

CONCOURS
Lycée **CGÉNIAL**

2024-2025

Sciences à l'École



FONDATION
CGÉNIAL

IN-FROID-ROUGE



Victoire BAUDOIN
Quentin GASTALDI
Maxime JOULAIN
Félicie LANGERON

Sous la direction de
Hervé IDDA et Olivier POLIDORO
Lycée Vauvenargues - Aix en Provence
Académie d'Aix -Marseille

Sommaire

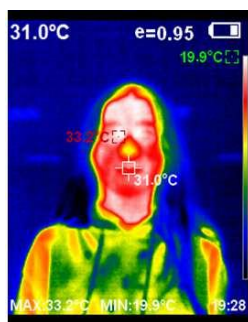
INTRODUCTION	1
I. EXPÉRIENCE DE FÉLIX TROMBE ET RAYONNEMENT	1
1. Reproduction de l'expérience	1
2. Découverte des Infrarouges	2
3. La caméra thermique	3
4. La théorie du rayonnement	4
II. NOTRE RÉFRIGÉRATEUR	5
1. Refroidir spontanément sur Terre : Pas si simple !.....	5
2. Les hypothèses	5
3. Limiter les transferts par les bords.....	6
4. Laisser passer les Infrarouges	8
5. Notre corps froid.....	9
III. NOTRE EXPÉRIENCE EN LABORATOIRE	10
1. Première expérience.....	10
2. Un peu de théorie.....	11
3. Une piste d'amélioration.....	12
4. Deuxième expérience.....	13
5. Retour sur la théorie.....	13
IV. ET SI ON SE TROMPAIT !	15
1. Création des boîtes tests.....	16
2. Refroidir par convection forcée, est-ce possible ?.....	16
3. La fenêtre infrarouge, vraiment indispensable ?.....	17
4. L'évaporation, une cause de refroidissement ?.....	18
CONCLUSION	18
REMERCIEMENTS	19

INTRODUCTION

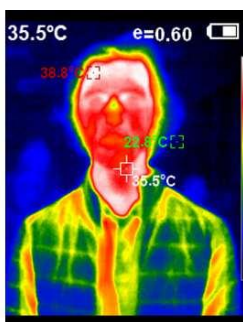
Nous sommes quatre élèves de terminale : Victoire, Quentin, Maxime et Félicie. Et nous avons voulu étudier le refroidissement radiatif. Autrement dit, la possibilité de refroidir un système sans dépenser d'énergie à l'inverse des réfrigérateurs et autres climatiseurs.

Ce projet constitue la suite du travail débuté l'année dernière par la team « Infroilympiades ».

La team « Infroilympiades » au complet (2023-2024 et 2024-2025) !



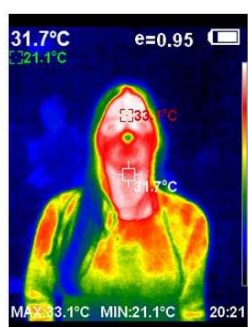
Victoire



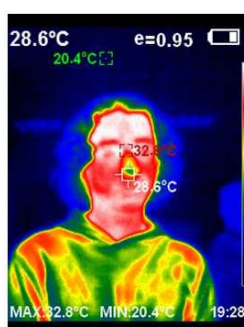
Quentin



Maxime



Félicie



Yoan



Chiara

À l'origine de cette aventure, nous sommes tombés sur un document dans lequel il y avait le nom de Félix TROMBE (19 mars 1906 - 26 mars 1985) chimiste, physicien et même spéléologue, comptant dans ses hauts faits la création de fours solaires à Mont-Louis et à Font-Romeu.

Celui-ci comportait la présentation d'une intrigante boîte qui pouvait avoir une température intérieure beaucoup plus basse que la température extérieure sans aucun apport d'énergie, simplement en la laissant sous le ciel nocturne.

Bien sûr il existe sur internet des milliers de vidéo de pseudo-scientifiques affirmant avoir trouvé le mouvement perpétuel, ou comment produire une énergie infinie avec deux aimants et un engrenage.

Cependant Félix TROMBE est un physicien de renom ainsi nous avons creusé un peu plus...

<https://www.batiactu.com/edito/qui-etait-felix-trombe-55782.php>



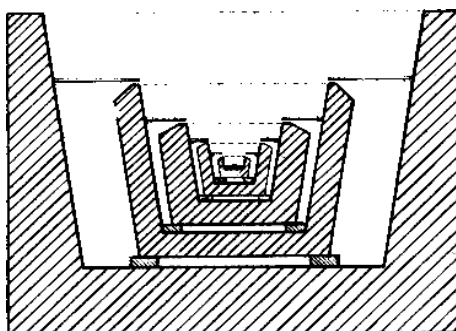
Félix TROMBE

© René Gahet - CNRS Photothèque

I. EXPÉRIENCE DE FÉLIX TROMBE ET RAYONNEMENT

1. REPRODUCTION DE L'EXPÉRIENCE

En cherchant sur le net nous avons trouvé quelques schémas de la boîte de Félix TROMBE, permettant d'atteindre un extraordinaire 35 degrés de différence avec le milieu extérieur.



Coupe du radiateur terrestre à cinq boîtes-gigogne qui permet des écarts de 35° avec l'extérieur.

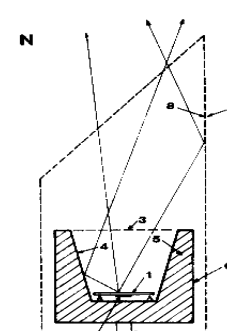


Schéma d'un « radiateur terrestre ». 1 : plaque rayonnante d'alu oxydé, 2 : thermocouple pour mesurer la température, 3 : couvercle de polyéthylène, 4 et 5 : surface réfléchissante infra-rouges, 6 : mousse isolante, 7 : peinture sélective réfléchissant le rayonnement solaire.

<http://depris.cephes.free.fr/presscom/2002/021-02.htm>

Nous nous sommes donc immédiatement lancés dans une reproduction approximative afin de déterminer si cela fonctionne vraiment !

Nous avons réalisé trois boîtes gigognes composées de plaques de polystyrène pour l'isolant, de couverture de survie pour la réflexion du rayonnement et de film polyéthylène pour le couvercle (film alimentaire).



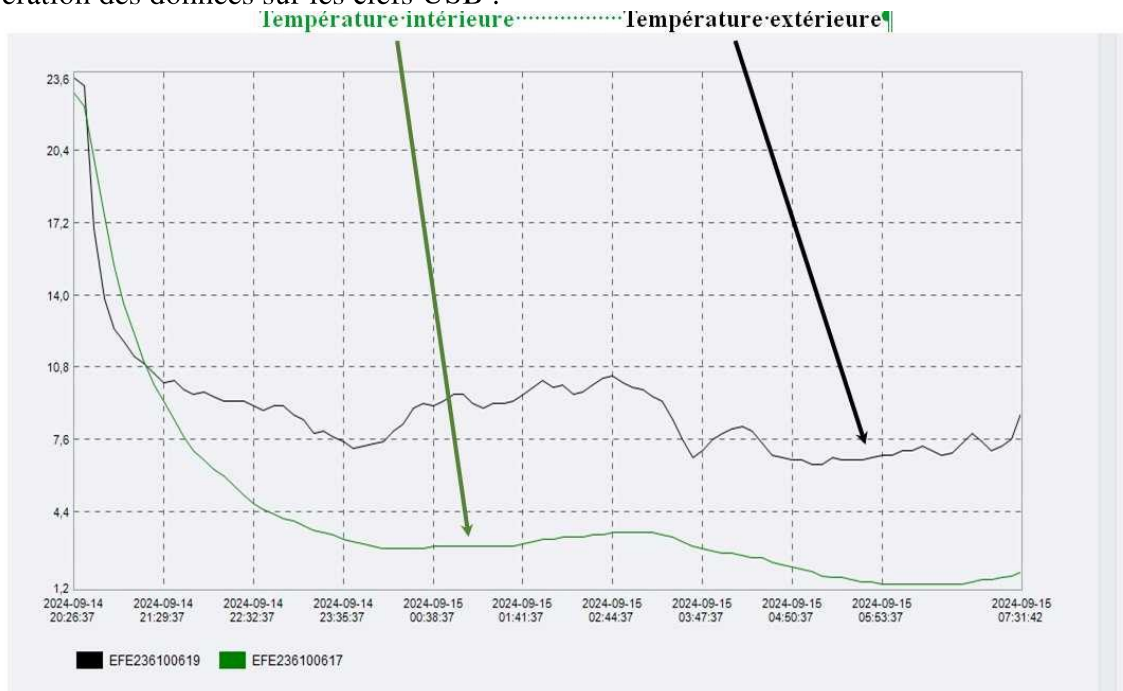
Pour la mesure de température nous avons opté pour des thermomètres « data logger » qui enregistrent les températures directement sur une clef USB que l'on peut lire avec le logiciel du fabricant. Ces thermomètres sont utilisés pour contrôler la chaîne du froid pour les poches de sang par exemple.

Un thermomètre dans la plus petite boîte au milieu pour la température intérieure et un autre sur le dessus pour la température extérieure.



Direction la nuit étoilée sur le toit de la maison

Après récupération des données sur les clefs USB :



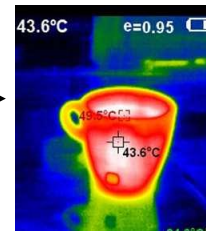
Conclusion : Nous observons que la température à l'intérieur de la boîte est plus froide, l'écart peut atteindre jusqu'à 6 degrés, alors bien sûr on est loin des 35 degrés mais l'effet existe bel et bien !

Problématique :

D'après Félix TROMBE, c'est le rayonnement qui est à l'origine de phénomène. Peut-on reproduire l'expérience en laboratoire et la modéliser ?

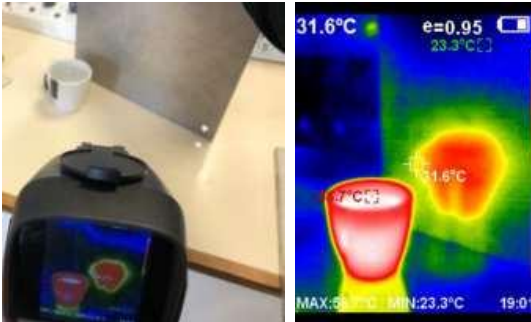
2. DÉCOUVERTE DES INFRAROUGES

Tasse avec de l'eau chaude →



On peut voir que la caméra nous montre la température la plus élevée et la température la plus basse. On peut voir aussi la réflexion de la tasse sur la table en effet, les infrarouges peuvent se réfléchir sur certains matériaux.

Tasse avec une plaque d'aluminium derrière



Tasse avec une plaque de plexiglass derrière

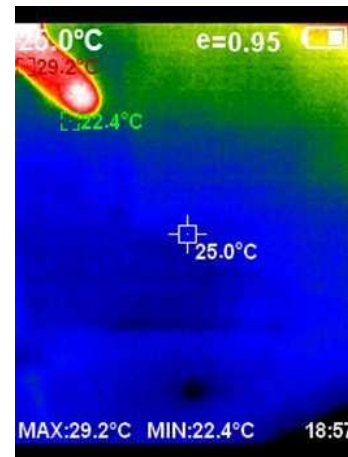
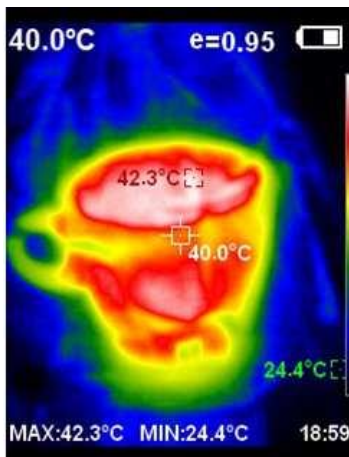


Nous voyons ici que la plaque d'aluminium reflète fortement la lumière de la tasse contrairement au plexiglass

Tasse dans un sac poubelle



Tasse devant une plaque de plexiglass



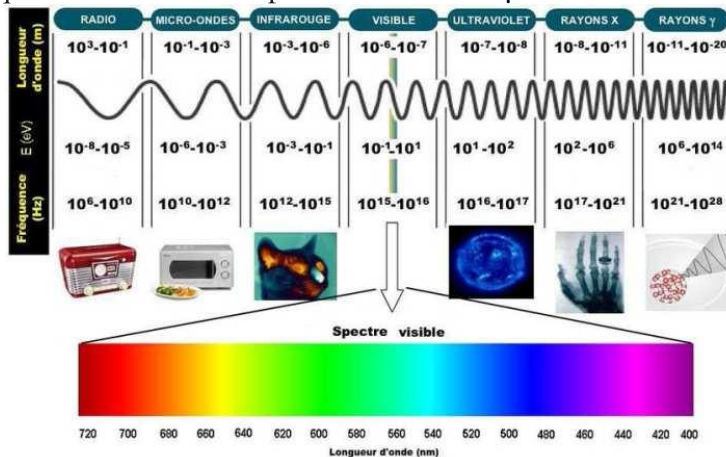
Ici ce qui est intéressant à observer, c'est que le sac poubelle en polyéthylène est opaque aux rayons visibles et transparent aux infrarouges. Par contre c'est l'inverse pour la plaque de plexiglass !

Conclusion : On a découvert que tous les corps émettaient de la lumière (ou de l'énergie). Cette lumière est uniquement visible par la caméra thermique et pas par nos yeux.

→ Le rayonnement Infrarouge (I.R.)

3. LA CAMÉRA THERMIQUE

Les capteurs des caméras thermiques sont composés de milliers de pixels mesurant l'énergie thermique, qu'ils convertissent en image. La gamme des longueurs d'ondes des rayonnements infrarouges utilisée par les caméras thermiques est souvent comprise entre 2 et 15 μm . Précisément ce que l'on appelle le rayonnement **Infrarouge**.



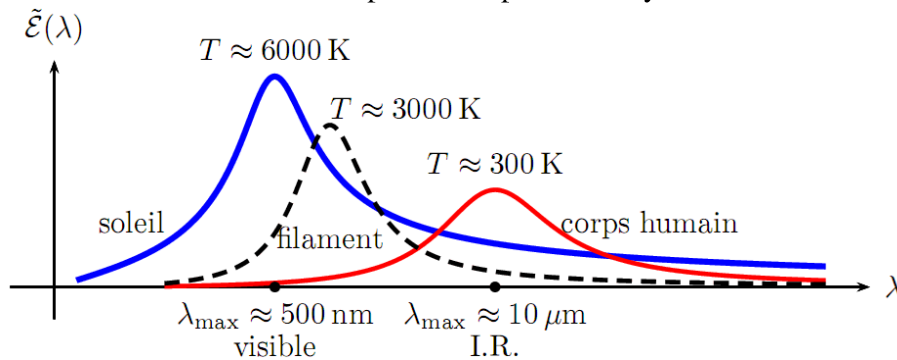
Xintest Thermal Imaging Camera HT-18

Le spectre des ondes électromagnétiques

<https://www.cem-vivant.com/page-2-caracteristiques,177.html>

4. LA THÉORIE DU RAYONNEMENT

Tout corps chaud émet de la lumière. Pour un corps noir, le profil de rayonnement est le suivant :



- **Le corps noir**

Un corps noir est un corps, ou autrement dit un objet idéal qui absorbe tout, absolument toute l'énergie électromagnétique, en d'autres termes toute la lumière quel que soit sa longueur d'onde (pas de réflexion ni de transmission). Or, l'absorption de cette lumière crée une agitation thermique des molécules qui provoque alors l'émission de rayonnement thermique. (Aussi nommé rayonnement du corps noir).

- **Loi de déplacement de Wien**

La longueur d'onde λ_{max} , correspondant au pic d'émission lumineuse du corps noir, et la température T sont liées par la relation :

$$\lambda_{\text{max}} \times T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$$

\Rightarrow À 300 K : $\lambda_{\text{max}} \sim 10 \mu\text{m} \rightarrow$ Infrarouge

- **Loi de Stefan**

La puissance surfacique émise par un corps noir est fonction de sa température suivant la loi :

$$\Phi_{\text{ray}} = \sigma \cdot T^4 \text{ en W.m}^{-2}$$

Où $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan - Boltzmann

II. NOTRE RÉFRIGÉRATEUR

1. REFROIDIR SPONTANÉMENT SUR TERRE : PAS SI SIMPLE !

Tous corps chaud émet de la lumière, et pourtant nous ne refroidissons pas sur Terre. Pourquoi ?

• Modes de transferts thermiques

Deux corps différents de températures T_1 et $T_2 < T_1$ échangent de l'énergie dans le sens $1 \rightarrow 2$ sous la forme d'un transfert thermique. On distingue trois modes de transfert thermique :

① Par conduction : Échange d'énergie microscopique (via les chocs entre les molécules) sans mouvement macroscopique. On parle alors de diffusion thermique.

② Par convection : Ce mode nécessite le mouvement macroscopique d'un fluide qui permet d'accélérer le processus précédent qui n'est pas efficace à grande échelle.

③ Par rayonnement : Les charges qui constituent la matière au niveau microscopique sont accélérées (agitation thermique) et rayonnent un champ électromagnétique qui transporte de l'énergie à grande distance. Ce mode de transfert, contrairement aux précédents, ne nécessite aucun support matériel.

Conclusion : Les échanges réciproques entre les objets mène à une uniformisation des températures. On parle d'équilibre thermodynamique.

• Problématique : Est-il possible de forcer le refroidissement ?

2. LES HYPOTHÈSES

Contrairement à l'équilibre thermodynamique naturel sur Terre, nous cherchons à créer un déséquilibre des températures entre notre réfrigérateur et l'extérieur.

Comment expliquer simplement le fonctionnement de l'expérience de Félix TROMBE ?

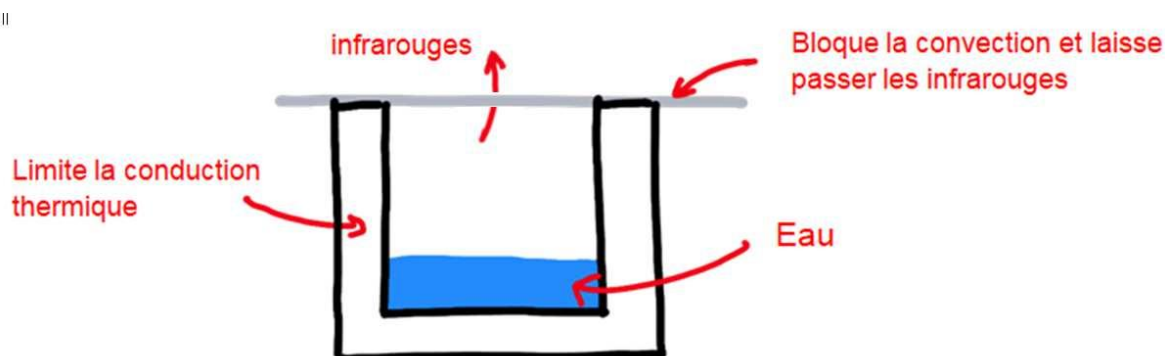
Nos hypothèses sont :

- Il faut utiliser une boîte thermiquement isolée pour diminuer les transferts thermiques avec l'extérieur
- Permettre au rayonnement infrarouge de sortir de la boîte.
- Limiter au maximum de recevoir un rayonnement extérieur.

Pour cela, il faut mettre en place une structure bien spécifique à nos attentes pour notre réfrigérateur avec des matériaux ayant les caractéristiques convenables.

Pour résumer : Pour forcer le refroidissement, il faut :

- ① Limiter au maximum la conduction thermique par les parois
- ② Trouver un « couvercle » transparent aux infrarouges pour laisser passer le rayonnement tout en limitant la convection thermique
- ③ Limiter les infrarouges entrants en orientant la fenêtre de notre dispositif vers un corps froid



• Comment résoudre l'ensemble de ces contraintes ?

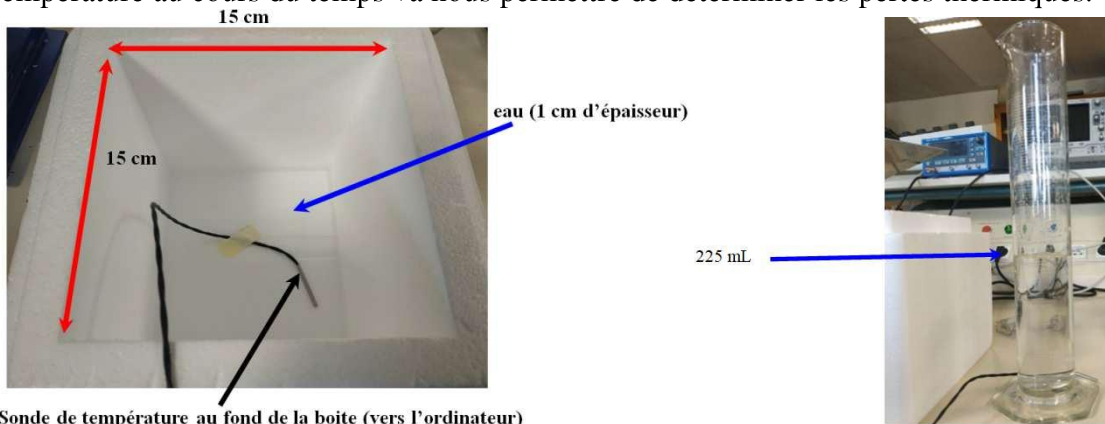
3. LIMITER LES TRANSFERTS PAR LES BORDS

Tout d'abord, pour freiner les transferts thermiques, il est nécessaire de constituer notre récipient de bordsisolants. Un des matériaux respectant suffisamment cette condition semble être le polystyrène bien connu pour l'isolation thermique.

Pour vérifier cette condition, nous avons procédé à l'étude des pertes thermiques d'une boîte en polystyrène.

- **Étude expérimentale des pertes thermiques de notre boîte**

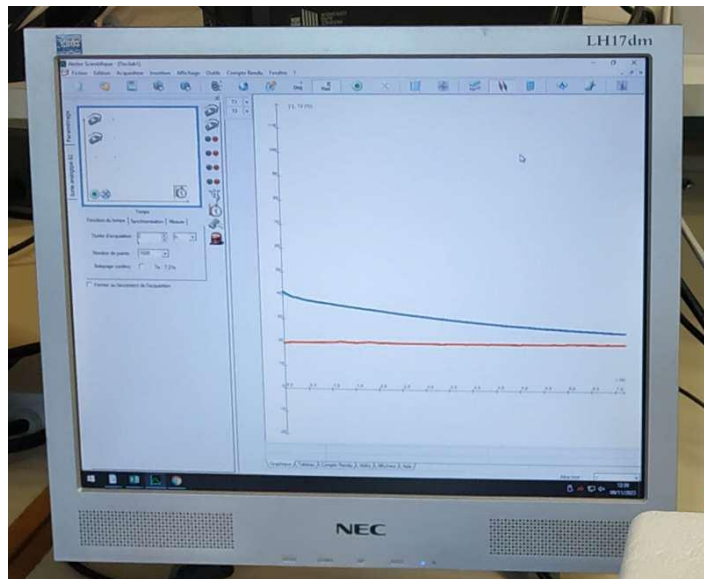
- **Le montage :** On utilise une boîte en polystyrène dans laquelle on met de l'eau chaude. La mesure de la variation de température au cours du temps va nous permettre de déterminer les pertes thermiques.



Sonde de température au fond de la boîte (vers l'ordinateur)

Pour avoir 1 cm d'épaisseur, vu la surface interne de la boîte ($15 \times 15 = 225 \text{ cm}^2$), il faut 225 mL d'eau.

- **Les résultats :**



Courbes obtenues sur le logiciel « L'atelier Scientifique »

Sans surprises, la température de l'eau chaude baisse au cours du temps !

On a enregistré les données dans un fichier sous cette forme :

(1100 points de mesure) \Rightarrow temps(s) ; température ext ($^{\circ}\text{C}$) ; température eau ($^{\circ}\text{C}$)

0;19.769;41.553
7.219;19.745;41.468
14.422;19.757;41.443
21.625;19.805;41.322
28.844;19.865;41.236
36.047;19.889;41.139

..... etc...

On a ensuite utilisé ces données dans un programme python pour faire un graphe représentant l'évolution des températures. On a également cherché l'équation de la droite de la température de l'eau vers la fin, pour essayer de quantifier les pertes d'énergie.

- Exploitation :

Si on relie la baisse de température de l'eau à la puissance thermique perdue, vient l'équation suivante :

$$\overbrace{mcdT = -P_{th} dt}^{\text{Pertes d'énergie de l'eau} \Rightarrow \text{baisse de température}} \quad \overbrace{\hspace{10em}}^{\text{la puissance thermique perdue}}$$

Pertes d'énergie de l'eau \Rightarrow baisse de température

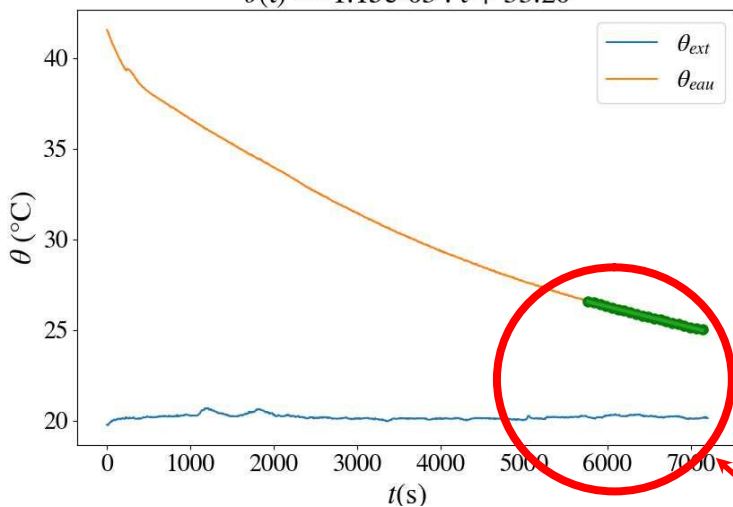
la puissance thermique perdue

En se plaçant dans un petit domaine temporel, la décroissance de température s'approxime par une droite de pente :

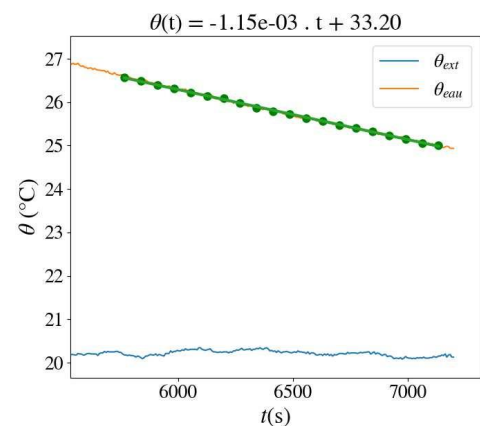
$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{P_{th}}{mc} \rightarrow \text{pente de la droite}$$

Il est possible de déterminer l'équation de cette droite sous la forme $T(t) = a \times t + b$ avec python.

$$\theta(t) = -1.15e-03 \cdot t + 33.20$$



Évolution des températures en fonction du temps



$$\theta(t) = -1,15 \cdot 10^{-3} \times t + 33,20$$

Nous avons déterminé l'équation de la droite dans la zone où l'écart de température est de l'ordre de 5°C.

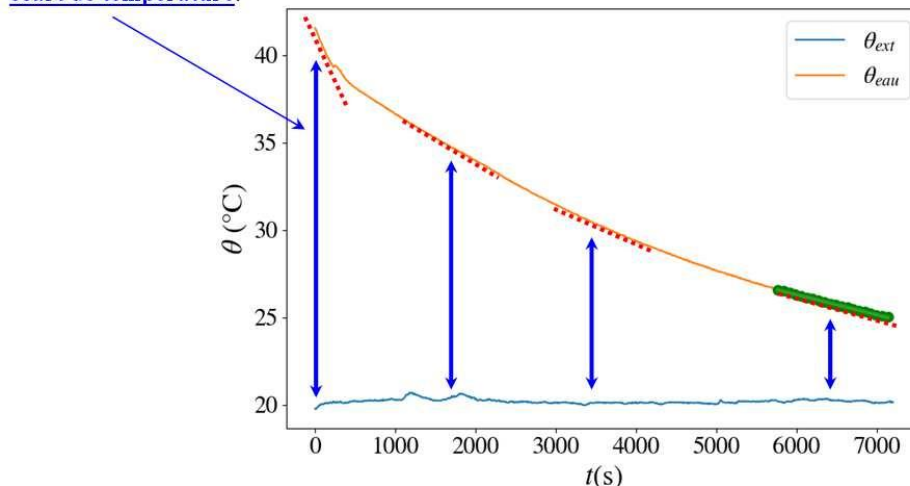
La pente est donc : $-\frac{P_{th}}{mc} = -1,15 \cdot 10^{-3} \text{ °C/s (ou K.s}^{-1}\text{)}$

Avec la masse d'eau $m = 0,225 \text{ kg}$ et la capacité thermique de l'eau $c = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J.K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, on trouve :

$$P_{th} = 1,08 \text{ W}$$

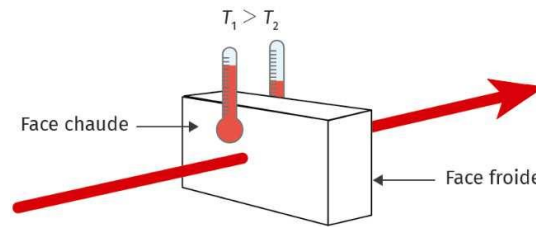
- « Coefficient » de la boîte :

Quand on observe la courbe, on remarque que la température baisse plus rapidement quand il y a un grand écart de température.



Le pente est de plus en plus faible

La théorie sur les transferts thermiques indique que la puissance transmise par la paroi est proportionnelle à la différence de température :



Cette loi a la même forme que la loi d'Ohm vu en électricité ($U = R.I$) :

$$\Delta T = R_{th} \cdot P_{th} \Leftrightarrow T_1 - T_2 = R_{th} \cdot P_{th}$$

Où R_{th} est appelé résistance thermique en $K.W^{-1}$

En considérant que la puissance échangée avec l'extérieur est proportionnelle à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur ($\Delta T = 5^\circ C$), on arrive à déterminer le « coefficient » de notre boîte.

$$P_{th} = K \times \Delta T \Leftrightarrow K = \frac{P_{th}}{\Delta T} = 0,216 \text{ W/K (ou W/}^\circ C)$$

Résultats du programme :

Puissance thermique = 1.0826094238780082 W
 Coef de la boîte : 0.21652188477560164 W/K

- **Conclusion** : La puissance perdue de la boîte est proportionnelle à la température.

$$P_{th} = K \times \Delta T \text{ avec } K = 0,216 \text{ W/K}$$

Ces caractéristiques nous permettent par la suite de faire un bilan d'énergie de notre système...

4. LAISSER PASSER LES INFRAROUGES

- **Le « couvercle » :**

Pour évacuer les rayonnements de notre boîte, il est indispensable de laisser passer les infrarouges à travers l'une des surfaces de notre récipient : « le couvercle ». Il faut donc trouver un matériau qui laisse passer les rayons infrarouges.

Afin de vérifier le choix du film alimentaire, nous avons procédé à des expériences à l'aide de la caméra thermique pour étudier la transparence aux infrarouges de différents matériaux.

Parmi eux, deux se sont démarqués : le film alimentaire et le sac poubelle



La transparence du film alimentaire et du sac poubelle dans l'infrarouge

- **Conclusion** :

Le choix du film alimentaire est cohérent, en effet, celui-ci est transparent à la lumière visible et aux infrarouges.

5. NOTRE CORPS FROID

- À la recherche d'un corps froid naturel :

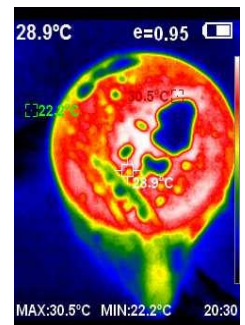
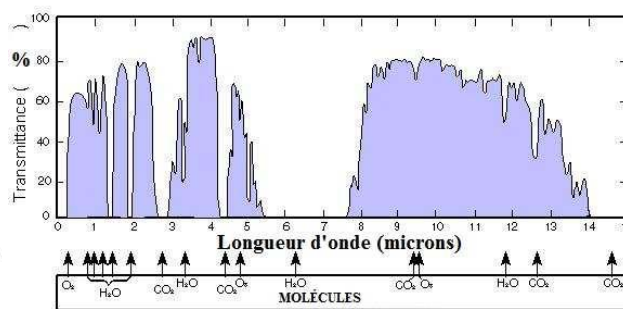
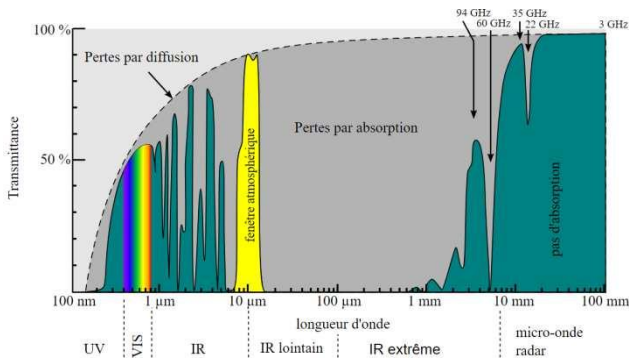
Le corps froid le plus naturel que l'on puisse avoir, c'est l'espace interstellaire qui est à 3 K environ. La location d'une fusée pour se rendre n'entrant pas dans notre budget, il nous reste malheureusement que le ciel nocturne avec son atmosphère. En pointant notre caméra thermique vers le ciel, nous observons que la caméra indique sa valeur minimale de fonctionnement, cela nous permet de vérifier notre hypothèse selon laquelle le ciel nocturne émet peu d'infrarouge thermique. Cependant cette atmosphère est variable pendant la nuit, température, humidité, couverture nuageuse donc une expérience ne serait pas reproductible.



Pour reproduire cet environnement, nous avons observé les infrarouges transmis par le ciel durant la nuit.



Vu du ciel la nuit et image de la caméra thermique pointant le ciel $\theta \approx -30^\circ\text{C}$ (limite inférieure de la caméra)
 → il semble que le ciel émet peu de rayonnement infrarouge



L'atmosphère possède une fenêtre de transparence autour de 10 μm (qui peut être fortement perturbée par la présence d'eau)

Source Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre_atmosph%C3%A9rique

- **Conclusion** : Pour l'expérience de Félix TROMBE, on comprend mieux pourquoi il faut pointer la boîte vers le ciel nocturne, qui représente une source à faible rayonnement infrarouge. Reste à réaliser pour notre expérience de laboratoire un ciel artificiel pour rendre l'expérience reproductible.

- Notre ciel « artificiel » :

Pour cet effet, nous avons mis en place une plaque de métal, très bon conducteur thermique, sur lequel repose un sac (poubelle) rempli de glaçons pour imiter la température surfacique du ciel.



Sac poubelle rempli de glaçons posé sur la plaque de métal pour simuler le ciel et vu du « ciel » avec la caméra thermique

- Conclusion :

Notre ciel artificiel n'a pas une température de surface uniforme d'après la caméra thermique (moyenne autour de 8 ~ 10°C). Toutefois, il va nous permettre de valider le concept de réfrigérateur.

- À noter :

Avec une meilleure répartition de la glace, il est possible de nettement améliorer l'uniformité de la température.

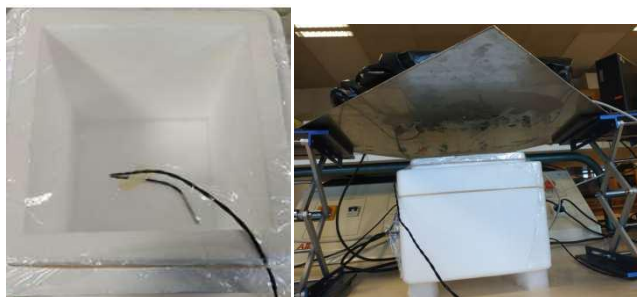
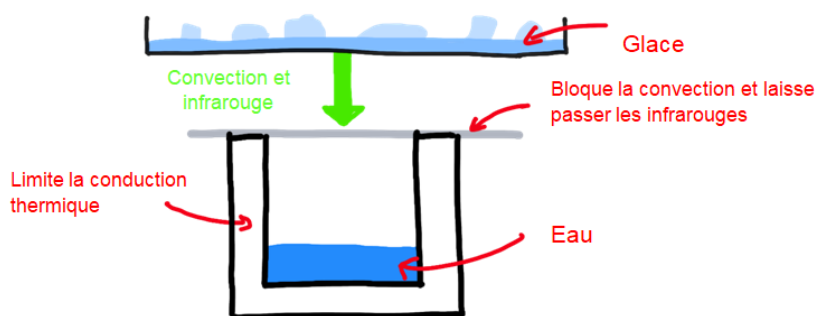


Une répartition plus homogène permet d'avoir un « ciel » autour de 3°C

III. NOTRE EXPÉRIENCE EN LABORATOIRE

1. PREMIÈRE EXPÉRIENCE

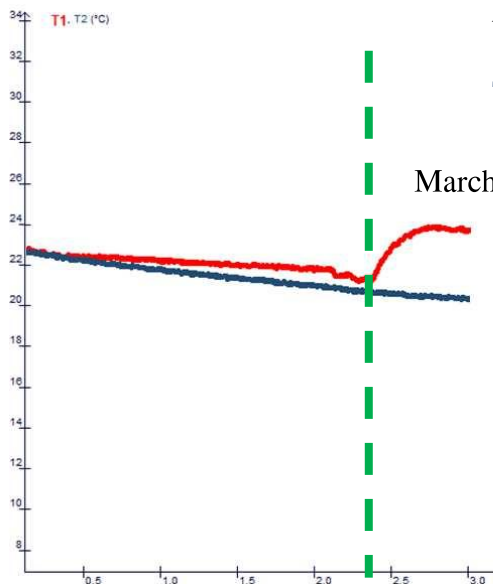
- Le montage



Le montage complet avec 225 mL d'eau sous le « ciel » artificiel à 8~10°C

On place un thermomètre au fond de la boîte et un thermomètre entre la boîte et le ciel artificiel (la glace).

- Premiers résultats



T1 : Température mesurée par le thermomètre entre la boîte et le ciel artificiel

T2 : Température mesurée dans la boîte

Marche du ventilateur



- Observations

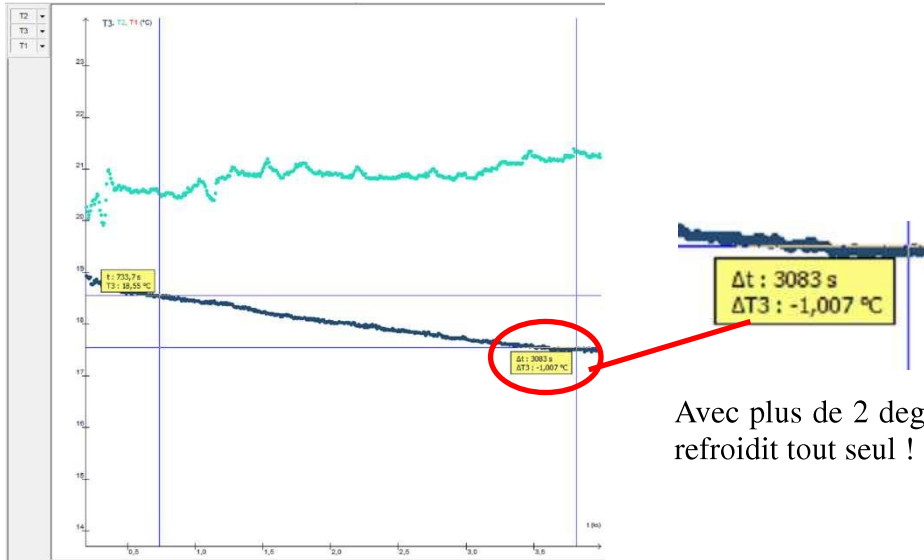
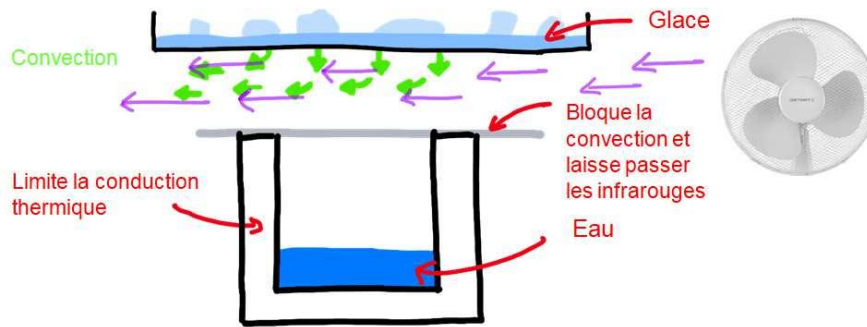
On constate au cours de cette première expérience le refroidissement de l'eau dans la boîte ainsi que de l'air au-dessus de celle-ci.

Contrairement à l'expérience en extérieur, la présence de notre ciel artificiel proche de la boîte implique le refroidissement de l'air environnant par convection naturelle...

Pour remédier à ce phénomène et garder une température extérieure constante, nous avons placé un ventilateur sur le côté afin de renouveler l'air. La courbe expérimentale, après avoir allumé le ventilateur, montre une température extérieure au niveau de la température ambiante et toujours un refroidissement de la boîte.

- Mesures avec ventilateur

Dans toute la suite, nous utiliserons le ventilateur afin de garder une température extérieure constante.



Avec plus de 2 degré Celsius de différence, notre corps se refroidit tout seul !

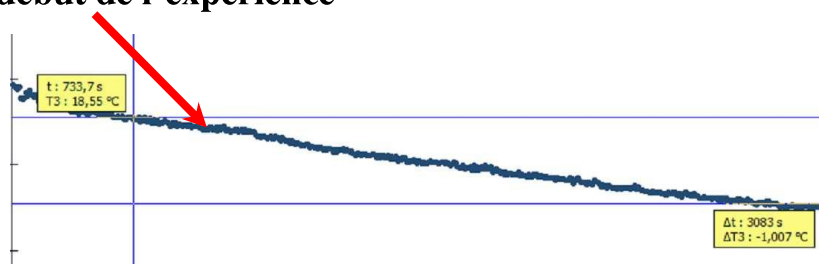
- **Conclusion** : La première expérience semble confirmer le refroidissement.

Sur notre enregistrement, on perd environ 1°C en 3000 s, soit une perte de $\frac{\Delta T}{\Delta t} \approx -3,3 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$

- La perte par unité de temps est-elle cohérente ?

2. UN PEU DE THÉORIE

- La pente au début de l'expérience



Si on relie la baisse de température de l'eau à toute la puissance thermique perdue, vient l'équation suivante dans l'hypothèse où l'eau comme le ciel artificiel se comportent comme des corps noirs :

$$mcdT = -P_{th} dt - \sigma (T^4 - T_{ciel}^4) S dt \quad \text{Avec } P_{th} = K(T - T_{ext})$$

$$mcdT = -K(T - T_{ext}) dt - \sigma (T^4 - T_{ciel}^4) S dt$$

Pertes d'énergie de l'eau

la puissance thermique perdue avec l'extérieur

Puissance échangée par rayonnement avec le ciel

Cette équation complexe se simplifie au début car $T \cong T_{ext}$: $mcdT = -\sigma (T^4 - T_{ciel}^4) S dt$

La décroissance de température s'approxime par une droite de pente :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{\sigma S}{mC} \left(T_{ext}^4 - T_{ciel}^4 \right) \rightarrow \text{pente de la droite au début de l'expérience}$$

Avec $m = 0,225 \text{ kg}$, $c = 4,18.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, $T_{ext} \simeq (21 + 273,15) \text{ K}$, $S = 0,15 \times 0,15 = 0,0225 \text{ m}^2$

Concernant le ciel, avec une moyenne autour de $8 \sim 10^\circ\text{C}$, la perte théorique est :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} \simeq 1,4.10^{-3} \text{ K.s}^{-1}$$

- **Conclusion** : Avec une perte expérimentale $\frac{\Delta T}{\Delta t} \simeq -3,3.10^{-4} \text{ K.s}^{-1}$, notre dispositif est 4 fois moins efficace par rapport à la théorie...

• **Comment améliorer le refroidissement ?**

3. UNE PISTE D'AMÉLIORATION

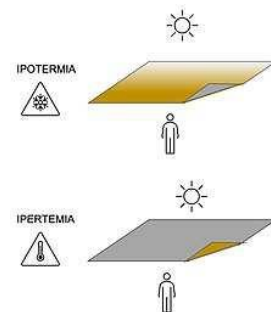
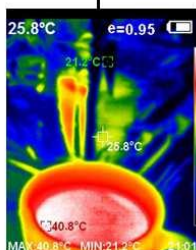
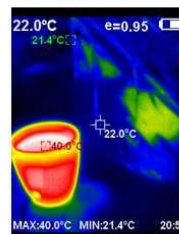


- **Idée** : On peut utiliser une couverture de survie. On a remarqué sur la notice d'utilisation que les deux côtés étaient utilisés pour différentes situations, donc on a testé nous même pour voir dans quel sens l'utiliser, pour un maximum d'efficacité.

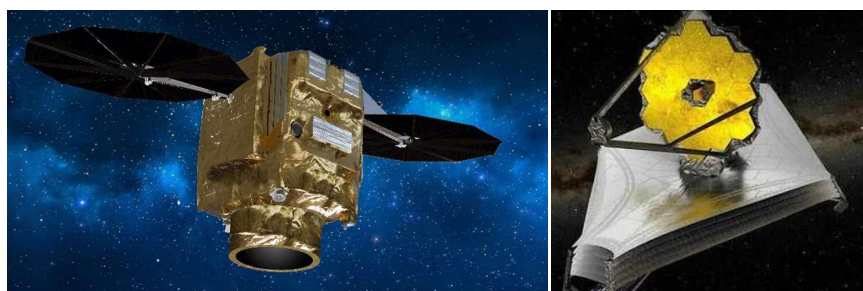
Réflexion côté doré



Réflexion côté argenté



Voici donc une inspiration pour notre futur boîte qui n'est autre que le réfrigérateur du futur !



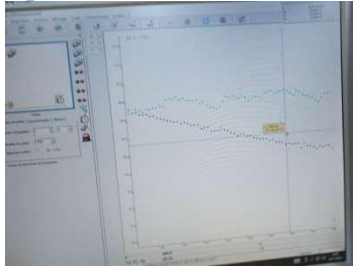
La couverture semble aussi utile pour protéger les satellites ou améliorer la réflexion du miroir primaire du James-Webb

4. DEUXIÈME EXPÉRIENCE

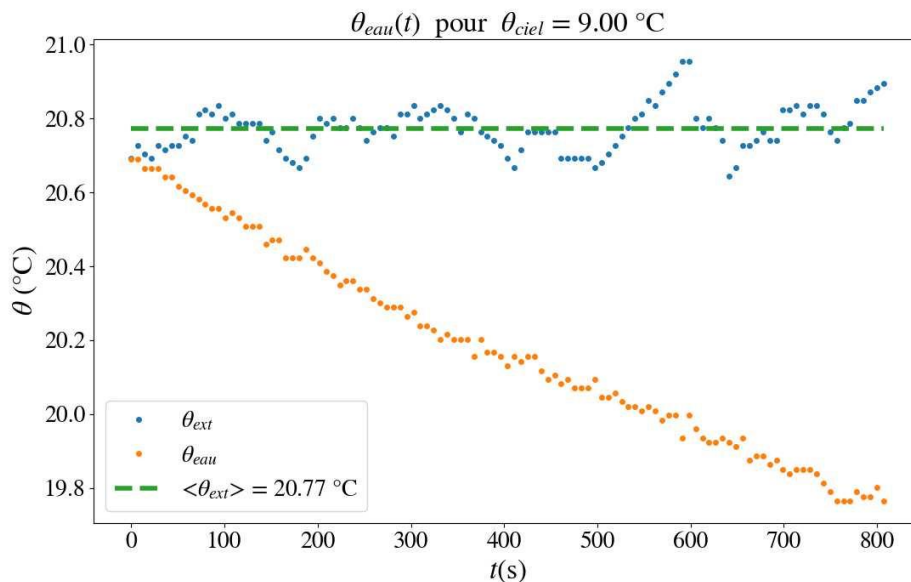
- L'ultime montage ?



Le prototype complet avec 225 mL d'eau testé en laboratoire sous le « ciel » artificiel à 8 ~ 10°C



Là, la température baisse plus vite...



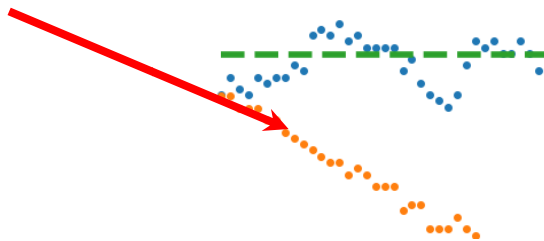
Les mesures tracées avec python

- **Conclusion** : La présence de la couverture de survie, côté doré, a permis un refroidissement plus rapide de notre eau.

- Peut-on justifier théoriquement nos résultats ?

5. RETOUR SUR LA THÉORIE

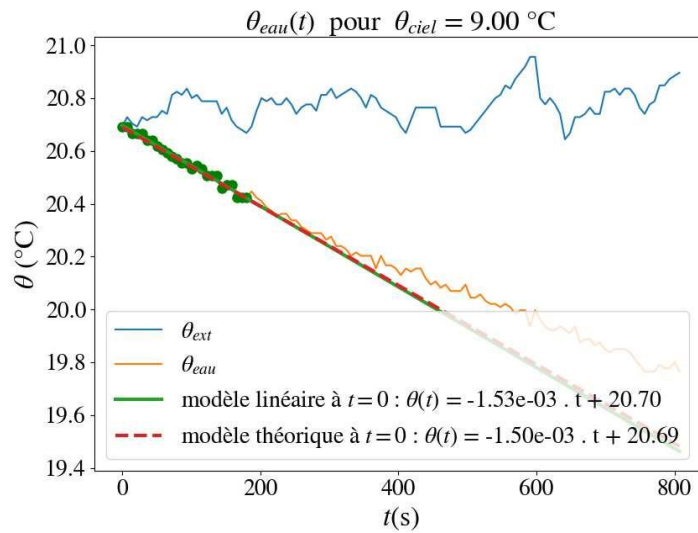
- La pente à l'origine



Comme vu précédemment, la décroissance de température s'approche par une droite de pente :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = -\frac{\sigma S}{mC} \left(T_{ext}^4 - T_{ciel}^4 \right) \rightarrow \text{pente de la droite au début de l'expérience}$$

Avec $m = 0,225 \text{ kg}$, $c = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, $T_{ext} = (20,77 + 273,15) \text{ K}$ et $S = 0,15 \times 0,15 = 0,0225 \text{ m}^2$



Comparaison des pentes théorique et expérimentale au début de l'expérience

- **Conclusion** : La pente au début de l'expérience est très proche de la théorie.

• **Et la fin de la courbe !**

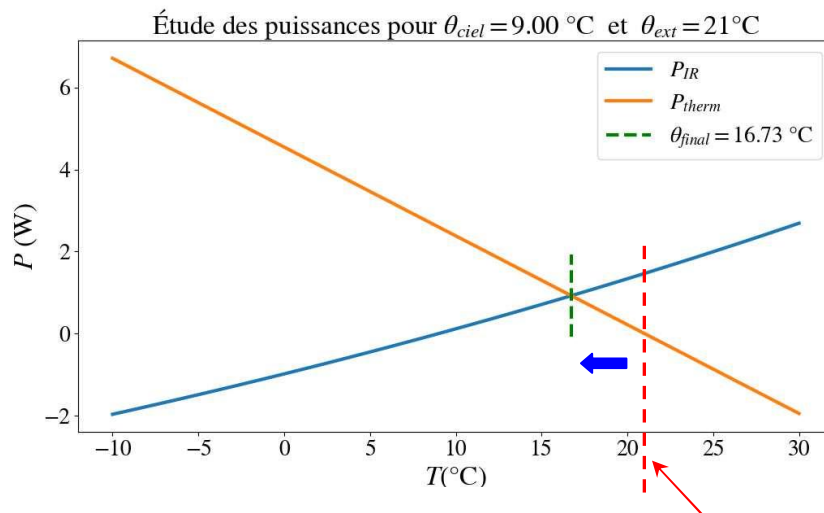
- **Modélisation**

Pour un temps très long, la température finale de l'eau devient constante (T_∞) et elle est limitée par l'équilibre des puissances échangées entre le ciel, l'eau du réfrigérateur et l'extérieur.

L'équation de cet équilibre est :

$$K(T_\infty - T_{ext}) + \sigma(T_\infty^4 - T_{ciel}^4)S = 0 \Leftrightarrow \sigma(T_\infty^4 - T_{ciel}^4)S = K(T_{ext} - T_\infty)$$

Il est facile de trouver la solution en traçant d'un côté $\sigma(T_\infty^4 - T_{ciel}^4)S$ correspondant aux pertes par rayonnement et de l'autre côté $K(T_{ext} - T_\infty)$ correspondant aux échanges thermiques entre l'eau et l'extérieur.



Température de départ de l'eau

- **Conclusion** : Notre modèle donne une température finale $\theta_{final} = 16,73^\circ\text{C}$

C'est bien, mais il faut beaucoup de glaçons pour le « ciel » et être très patient !

• **Tracer la solution, c'est possible !**

- **Modélisation**

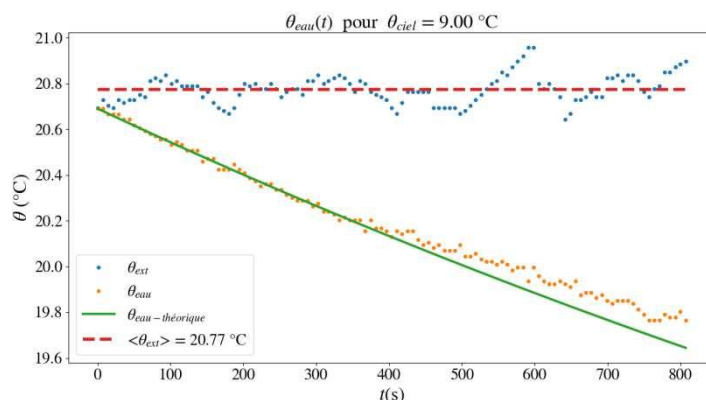
Retour sur l'équation

$$mcdT = -K(T - T_{ext})dt - \sigma(T^4 - T_{ciel}^4)Sdt$$

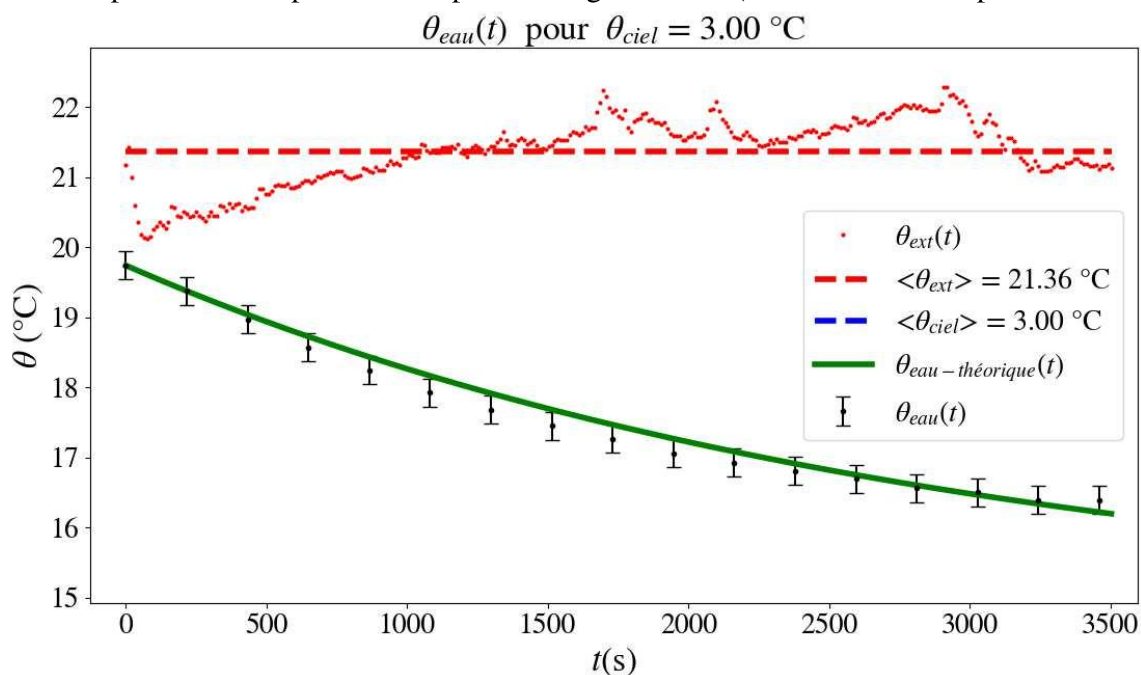
$$mc \frac{dT}{dt} = -K(T - T_{ext}) - \sigma(T^4 - T_{ciel}^4)S$$

- Résolution numérique

Il est encore possible de résoudre cette équation avec python.



Autre exemple de courbe pour un ciel plus homogène à 3 °C (incertitude en température de $0,2\text{ °C}$)



Courbes théorique vs courbe expérimentale (incertitude en température de $0,2\text{ °C}$)

- **Conclusion** : L'approche théorique reste très proche de l'expérience. Mais peut-on s'en satisfaire ?

IV. ET SI ON SE TROMPAIT !

De tous temps, il n'est jamais facile de convaincre en science. De grands scientifiques se sont eux même heurtés à l'incompréhension de leurs contemporains. Par exemple, Galilée (1564 – 1642) avec sa célèbre phrase : Plus modestement, en présentant notre travail devant des scientifiques, certains sont restés dubitatifs devant nos résultats. En effet, il est contre intuitif pour un physicien d'observer un refroidissement spontané sans apport d'énergie ...



« E PUR SI MUOVE ! »

Dans notre expérience, des pistes d'interrogations sont possibles, on peut citer :

- La présence du ventilateur ! Peut-être est-ce simplement la convection forcée qui permet de refroidir la boîte ?
- La nécessité d'avoir une « fenêtre » transparente aux infrarouges ! Est-ce vraiment le rayonnement infrarouge qui permet d'observer la baisse de température ?
- L'évaporation possible de l'eau au cours de l'expérience ! Cela peut-il induire un refroidissement ?

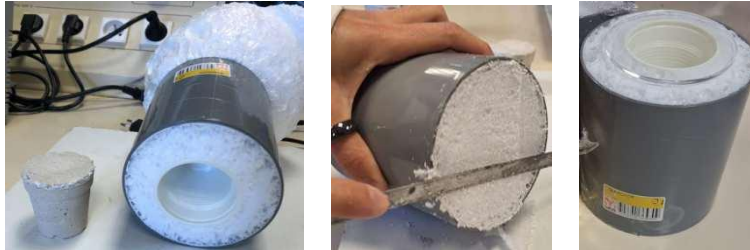
Pour tenter de lever les doutes, nous avons fabriqué une série de petites boîtes afin de mener une série d'expériences **qualitatives**.

1. CRÉATION DES BOITES TESTS

Pour garantir une reproductibilité des expériences, nous avons réalisé nos boîtes en suivant le même protocole que l'on peut voir en image :



Collage du verre (rempli de béton) et du tube puis remplissage de mousse expansive



Le moule en béton suivi du découpage du surplus de mousse et enfin le résultat final

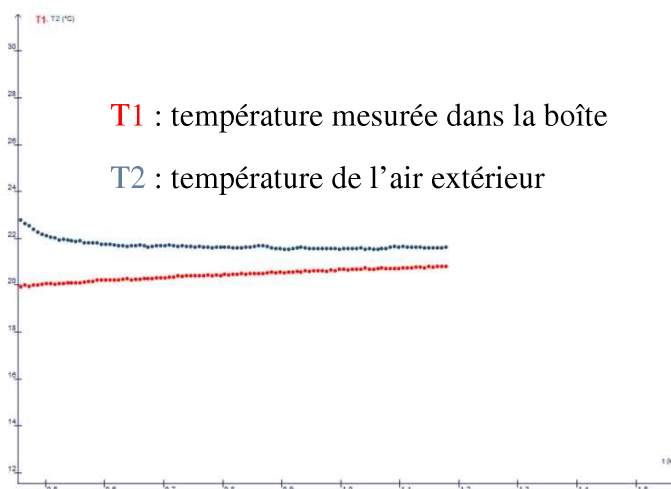
2. REFROIDIR PAR CONVECTION FORCÉE, EST-CE POSSIBLE ?

- **L'expérience** : Celle-ci se fait donc sans ciel « artificiel » en présence uniquement du ventilateur pour tenter de refroidir.



Avant de lancer l'expérience, on met en place les sondes de température puis le film plastique pour éviter toute évaporation.

- **Résultats**

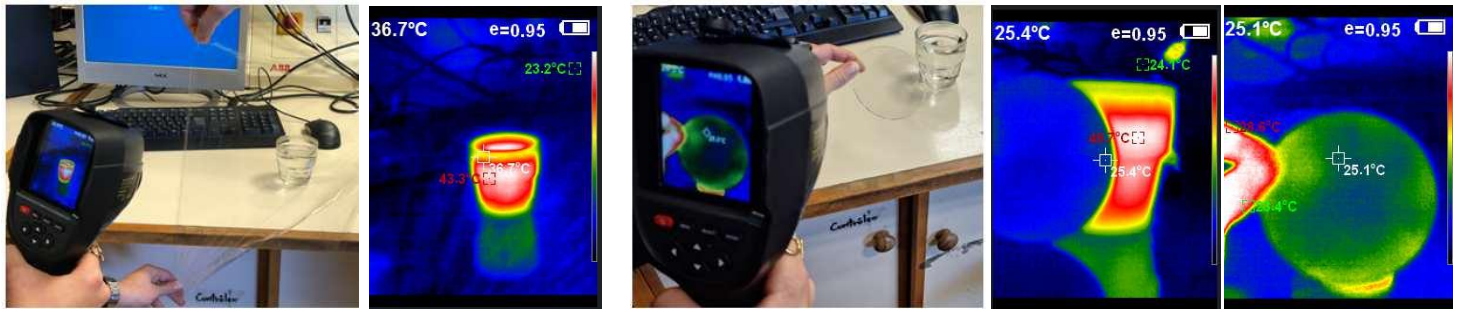


- **Conclusion**

La convection forcée ne permet pas de refroidir l'eau de la boîte, en effet celle-ci converge lentement vers la température de l'air extérieure.

3. LA FENÊTRE INFRAROUGE, VRAIMENT INDISPENSABLE ?

- **La transparence aux infrarouges :** Avant de trancher sur la nécessité d'une fenêtre transparente aux infrarouge, nous avons comparé un film plastique alimentaire avec un disque de plexiglass placés devant une tasse d'eau chaude.

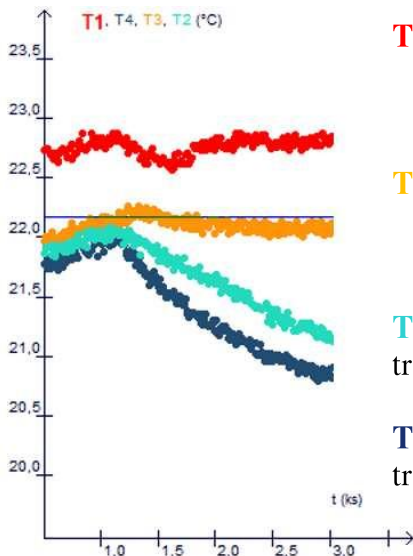


Le film alimentaire transparent aux infrarouges contrairement au plexiglass

- **L'expérience :** Nous plaçons maintenant trois boîtes contenant la même masse d'eau sous un ciel « artificiel » et toujours en présence du ventilateur.



- Résultats



T1 : température de l'air extérieur

T3 : température dans la boîte avec fenêtre opaque aux infrarouges

T2 : température dans la boîte (sans couverture dorée) avec fenêtre transparente

T4 : température dans la boîte (avec couverture dorée) avec fenêtre transparente

- Conclusion

On n'observe pas de refroidissement dans la boîte dotée d'une fenêtre opaque aux infrarouges contrairement aux deux autres. Ce résultat montre que c'est bien le rayonnement qui intervient dans la baisse de température. Au passage il semble, là encore, que la couverture de survie améliore les pertes par rayonnement.

4. L'ÉVAPORATION, UNE CAUSE DE REFROIDISSEMENT ?

- **L'expérience** : On place une boîte sans couvercle, sans ciel « artificiel » et en présence du ventilateur.



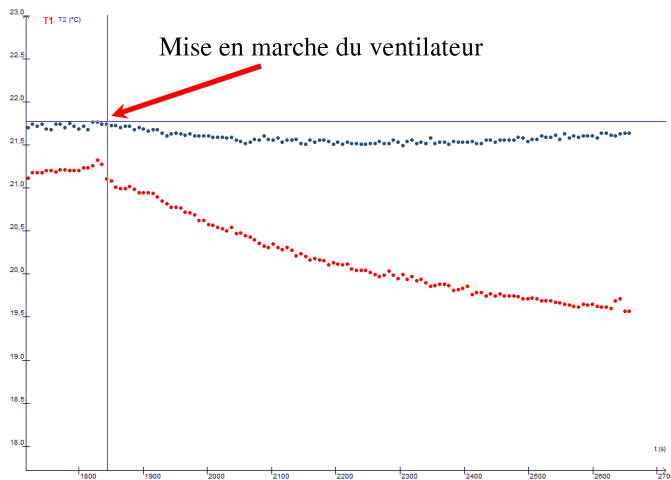
Masse initiale : $m = 172,1$ g

Masse après 15 min : $m = 171,9$ g



Et ainsi de suite ...

- Résultats



T2 :
température de
l'air extérieur

T1 :
température
dans la boîte



- Conclusion

On observe une baisse de température en même temps qu'une perte de masse de la boîte. L'énergie nécessaire au changement d'état semble provenir de l'eau elle-même pour expliquer le refroidissement.

La présence d'une fenêtre transparente aux infrarouges bloque cette évaporation dans le cadre de notre étude mais il y a là une piste à travailler pour créer un autre système de refroidissement !

CONCLUSION

Nous avons donc fait ces expériences sur la base de celle de Félix Trombe, de manière simplifiée, et nous en avons conclu qu'une méthode de refroidissement par refroidissement radiatif était non seulement possible mais pas très compliquée au vu des méthodes simples utilisées (nos boîtes étant composées de polystyrène et de couverture de survie, de film plastique ou de plexiglas selon les expériences, donc des matériaux facilement trouvables en supermarché).

Ce phénomène peut évidemment être appliqué aux réfrigérateurs ou frigos, ce à quoi nous avons pensé directement, et qui consommeraient beaucoup moins d'énergie (car la consommation d'un réfrigérateur correspond à près d'un quart de la dépense en énergie des ménages avec une consommation moyenne de 500kWh).

Mais même sans parler de réfrigérateur ou autre contenant permettant de garder nos plats préférés au frais, le refroidissement radiatif pourrait être utilisé dans les habitations et même dans le milieu professionnel, bref ce phénomène a de nombreux débouchés possibles dans notre quotidien.

Par exemple, une surface d'échange radiatif de 10 m² sur le toit d'une maison sous un ciel clair (à - 30°C) permet en théorie d'avoir une puissance de refroidissement de l'ordre de 2200 W.



Ainsi ces méthodes permettraient une moindre consommation énergétique dans le monde et donc une lutte efficace contre le dérèglement climatique de manière globale.

Notons enfin pour finir que le refroidissement passif est un domaine de recherche très actif actuellement. On trouve de nombreuses publications avec, par exemple, des systèmes fonctionnant aussi le jour (cf. travaux de Shanhui Fan aux USA)

https://en.wikipedia.org/wiki/Shanhui_Fan

https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_daytime_radiative_cooling

Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight

<https://www.nature.com/articles/nature13883>

Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 20-H day-night cycle

<https://www.nature.com/articles/ncomms13729>

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont poussé au meilleur de nous-même, de notre projet et qui ont contribué au succès de notre objectif.

Nous voudrions remercier dans un premier temps, Mr Hervé IDDA et Mr Oliver POLIDORO pour nous avoir encadrés mais aussi accueillis de manière chaleureuse dans ce projet de folie. Merci infiniment aussi pour votre patience, votre gratitude et vos idées extravagantes qui ont porté leurs fruits ! Merci pour la joie de vivre que vous avez donné tout au long de ce voyage en plein dans la physique. Et bien évidemment merci pour les moments partagés.

Nous souhaitons également remercier toute l'équipe pédagogique du lycée Vauvenargues dirigé par Mme LAGADEC, pour nous avoir fait confiance dans notre aventure.

Plus particulièrement, merci aux professeurs et techniciens de physique pour nous avoir fait découvrir différents aspects et univers de cette matière passionnante mais aussi de nous avoir prêté sans le moindre doute nombreux matériaux ainsi que votre confiance.

Nous tenons à témoigner, aussi, toute notre reconnaissance aux personnes suivantes :

Mr POLIDORO pour nous avoir donné avec tout son cœur, sans regret du matériel nécessaire à notre projet.

L'équipe entière Infroilympiades pour les meilleurs moments comme les moments de panique et de stress. Il nous reste encore de supers aventures ensemble, pour arriver là où, selon nos professeurs, nous devons arriver !

Et enfin, Tous nos remerciements, au projet et aux organisateurs du concours Cgénial qui nous offrent une possibilité grandiose de découvrir de nombreuses choses et faire de nombreuses rencontres.

Merci à notre entourage pour leur soutien et leurs encouragements.

L'équipe Infroilympiades