	Conclusion	19
6	Annexe 1 : Caractéristiques d'une canette	20
6.1	Dimensions et masse d'une canette	20
6.2	Caractéristiques thermiques d'une canette	20
7	Annexe 2 : la loi de Newton	21

1 Introduction

Par une chaude journée d'été l'envie vous prend de savourer une canette de soda bien fraîche. Vous ouvrez votre réfrigérateur et...déception, il n'y a plus de canette au frais. Qu'à cela ne tienne, vous prenez une canette à température ambiante et la placez dans votre congélateur en espérant la boire fraîche rapidement. Il vous faudra attendre 30 à 40 min avant de vous rafraîchir. L'idée suivante vous vient alors :

Peut-on rafraîchir une canette en moins de trois minutes ?

Tel est le point de départ du projet "Cool Canette" que nous avons développé en partenariat avec la société Air Liquide et l'équipe R&D de M. Nicolle. Le projet consiste à refroidir une canette de 33 cL depuis la température ambiante (20°C) à la température de 5°C en moins de trois minutes avec des moyens simples à disposition dans une cuisine. Tout le monde ne dispose pas en effet d'une réserve d'azote liquide (à -196°C) dans sa cuisine pour les besoins de réfrigération !

Une recherche rapide sur Internet montre très peu de références sur le sujet : canette auto réfrigérante avec réservoir d'azote liquide proposée par l'entreprise sud coréenne Icetec en 2002, canette West Cold Child de l'entreprise américaine Joseph Company International avec réservoir de dioxyde de carbone liquide en 2014 et enfin la machine V-tex de l'entreprise britannique Enviro-cool qui propose en 2013 une machine permettant de refroidir une boisson en moins de 45 s mais destinée aux professionnels.

La première partie de notre travail a consisté à nous documenter sur les différentes techniques de production du froid et faire quelques expériences qualitatives préliminaires pour tester les solutions envisageables. C'est à l'issue de cette première phase de recherche que nous nous sommes rendus compte que la « production » de froid en quantité et en temps limité n'était pas si facile à réaliser. Nous avons néanmoins trouvé une solution basée sur l'utilisation du congélateur de la cuisine. Nous avons cherché à optimiser le transfert thermique avec la canette de façon à descendre sous la barre des 3 minutes. Cette deuxième étape d'optimisation nous a permis d'atteindre l'objectif visé et de mettre au point un prototype. A cette occasion, nous avons développé une solution originale et innovante pour augmenter les capacités de réfrigération du dispositif : l'absorbeur de chaleur. Dans un troisième et dernier temps nous nous sommes intéressés à la physique du transfert thermique mis en jeu dans l'expérience afin de valider le modèle théorique de la loi de Newton. Nous avons observé un écart à cette loi que nous interprétons et qui peut être mis à profit.

2 Comment produire du froid ?

Commençons par quelques chiffres pour préciser l'objectif visé.

Refroidir 33cL d'eau de $T_i=20^\circ\text{C}$ à $T_f=5^\circ\text{C}$ nécessite d'extraire une quantité de chaleur :

$$Q = m_{\text{eau}} \times C_{\text{eau}}(T_f - T_i) \quad (1)$$

soit numériquement,

$$Q = 0,33 \times 4180 \times (-15)$$

$$Q = -2,1 \times 10^4 \text{ J}$$

Le transfert ayant lieu en trois minutes, cela correspond à une puissance thermique :

$$P_{\text{th}} = \frac{Q}{\Delta t} \quad (2)$$

soit numériquement,

$$P_{\text{th}} = \frac{-2,07 \times 10^4}{3 \times 60}$$

$$P_{\text{th}} = -115 \text{ W}$$

Voyons maintenant les différentes solutions de refroidissement compatibles avec ces données.

2.1 Les machines frigorifiques : le congélateur

Le premier réflexe pour refroidir la canette est de la mettre au congélateur. Réalisons l'expérience suivante : la canette est placée au congélateur et relevons la température au centre de la canette toutes les minutes. Nous obtenons la courbe de refroidissement de la figure 1.

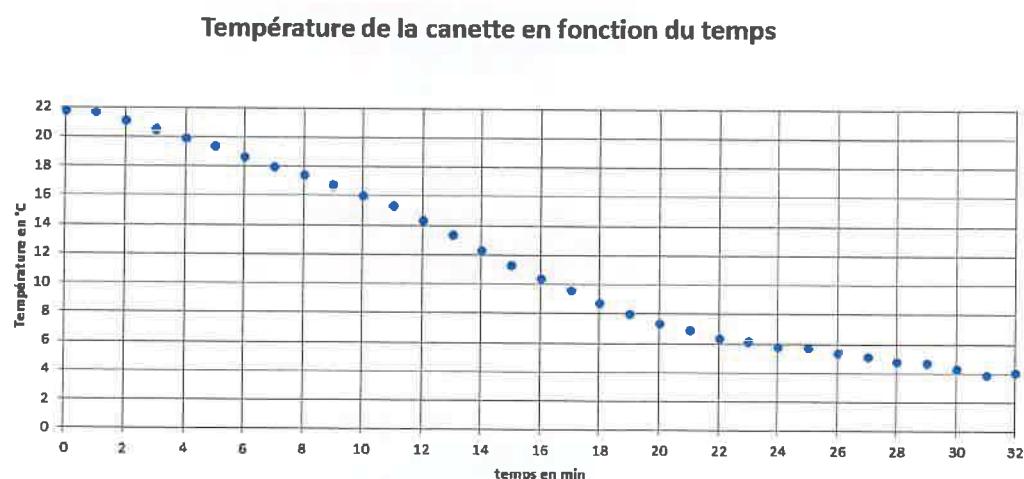


FIGURE 1 – Canette dans congélateur

Premier enseignement : le temps de refroidissement pour atteindre 5 °C est bien supérieur à 3 minutes et avoisine les 27 minutes, malgré la température intérieure du congélateur qui frôle les –30 °C (c'est la température du congélateur du laboratoire ; la température intérieure d'un congélateur domestique est plus proche de –20 °C).

Les échanges thermiques avec l'air (même froid, –30 °C), sont mauvais car l'air est un isolant thermique.

2.2 Froid physique et changements d'état

Le deuxième réflexe, pour refroidir une boisson est d'y introduire des glaçons. La fusion d'un kilogramme d'eau à 0 °C nécessite un apport d'énergie thermique de 334 kJ, appelée chaleur latente de changement d'état et notée $L_{fusion} = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$. Cette énergie est prélevée au milieu ambiant qui se refroidit. Ainsi, on peut déterminer la masse de glace nécessaire au refroidissement de 330 mL d'eau de $T_i=20^\circ\text{C}$ à $T_f=5^\circ\text{C}$:

$$m_g = \frac{-Q}{L_{fusion}} \quad (3)$$

où $Q_{eau} = -2,07 \times 10^4 \text{ J}$ est le transfert thermique nécessaire pour refroidir la boisson et calculé dans le paragraphe précédent. Nous obtenons numériquement :

$$m_g = \frac{2,07 \times 10^4}{334 \times 10^3}$$

$$m_g \simeq 60 \text{ g}$$

Réalisons alors l'expérience suivante : dans un bêcher agité contenant 330 mL d'eau, introduisons une masse de glace voisine de la masse calculée précédemment et mesurons la température en fonction du temps.

Nous obtenons les courbes de la figure 2, dans le cas de 54 g de glace (3 glaçons) et 106 g.

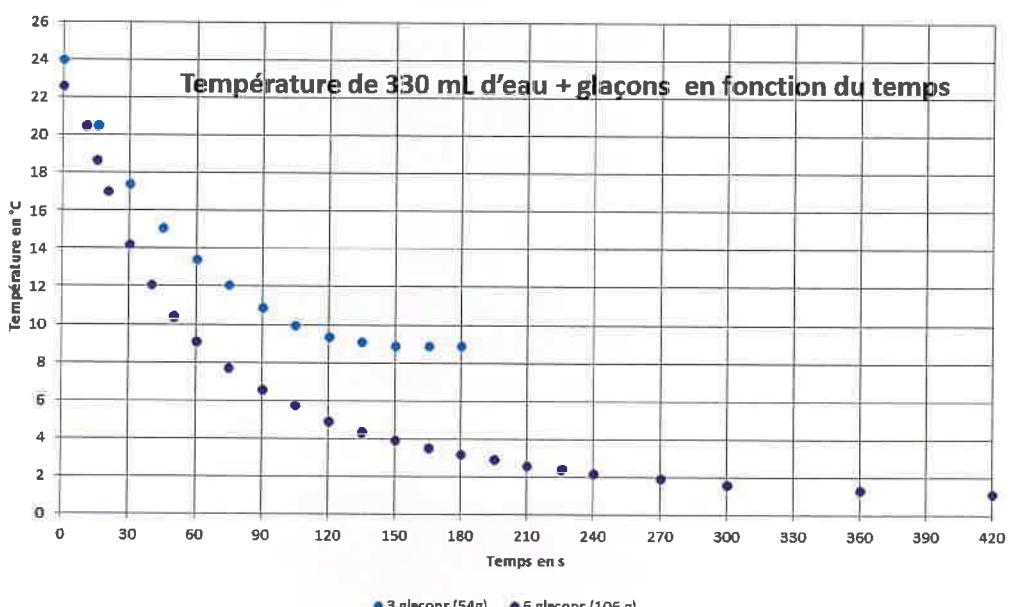


FIGURE 2 – Refroidissement de 330 mL d'eau avec glaçons

Nous voyons sur cette courbe l'efficacité de la fusion dans le processus de refroidissement. La technique possède néanmoins un inconvénient : elle nécessite d'introduire une grande quantité de glace dans la boisson, donc d'eau ce qui risque d'en altérer le goût. Malgré son efficacité nous ne retenons pas cette solution.

La vaporisation de l'eau à 100 °C sous la pression atmosphérique, est bien plus efficace d'un point de vue énergétique car elle nécessite un apport d'énergie thermique 10 fois plus grand que celui nécessaire à la fusion. En effet, la vaporisation d'un kg d'eau nécessite un apport de 2265 kJ ($L_{vap} = 2265 \text{ kJ kg}^{-1}$). Ainsi la masse d'eau nécessaire pour refroidir la canette serait seulement de :

$$m_{eau} = \frac{-Q}{L_{vap}} \quad (4)$$

Soit

$$m_{eau} = \frac{2,07 \times 10^4}{2265 \times 10^3}$$

$$m_{eau} \simeq 9 \text{ g}$$

Seulement, pour que la vaporisation se produise à température ambiante, il faudrait travailler sous pression réduite de 23 mbar.

Une autre solution, consisterait à utiliser un liquide qui se vaporise à la température ambiante à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Le liquide maintenu sous pression, à la température ambiante, est détendu et se vaporise. C'est sur ce principe que reposent les bombes de froid utilisées par les sportifs (composition : mélange de n-butane/propane/iso-butane (gaz propulseur), alcool denat, parfum) qui permettent d'atteindre localement une température de -40 °C comme nous avons pu le constater en pulvérisant le liquide sur l'extrémité d'un thermomètre. La difficulté avec ces techniques de vaporisation, comme nous avons pu le constater expérimentalement, est d'optimiser le transfert thermique avec la canette. En effet, la chaleur nécessaire à la vaporisation du liquide est prélevée en partie à la canette et en partie à l'air ambiant.

Terminons par citer le phénomène d'évaporation responsable de la sensation de froid que l'on ressent lorsque notre peau est mouillée (principe du brumisateur, ou du réfrigérateur pot en pot). L'évaporation est un phénomène lent mais qui peut être accéléré en présence d'un courant d'air. La lenteur du phénomène nous a conduit à mettre cette solution de côté après quelques tests non concluants.

2.3 Froid chimique et mélanges réfrigérants

Le mélange eau/glace pillée a une température de 0 °C. L'ajout de sel de cuisine (chlorure de sodium $\text{NaCl}_{(s)}$) au mélange précédent permet d'obtenir une température négative. Théoriquement, l'ajout de 30 g de sel à 100 g de glace permet d'atteindre une température de -20 °C [1].

Pour tester l'efficacité du refroidissement, nous avons fait les expériences qualitatives suivantes : une canette contenant 33 cL d'eau à température ambiante voisine de 20 °C est plongée dans différents mélanges. Nous mesurons la température au centre de la canette et mesurons le temps nécessaire pour atteindre 5 °C.

La figure 3 montre le montage expérimental : nous travaillons dans un calorimètre de façon à limiter les échanges thermiques entre le mélange réfrigérant et l'air ambiant.



FIGURE 3 – Expériences préliminaires

Les résultats sont résumés dans le tableau 1.

Type de mélange	Durée (min)
eau/glace à 0 °C	20
eau/glace à 0 °C et agitation du contenu de la canette	15
sel/glace pilée à -12 °C	6
sel/glace pilée à -12 °C et agitation du contenu de la canette	5

TABLEAU 1 – Durée de refroidissement suivant le mélange réfrigérant.

Ces expériences qualitatives montrent que les mélanges réfrigérants constituent un meilleur thermostat que l'air du congélateur, pourtant à une température plus basse. Les solides et les liquides ont en effet une capacité thermique bien plus élevée que celle des gaz, si bien que pour un même transfert thermique, un solide (ou un liquide) s'échauffe moins qu'un gaz.

Nous observons aussi que plus la température du mélange réfrigérant est basse, plus le refroidissement est rapide.

Ces expériences montrent également le rôle fondamental de l'agitation dans le processus de refroidissement.

Notons qu'il est possible d'atteindre des températures encore plus basses à l'aide d'autres mélanges [1]. Ainsi le mélange de 100 g de glace pilée (0°C) avec 143 g de chlorure de calcium hydraté $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ doit permettre de descendre à -55°C . Une substance comme $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}_{(s)}$ n'étant pas d'usage courant, nous mettons provisoirement cette solution de refroidissement de côté. D'autant que le processus n'est pas réversible et ne permet pas de réutiliser le mélange une fois utilisé.

2.4 Détente de gaz

Un gaz quand il se détend se refroidit. C'est le principe utilisé par notre partenaire pour obtenir de l'air liquide (procédé Claude). C'est aussi la détente de gaz qui est mise à profit dans un congélateur pour refroidir le liquide réfrigérant avant que ce dernier ne se vaporise pour refroidir l'intérieur du congélateur.

Considérons de l'air détendu et refroidit à une température de -20°C . La capacité thermique volumique de l'air étant de $C_V = 0,8 \text{ J K}^{-1} \text{ L}^{-1}$, nous pouvons évaluer le volume d'air V_{air} nécessaire pour refroidir la canette, en supposant que l'air se réchauffe de $T_i = -20^\circ\text{C}$ à $T_f = 0^\circ\text{C}$.

$$V_{\text{air}} = \frac{Q}{(T_f - T_i) \times C_v}$$

où $Q = -2,07 \times 10^4 \text{ J}$ est le transfert thermique nécessaire pour refroidir la canette. Nous obtenons numériquement :

$$\begin{aligned} V_{\text{air}} &= \frac{2,07 \times 10^4}{20 \times 0,8} \\ V_{\text{air}} &\simeq 1 \times 10^3 \text{ L} \end{aligned}$$

De l'ordre de 1 m^3 , le volume d'air est important et rend le système peu pratique à utiliser. Par ailleurs comme l'a montré l'expérience réalisée avec le congélateur, l'air est un mauvais conducteur thermique ce qui nous conduit à mettre cette solution de côté.

2.5 Autres effets thermiques

2.5.1 Effet Peltier

Quand une jonction entre deux métaux de nature différente est parcourue par un courant, elle libère ou absorbe de la chaleur selon le sens du courant.

Cet effet a été découvert en 1834 par Jean-Charles Peltier. C'est sur ce principe que fonctionnent les modules Peltier du commerce, qui utilisent aujourd'hui des matériaux semi-conducteurs.

Les puissances thermiques de réfrigération de ces modules vont de 1 W à quelques centaines de W. Elles sont donc compatibles avec la puissance thermique requise

pour refroidir la canette. Les modules de puissance nécessitent cependant l'emploi de courants de forte intensité, de l'ordre de la dizaine d'ampères.

Faute de temps, nous n'avons pas pu explorer cette piste qui présenterait l'avantage d'être une solution portative. Nous nous interrogeons notamment sur le temps nécessaire pour atteindre le régime de fonctionnement d'un tel module. Ainsi que sur l'efficacité du transfert thermique avec la canette (contact solide/solide).

2.5.2 Effet magnétocalorique

Certaines substances magnétiques (métaux et céramiques comme $\text{MnAs}_{1-x}\text{Sb}_x$) qui ont été aimantées par un champ magnétique se refroidissent lors du processus de désaimantation (quand on supprime le champ magnétique). Cet effet a été découvert en 1881 dans le fer par le physicien allemand E. Warburg. Le premier réfrigérateur conçu sur ce principe a été inventé en 1976 par Brown qui utilisait la désaimantation cyclique du gadolinium pour un abaissement de température de -44°C .

Cette solution a été écartée par notre partenaire.

3 Le prototype

3.1 Solution de refroidissement retenue

À l'issue de cette première phase de recherche, nous avons défini les propriétés du thermostat. Il doit être :

bon conducteur thermique pour favoriser les échanges thermiques avec la canette. De ce point de vue, les gaz sont moins efficaces que les liquides ou les solides car moins denses. Dans le cas des solides, il faudrait s'assurer d'un contact parfait entre le solide et la canette alors qu'avec un liquide, le contact est nécessairement parfait.

le plus froid possible. En effet, le transfert thermique est d'autant plus efficace que la différence de température entre le thermostat et la canette est grand. Plus précisément, la puissance thermique est proportionnelle à la différence de température entre la canette et le milieu extérieur d'après la loi de Newton (annexe 2)

de grande capacité thermique de façon à limiter son réchauffement et maintenir une différence de température entre le thermostat et la canette, pour la même raison que précédemment.

liquide pour bénéficier de l'effet d'agitation qui favorise le transfert thermique et maintenir de part et d'autre de la paroi de la canette une différence de température élevée, du moins supérieure à celle que l'on aurait sans agitation.

Nous avons alors retenu la solution de refroidissement suivante : utilisation d'un réfrigérant liquide préalablement refroidit par un congélateur à -18°C . L'utilisation d'un liquide, de capacité thermique élevée, permet de limiter le réchauffement du réfrigérant et de bénéficier de l'effet d'agitation qui permet d'homogénéiser les températures et de favoriser le transfert thermique. En revanche, cela nécessite d'utiliser un liquide réfrigérant qui se solidifie en-dessous de -18°C .

Nous nous sommes ainsi orientés vers le mélange eau-éthanol dont la température de solidification dépend du pourcentage massique d'éthanol comme le montre la courbe de la figure 4 :

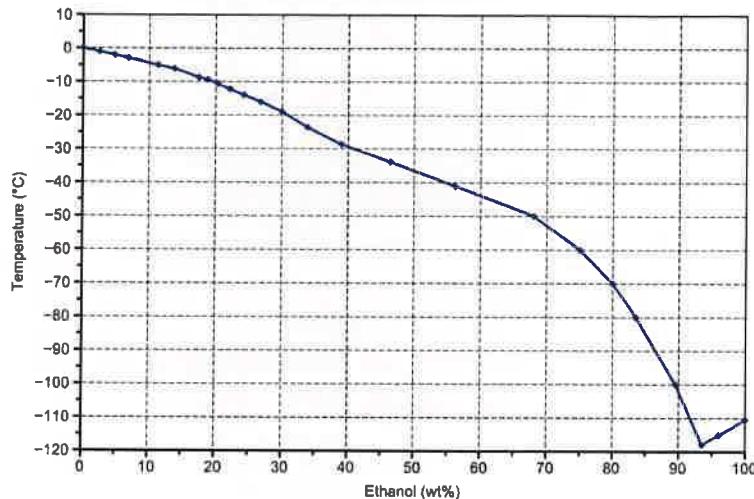


FIGURE 4 – Température de solidification d'un mélange eau-éthanol en fonction du pourcentage massique d'éthanol ([2]).

Nous choisissons de travailler avec des mélanges réfrigérants dont le pourcentage massique en éthanol est de 40 %, ce qui assure une température de solidification inférieure à -30°C tout en limitant la consommation d'éthanol.

Dans la deuxième phase du projet nous avons cherché à optimiser le transfert thermique entre la canette et le réfrigérant.

Pour tester l'influence d'un paramètre, le protocole expérimental est le suivant : la canette test est placée au congélateur en même temps qu'une canette témoin. Nous mesurons les températures au centre des deux canettes en fonction du temps comme le montre la figure 5.

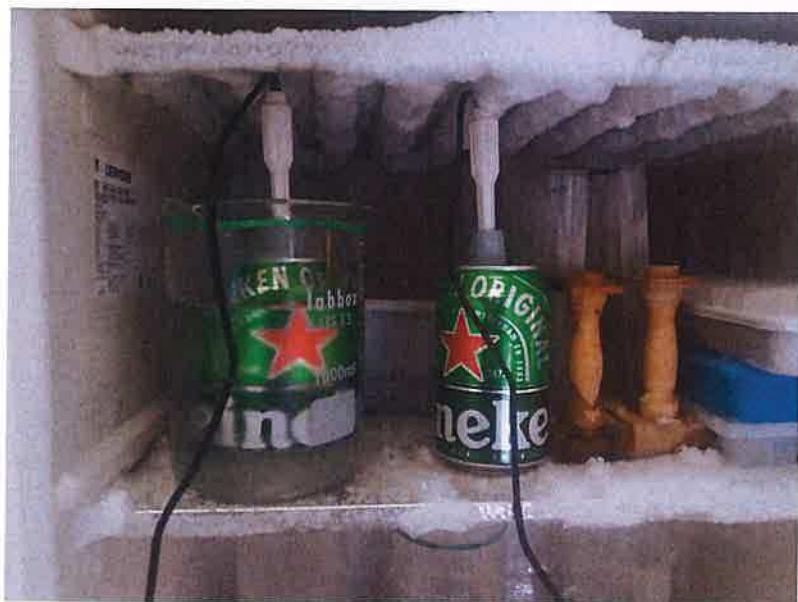


FIGURE 5 – canette au congélateur

Différents paramètres ont été testés : volume du réfrigérant, agitation ou non de l'intérieur de la canette. L'agitation du réfrigérant est plus difficile à réaliser en pratique.

Nous présentons l'expérience la plus concluante par rapport à l'objectif visé : la canette test est placée au congélateur dans 425 mL de réfrigérant dont la température initiale est de -28°C . L'intérieur de la canette est agitée mécaniquement. La température au centre de la canette est mesurée en fonction du temps ainsi que celle au centre de la canette témoin (placée dans le même volume de réfrigérant mais sans agitation de l'intérieur de la canette). Nous obtenons les courbes de la figure 6 :

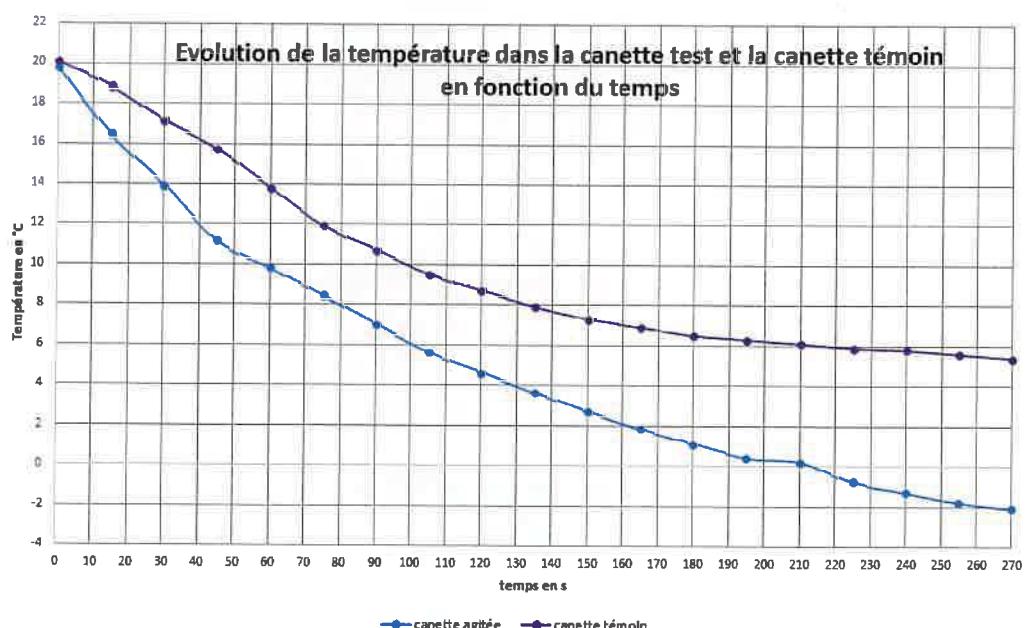


FIGURE 6 – canette agitée placée dans le réfrigérant au congélateur

Le processus de refroidissement est particulièrement efficace puisque nous atteignons 5 °C en 110 s ! Et à ce stade, le défi que nous nous étions lancés est relevé !

3.2 Réalisation du prototype

Forts de ce succès, nous avons réalisé un premier prototype.

Le prototype est constitué d'un récipient contenant le liquide réfrigérant (400 mL) et placé au congélateur. Les parois du récipient sont en plastique afin de limiter les transferts thermiques avec l'air ambiant lors du refroidissement de la canette.

Nous souhaitons garder la canette sèche pendant l'opération de refroidissement sans réduire le temps de refroidissement. Pour cela nous empruntons une technologie développée initialement par la NASA. La canette est insérée dans une poche en contact avec le réfrigérant et réalisée à partir d'une couverture de survie. Le matériau de la couverture de survie présente les avantages suivants :

- conducteur thermique
- fin mais résistant
- souple ce qui permet à la pression du liquide réfrigérant de venir le plaquer sur la canette et d'avoir un bon contact thermique

Le prototype est agité manuellement par l'opérateur et permet de refroidir une canette en moins de trois minutes tout en la gardant sèche comme le montre la vidéo suivante (insérer un lien vers la vidéo du projet).

Des améliorations sont possibles comme l'ajout d'un capteur de température au réfrigérant pour suivre la réfrigération de la canette en fonction du temps ainsi que l'utilisation d'une agitation mécanique plutôt que manuelle (mais il est nécessaire d'agiter et le réfrigérant et la canette).

L'étape suivante consisterait à tester le prototype avec des liquides autres que l'eau que nous avons utilisée pour les expérimentations ainsi que l'effet de l'agitation sur les boissons gazeuses.



FIGURE 7 – prototype

En tant que conquérants du froid, nous ne nous sommes pas arrêtés là et nous avons cherché à optimiser le transfert thermique entre le réfrigérant et la canette.

4 Optimisation du réfrigérant

Comment optimiser le réfrigérant et son pouvoir de réfrigération ? Pour répondre à cette question, nous avons approfondi nos connaissances dans le domaine de la physique du transfert thermique.

4.1 Aspect théorique

Le transfert thermique entre le réfrigérant et la canette est régi par la loi de Newton (annexe 2). La puissance thermique prélevée à la canette est donnée par :

$$P = h \times S \times (T_{\text{réfrigerant}} - T_{\text{canette}}) \quad (5)$$

où h ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) est un coefficient d'échange caractéristique de l'interface canette/réfrigérant et S la surface d'échange entre la canette et le réfrigérant.

Cette relation confirme que plus la différence de température entre la canette et le réfrigérant est élevée, plus la puissance thermique est importante comme l'ont montré les expériences préliminaires.

L'influence du volume du réfrigérant intervient dans le terme $T_{\text{réfrigerant}} - T_{\text{canette}}$. En effet, plus le volume du réfrigérant est grand, plus la variation de température du réfrigérant est faible. Le réfrigérant reste efficace plus longtemps.

D'un point de vue énergétique, pour refroidir 330 mL d'eau de 20 °C à 5 °C, il faut un

volume équivalent de réfrigérant qui passe de -20°C à -5°C . Ainsi le volume minimal de réfrigérant est d'environ 330 mL. Pour la réalisation du prototype, nous avons cherché un compromis entre puissance thermique et encombrement du dispositif.

Comme l'ont montré les expériences préliminaires, le rôle de l'agitation est crucial. En effet, le coefficient d'échange h est plus élevé en présence d'agitation. Cela se comprend facilement : l'agitation permet d'homogénéiser les températures dans le réfrigérant et la canette et de maintenir une différence de température importante de part et d'autre de la paroi de la canette de façon à maximiser le transfert thermique.

Conformément à la loi de Newton, pour optimiser le réfrigérant, nous avons exploré deux pistes :

la première consiste à augmenter la surface d'échange grâce à l'ajout d'ailettes de refroidissement à la canette.

la seconde consiste à maintenir une différence de température constante entre le réfrigérant et la canette. A cette occasion nous avons trouvé une solution originale et développé un absorbeur de chaleur simple mais efficace.

Au cours du projet, le protocole expérimental a évolué comme le montre la figure 8. Les dernières expérimentations ont été réalisées en dehors du congélateur et à température ambiante. Certes les pertes thermiques avec l'air ambiant sont plus importantes mais cela nous a permis d'interfacer les thermomètres d'une part et d'autre part d'agiter l'intérieur de la canette et le réfrigérant de façon à pouvoir mesurer le flux thermique.

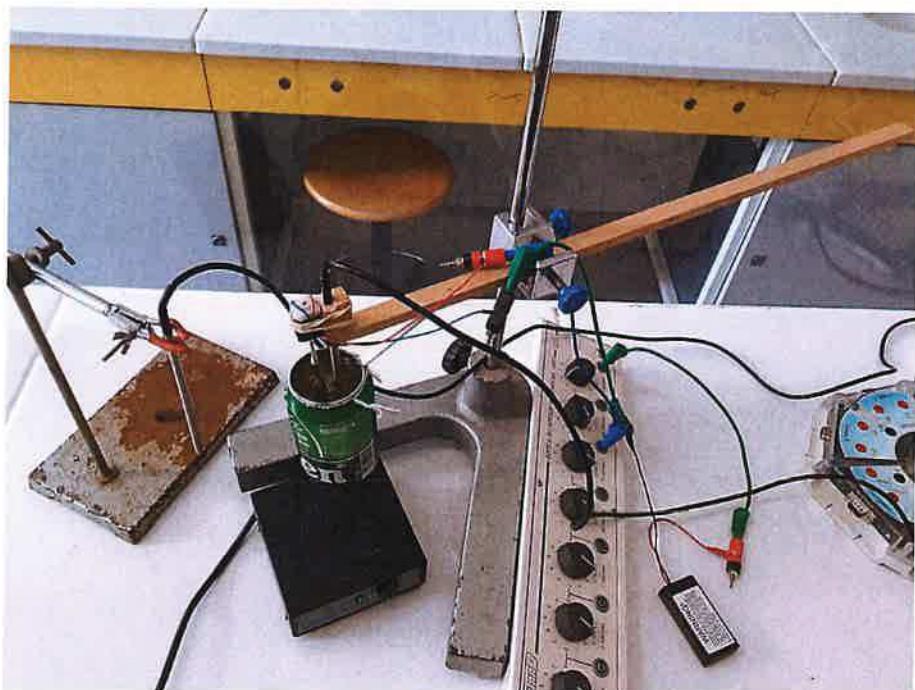


FIGURE 8 – canette instrumentée

4.2 Ajout d'ailettes de refroidissement

Pour tester l'influence des ailettes de refroidissement, nous avons réalisé l'expérience suivante.

La canette est plongée (à la date $t = 0$) dans un volume $V = 1,0 \text{ L}$ de réfrigérant à -28°C contenant préalablement les ailettes de refroidissement (pré-refroidies donc). L'intérieur de la canette et le réfrigérant sont agités. La température de la canette est mesurée au cours du temps à l'aide d'un système d'acquisition (figure 10). La même expérience est réalisée sans les ailettes.

L'encombrement dû aux ailettes nous oblige à travailler avec un volume de réfrigérant et un bêcher de taille plus importante.

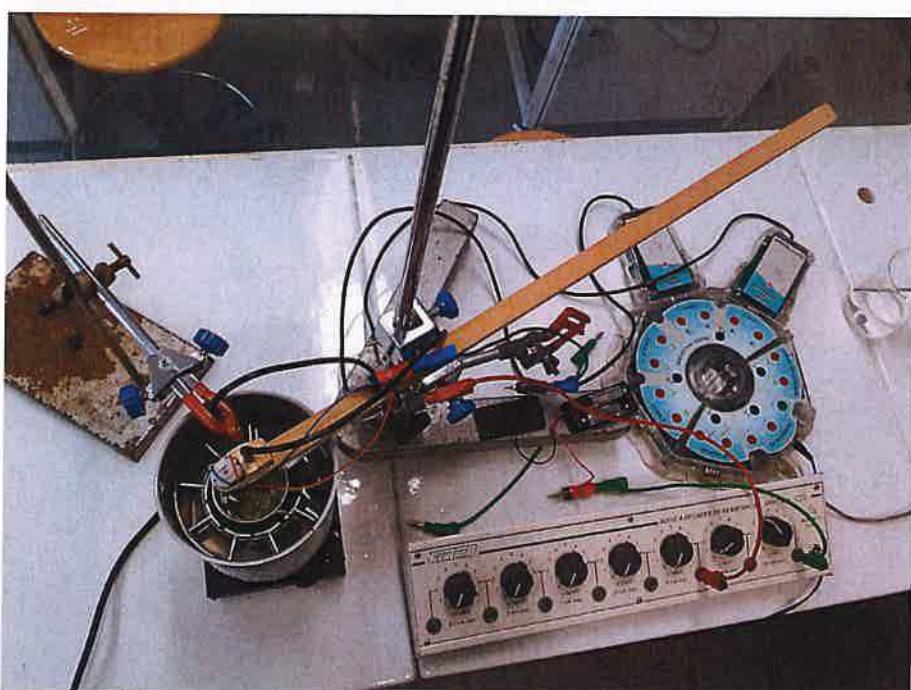


FIGURE 9 – expérience de refroidissement d'une canette munie d'ailettes

Nous obtenons les courbes de température de la figure 10.

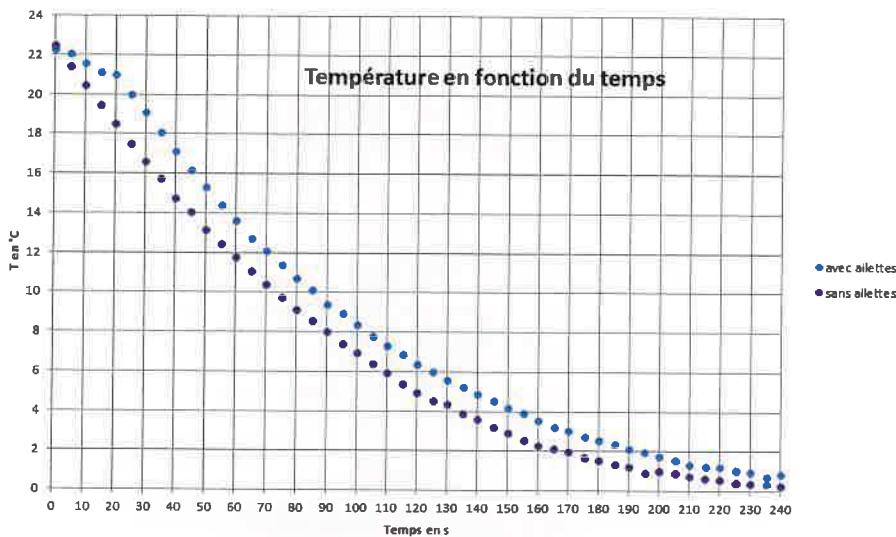


FIGURE 10 – Évolution de la température de la canette avec et sans ailettes

Comme le montre les courbes de température les ailettes induisent un retard au refroidissement de l'ordre de 20 s.

Nous proposons l'interprétation suivante : l'ajout d'aillettes certes augmente la surface d'échange mais également l'épaisseur de la paroi de la canette. L'augmentation de l'épaisseur est responsable du retard au refroidissement dans les premières secondes du refroidissement. Pour vérifier l'hypothèse, il faudrait refaire l'expérience dans les mêmes conditions avec des ailettes de même surface mais d'épaisseur différente.

Conclusion : l'introduction d'aillettes est une fausse bonne idée.

4.3 Ajout d'un absorbeur de chaleur

La deuxième piste pour optimiser le réfrigérant consiste à essayer de maintenir sa température constante. Il faut donc évacuer la chaleur que le réfrigérant prélève à la canette ou l'absorber ! L'idée originale que nous avons trouvée est la suivante : utiliser la fusion du mélange eau-éthanol pour absorber la chaleur. Comme nous l'avons vu lors des expériences préliminaires, les changements d'état sont particulièrement efficaces d'un point de vue énergétique. En jouant sur la composition en éthanol du mélange eau-éthanol, nous pouvons choisir sa température de fusion. Ainsi, pour une fraction massique en éthanol de 40 pour cent, la température de fusion est de -20°C d'après la figure 4.

Pour tester cette idée, nous réalisons l'expérience suivante.

La canette est plongée (à la date $t = 0$) dans un volume $V = 400 \text{ mL}$ de réfrigérant liquide à -28°C entouré de 900 mL de réfrigérant solide à la même température et séparé par une paroi en aluminium (bon conducteur thermique). L'intérieur de la canette et le réfrigérant liquide sont agités. La température de la canette est mesurée au cours du temps à l'aide d'un système d'acquisition ainsi que celle du réfrigérant (figure 11). La même expérience est réalisée en remplaçant le réfrigérant solide par un réfrigérant liquide de même volume.

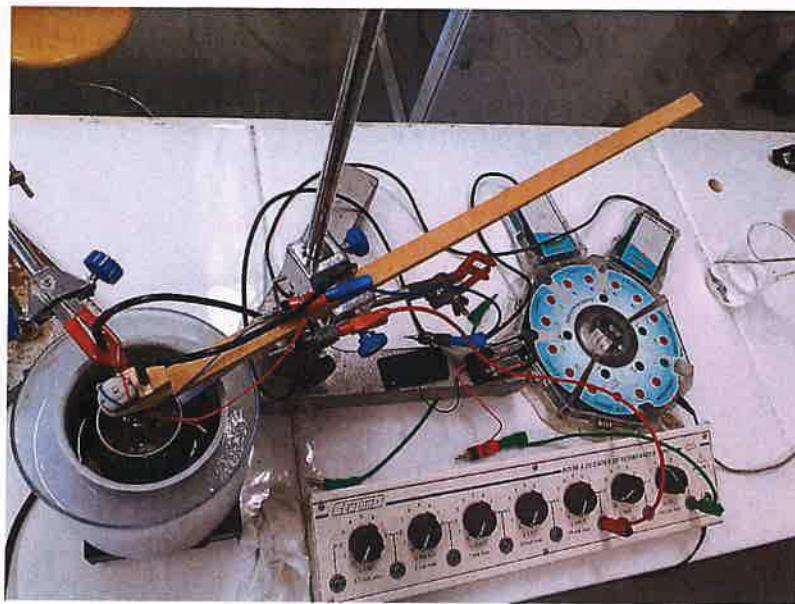


FIGURE 11 – expérience de refroidissement d'une canette avec un absorbeur

Nous obtenons les courbes de températures suivantes (figure 13) qui montrent l'effet positif de l'absorbeur sur le refroidissement, d'autant que dans le cas de l'expérience avec absorbeur la température initiale de la canette est supérieure de 3 °C à la température initiale de la canette de l'expérience sans absorbeur.

L'effet de l'absorbeur se manifeste au niveau de la pente de la courbe. Alors que la pente diminue au cours du temps dans l'expérience sans absorbeur, elle reste sensiblement constante au début de l'expérience avec absorbeur.

Nous notons au passage l'apparition d'un phénomène de surfusion dans l'expérience réalisée avec absorbeur.

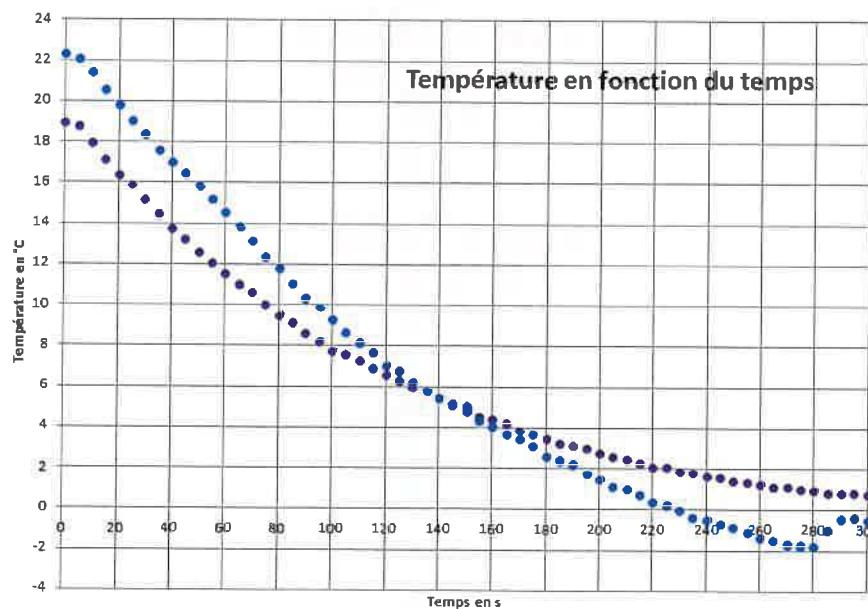


FIGURE 12 – Evolution de la température de la canette avec et sans absorbeur

L'effet de l'absorbeur est confirmé par la courbe montrant l'évolution de la température du réfrigérant en fonction du temps (figure 13) : l'absorbeur limite le réchauffement du réfrigérant.

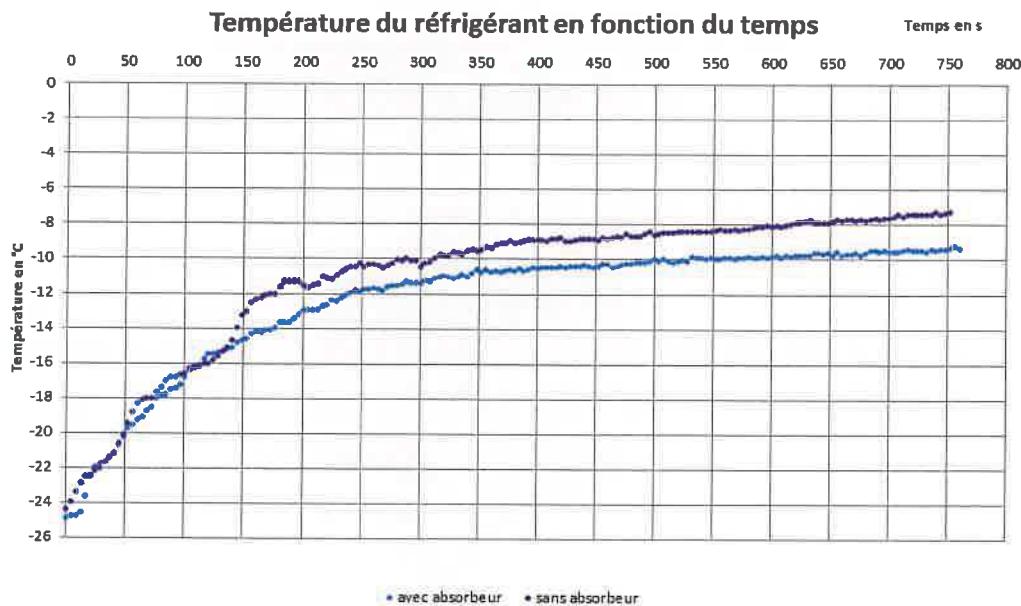


FIGURE 13 – Evolution de la température du réfrigérant avec et sans absorbeur

Une amélioration du prototype consisterait à introduire dans le réfrigérant des absorbeurs de chaleur de façon à limiter le réchauffement du réfrigérant. Il resterait à optimiser le fonctionnement de ces absorbeurs. Il pourrait être intéressant d'étudier l'influence du pourcentage massique d'éthanol sur l'efficacité des absorbeurs, de la position et du nombre d'absorbeurs dans le dispositif.

5 Conclusion

Nous nous étions lancés comme défi de refroidir une canette en moins de 3 minutes. Ce défi nous a conduit sur le chemin de la physique des transferts thermiques dont nous avons pu améliorer notre compréhension et observer des phénomènes physiques surprenant comme le phénomène de surfusion. Nous avons mis au point une solution de réfrigération simple et efficace, qui met en jeu une puissance thermique élevée et qui pourrait trouver des applications dans les besoins de réfrigération rapides.

Le défi nous a également permis de faire preuve d'imagination afin de développer un prototype qui pourrait être utilisé au quotidien. Ainsi, le principe pourrait être intégré aux futurs réfrigérateurs ou mis à profit dans les distributeurs de boissons réfrigérées qui, plutôt que de refroidir un ensemble de canettes, se limiteraient à refroidir l'équivalent du volume d'une canette. Cela représenterait un gain énergétique substantiel compte-tenu des enjeux énergétiques et écologiques actuels.

Notons pour finir que le sujet sur lequel nous avons travaillé est brûlant d'actualité. En effet, en janvier 2020, au CES (Consumer Electronics Show) de Las Vegas la société Matrix proposait un produit innovant pour refroidir des boissons. La solution proposée est similaire à la solution que nous avons trouvée. La différence réside dans la production de froid initial par effet Peltier. Nous proposons un produit meilleur marché et qui utilise une innovation : l'absorbeur de chaleur.

Remerciements

Nous remercions vivement M.Nicolle (Directeur Agile@RD Paris-Saclay Ecosystème) et son équipe dont C. Delbos (Responsable Méthodes Agiles) pour avoir pris le temps de nous recevoir à plusieurs reprises sur le site de Air Liquide (Jouy en Josas, Yvelines) et pour les échanges fructueux que nous avons eus ensemble. Nous remercions également Gael Vallery de l'IUT de Mantes pour l'aide précieuse qu'il nous a apporté dans la réalisation du prototype. Nous remercions enfin nos professeurs M. Jouan et M. Chriqui pour nous avoir guidés dans la réalisation de ce projet.

Références

- [1] https://wiki.scienceamusante.net/index.php?title=M%C3%A9langes_r%C3%A9frig%C3%A9rants
- [2] https://fr.wikipedia.org/wiki/Solidification_fractionn%C3%A9e

6 Annexe 1 : Caractéristiques d'une canette

Il existe deux types de canettes en acier et en aluminium. Nous avons expérimenté sur des canettes en aluminium.

6.1 Dimensions et masse d'une canette

hauteur × diamètre	11,6 cm × 6,6 cm
épaisseur	73 µm
masse	16 g

TABLEAU 2 – Dimensions d'une canette.

6.2 Caractéristiques thermiques d'une canette

Capacité thermique La capacité thermique des parois de la canette a été mesurée par la méthode des mélanges. Nous avons mesuré :

$$C_c = 75 \text{ kJ K}^{-1}$$

soit une masse en eau équivalente de 18 g.

Conductivité thermique Nous avons essayé de mesurer au banc de mesure thermique la résistance thermique R_{th} d'un échantillon de surface $S = 16 \text{ cm}^2$ et d'épaisseur $e = 73 \mu\text{m}$ de canette pour en déduire la conductivité thermique du matériau constituant la paroi de la canette :

$$\lambda = \frac{e}{R_{th} \times S}$$

Malheureusement, l'épaisseur de la canette est trop faible pour faire la mesure. A titre d'information, la conductivité thermique de l'aluminium est de $\lambda = 185 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$. La canette est en aluminium mais la paroi est couverte d'un revêtement qui modifie cette valeur.

7 Annexe 2 : la loi de Newton

Dans cette annexe nous cherchons à valider la loi de Newton :

$$P = h \times S \times (T_{\text{réfrigérant}} - T_{\text{canette}})$$

Nous réalisons l'expérience suivante.

La canette est plongée (à la date $t = 0$) dans un volume $V = 480 \text{ mL}$ de réfrigérant à -28°C . L'intérieur de la canette et le réfrigérant sont agités. Les températures de la canette et du réfrigérant sont mesurées au cours du temps à l'aide d'un système d'acquisition.

Nous obtenons les courbes de température suivantes (figure 14).

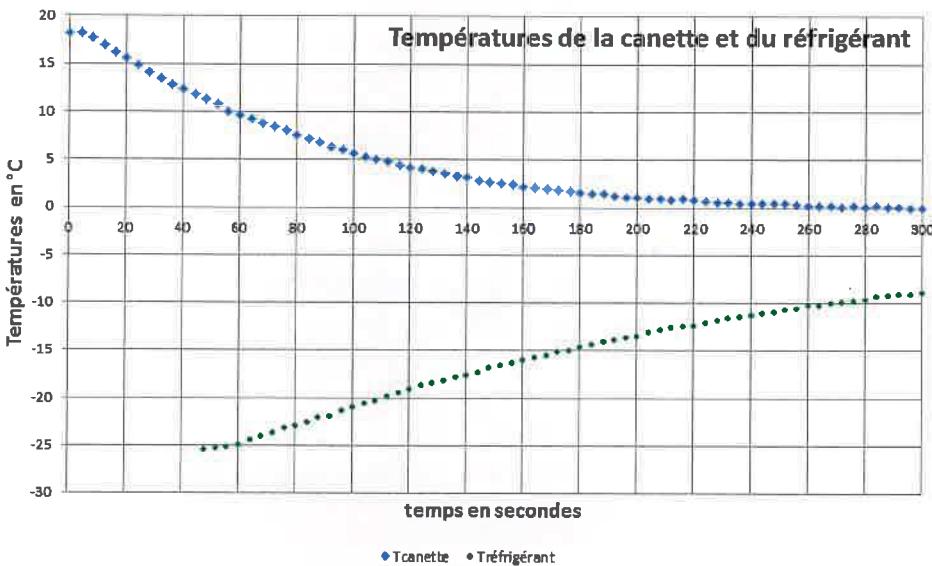


FIGURE 14 – température de la canette et du réfrigérant en fonction du temps

L'exploitation de la courbe de température de la canette nous a permis de tracer l'évolution de la puissance thermique prélevée à la canette en fonction du temps.

En effet, la puissance thermique se calcule par la relation :

$$P = C \times \frac{dT_{\text{canette}}}{dt} \quad (6)$$

où C est la capacité thermique de la canette (contenu + paroi) et $\frac{dT_{\text{canette}}}{dt}$ la dérivée de la température en fonction du temps que nous évaluons à partir de nos mesures.

Cette formule suppose que la température de la canette soit homogène, raison pour laquelle nous agitons l'intérieur de la canette.

Nous obtenons la courbe de puissance thermique suivante (figure 15) où $P < 0$ car la canette cède de la chaleur au réfrigérant.

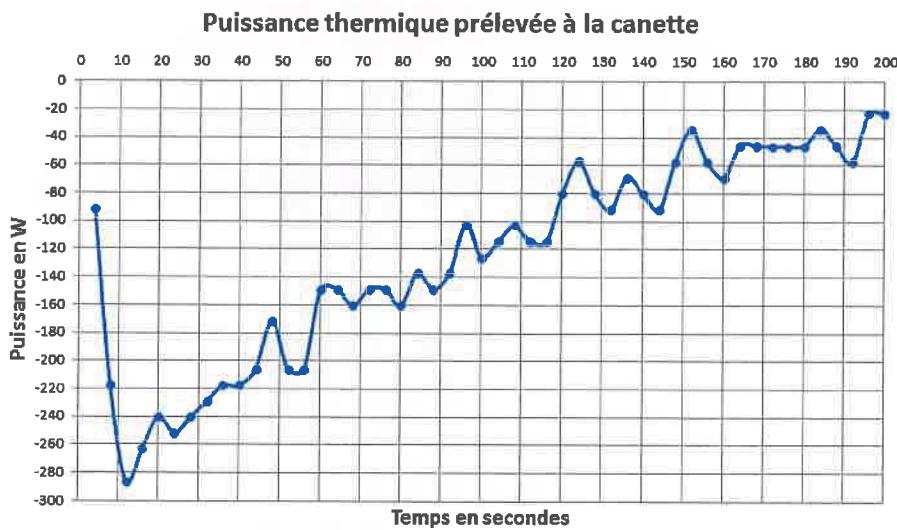


FIGURE 15 – Puissance prélevée à la canette en fonction du temps

La courbe met en évidence une puissance maximale de réfrigération de 300 W !

Pour finir nous traçons la courbe représentant l'évolution de la puissance thermique prélevée à la canette en fonction de la différence de températures $T_{\text{réfrigérant}} - T_{\text{canette}} < 0$ afin de vérifier la loi de Newton :

$$P = h \times S \times (T_{\text{réfrigérant}} - T_{\text{canette}})$$

Nous obtenons alors la courbe suivante (figure 16).

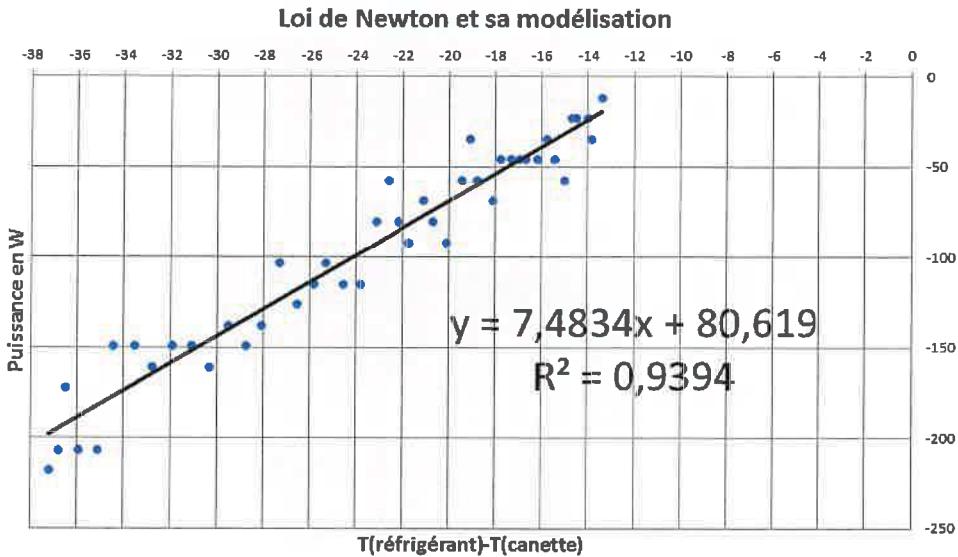


FIGURE 16 – Puissance prélevée à la canette en fonction de la différence de températures Tréfrigérant - Tcanette

Nous obtenons bien une droite mais dont l'ordonnée à l'origine non nulle est en désaccord avec la loi de Newton.

Comment expliquer cet écart ? Une ordonnée à l'origine positive correspond à un apport de chaleur à la canette.

Nous avons d'abord pensé à l'influence de l'air ambiant qui fournit de la chaleur à la canette lors du processus de refroidissement. Nous avons donc refait l'expérience avec une canette munie d'un couvercle de façon à limiter les échanges avec l'air ambiant. L'ordonnée à l'origine reste positive et d'une valeur comparable à celle trouvée précédemment.

La solution au problème vient de la solidification qui libère de la chaleur dans la canette. Proche de la paroi interne, il existe une couche limite de vitesse dans laquelle la vitesse du fluide décroît jusqu'à s'annuler au contact de la paroi. Au niveau de la paroi, l'eau gèle malgré l'agitation de l'intérieur de la canette. Il faudrait donc écrire le bilan énergétique de la canette et son contenu sous la forme :

$$C \times \frac{dT_{\text{canette}}}{dt} = h \times S \times (T_{\text{réfrigérant}} - T_{\text{canette}}) + \frac{\delta m}{\delta t} \times L_{\text{fusion}} \quad (7)$$

où $L_{\text{fusion}} = 333 \text{ kJ kg}^{-1}$ est le transfert thermique nécessaire pour provoquer la fusion d'1 kg d'eau (c'est aussi la chaleur libérée par la solidification d'1 kg d'eau) et $\frac{\delta m}{\delta t}$ le taux de production de glace au niveau des parois que l'on peut évaluer grâce

à l'ordonnée à l'origine :

$$\frac{\delta m}{dt} = 0,24 \text{ g s}^{-1}$$

Cette hypothèse est confirmée par l'observation expérimentale d'une couche de glace à l'intérieur de la canette au niveau des parois en fin d'expérience.

Ce phénomène pourrait être mis à profit pour garder le contenu de la canette froid plus longtemps.