

Nos maquettes de glacières du XVIII^e siècle : quand la physique conserve la glace

+
Un projet lancé en septembre 2024

Atelier scientifique du lycée parc de Vilgénis



Sommaire :

- Présentation de l'équipe
- Présentation du projet
- Réalisation des maquettes
- Partie électronique
- Partie physique
- Récolte et analyse de nos données
- Conclusion
- Remerciements

Présentation de l'équipe :

- Lors du projet, nous avons toutes participé aux recherches et travaillé sur la réalisation des maquettes.
- Notre équipe est composée de :

Morgane FIOLE (Terminale) :
Physique, Powerpoint,
Photos, Vidéos

Andrine PACINI (Terminale) :
Physique, Powerpoint,
Vidéos, communication
avec les personnes
extérieures

Hélène CHEN (Terminale) :
Physique, Powerpoint,
Vidéos, Photos

Lucie KELLER (Terminale) :
Vidéos

Sara TARIQ (Terminale) :
Vidéos

Elsa MAGAUD (Première) :
Physique, Schémas, Vidéos,
Powerpoint

Camille PICHON (Première)

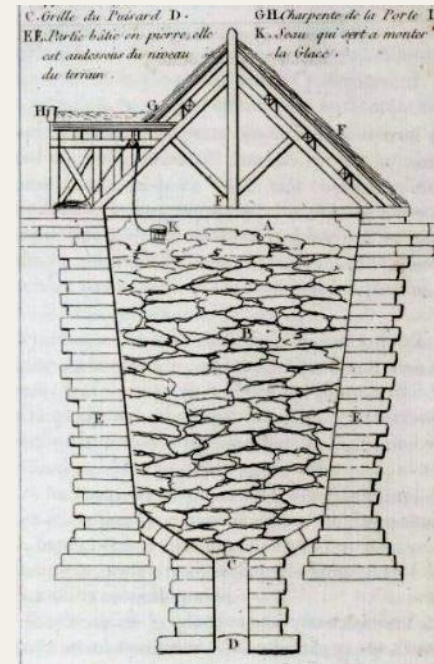
Danae REULIER-ROTHIER
(Première)

Eva BODECHON-TSAO
(Seconde) : Impression des
pièces en 3D

- M. Taillet : professeur encadrant

Notre projet en quelques mots :

- Une glacière du XVIIIe siècle est encore visible aujourd'hui près de notre lycée.
Une glacière n'est autre que l'ancêtre lointain d'un « réfrigérateur en pleine nature ». Sa structure semi-ensevelie permet de conserver des aliments en été grâce à la glace récoltée en hiver.
- Curieuses de son fonctionnement, nous avons décidé de nous pencher plus précisément sur les principes physiques de la cinétique de la fonte de la glace.
Notre projet prend la forme de la réalisation de maquettes de glacière, de récolte, de modélisation et d'analyse de données.



Entrée de la glacière de Massy



Problématique et objectifs :

- Comment modéliser la cinétique de la fonte de la glace en étudiant expérimentalement une maquette d'une glacière du XVIIIe ?
- Pour répondre à cette question, notre travail se fonde sur des expériences de terrain et une modélisation de la fonte de la glace à l'intérieur de nos maquettes, enfouies dans le patio du lycée, à travers :
 - une dimension architecturale : conception et réalisation de maquettes de glacières de matériaux et de caractéristiques différentes
 - une dimension physique : comparaisons de l'isolation des maquettes entre elles et avec celle du XVIIIe siècle, influence de la température extérieure, de la température du sol, notion de résistance thermique
 - une dimension électronique : utilisation de capteurs Arduino pour prélever les données de nos maquettes

La réalisation des maquettes :

- Nous avons réalisé 3 maquettes différentes :
 - La maquette 0
 - La maquette 1
 - La maquette 2

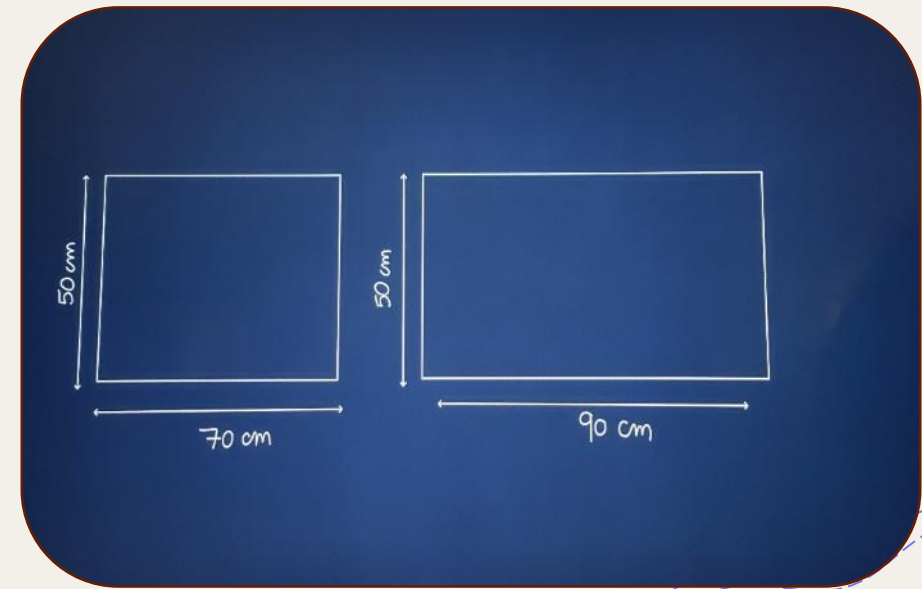
Maquette 0 :

➤ La Maquette 0 est un prototype que nous n'avons pas enterré. Elle nous a permis d'apprendre à fabriquer une maquette en essayant plusieurs méthodes.

➤ **Choix des matériaux et dimensions :**

Après avoir effectué des recherches sur les matériaux et les dimensions des maquettes du XVIIIe, nous avons choisi d'utiliser les matériaux suivants :

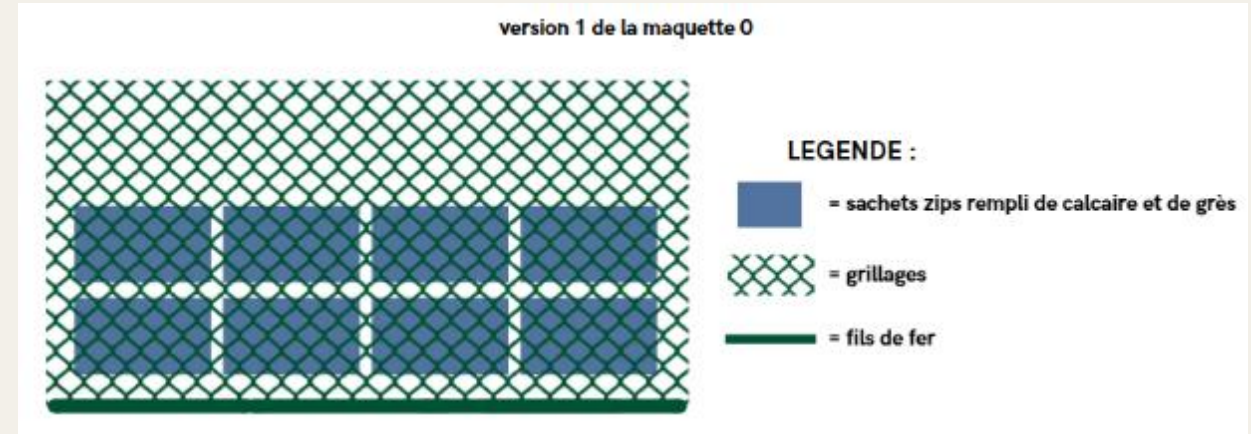
- 2 morceaux de grillage pour les murs
- De la paille et du calcaire pour isoler



Les différentes versions de la maquette 0 :

Maquette 0 - Version 1 :

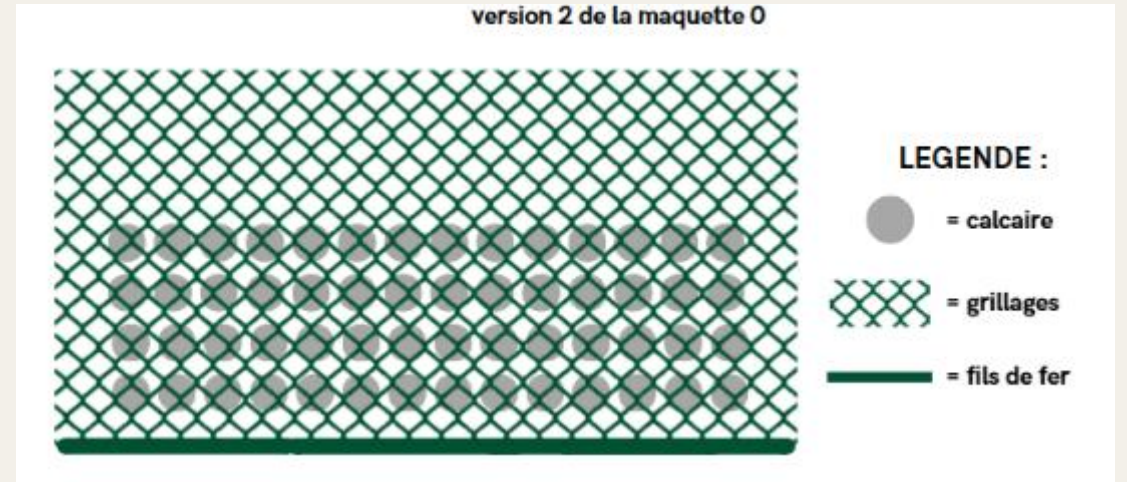
- Nous avons lié deux pans de grillage et rempli le grillage avec des sachets zip remplis de calcaire et de grès.



- Résultat : Le contenu des sachets se regroupait au fond lorsque nous redressions la maquette. Cela rendait les murs trop épais et la glacière était impossible à fermer.

Maquette 0 - Version 2 :

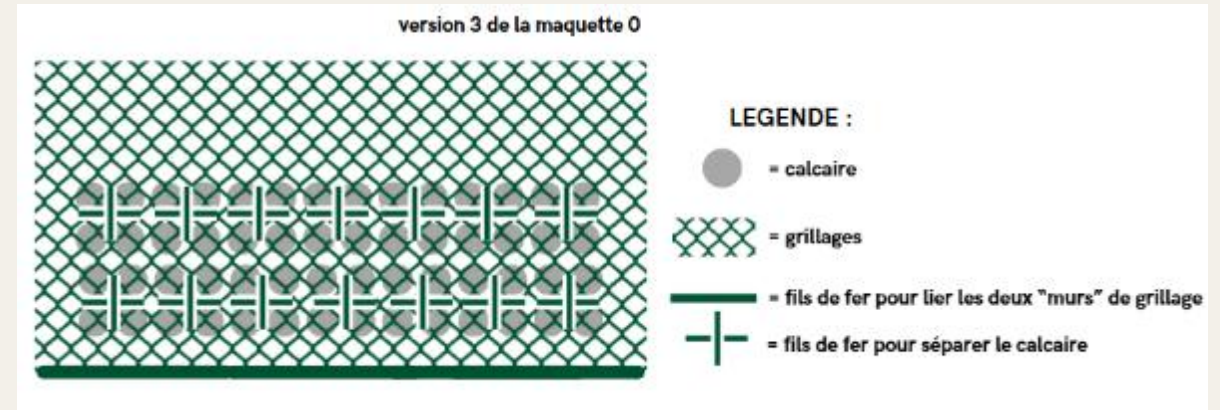
➤ Nous avons retiré les sacs en plastique et les morceaux de grès qui étaient trop grands par rapport au calcaire, puis, nous avons rempli le grillage uniquement avec du calcaire.



➤ Résultat : Le calcaire se tassait malgré tout dans le fond du grillage.

Maquette 0 - Version 3 :

- Nous avons alors disposé des fils de fer à intervalle régulier sur l'ensemble des grillages pour tenter de mieux répartir le calcaire.



- Résultat : Le calcaire était bien réparti dans tout le grillage, mais il y avait beaucoup trop de vide entre chaque caillou à cause des séparations dues aux fils de fer.

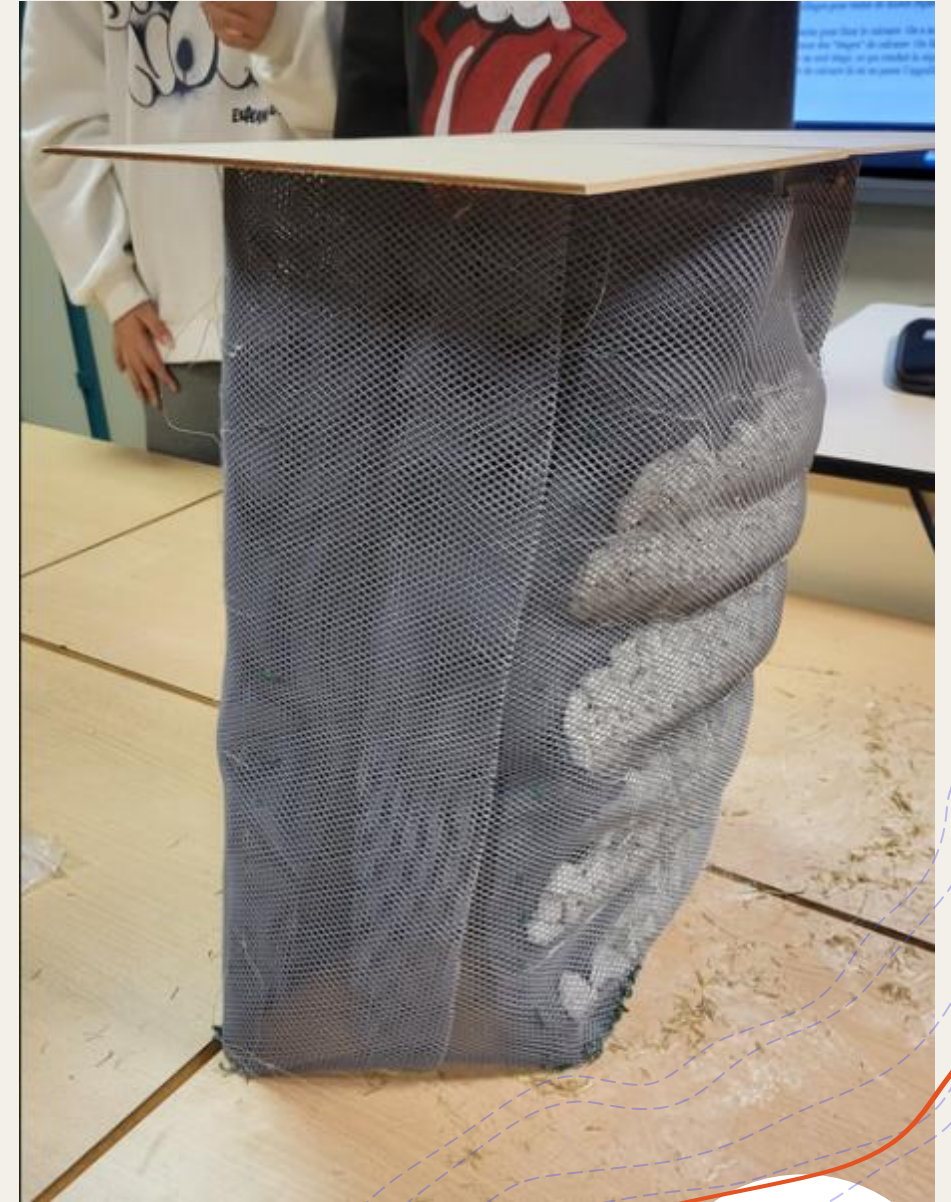
Maquette 0 - Version 4 :

- Nous avons formé des étages de calcaire, délimités par du fil de fer, que nous avons par la suite remplacé par du fil de pêche.
- Puis, nous avons ajouté une nouvelle partie de grillage au dessus de ceux déjà présents et nous y avons inséré de la paille afin de renforcer l'isolation.
- Enfin, nous avons collé un sac de tissu rempli de paille au niveau de la fermeture de la glacière après l'avoir fermé car il n'y avait aucune isolation à cet endroit-là.



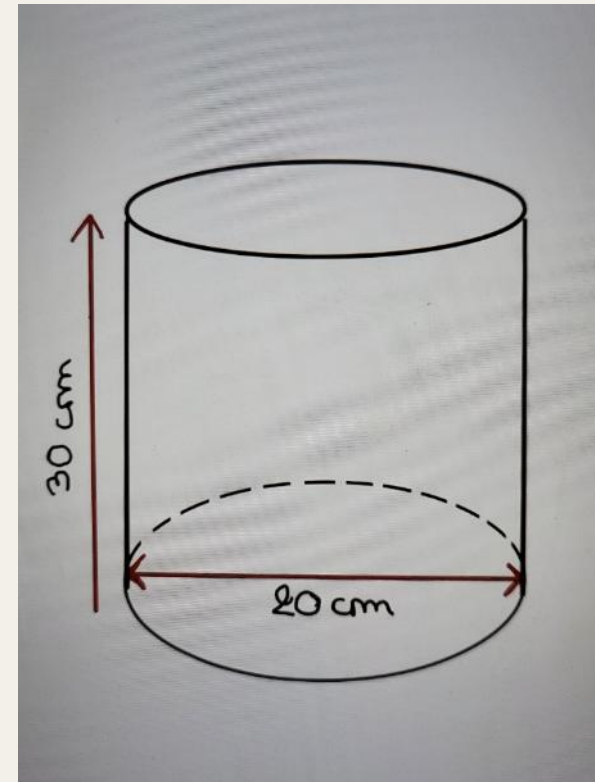
Bilan de la maquette 0 :

- Le résultat de la maquette ne nous convenait pas car l'usage du grillage n'était pas adapté. Il se déformait trop, ne permettait pas une bonne isolation et l'épaisseur des murs affectait la forme de la glacière qui n'était pas circulaire ce qui aurait compliqué l'installation du matériel servant à prélever nos mesures.
- Nous avons donc décidé de réaliser la maquette suivante sans grillage mais plutôt avec du calcaire et du mortier.



Maquette 1 :

- La maquette 1 est la première maquette que nous avons enterrée et testée.
- De forme cylindrique, elle fait 30cm de hauteur et possède un diamètre interne de 20cm.



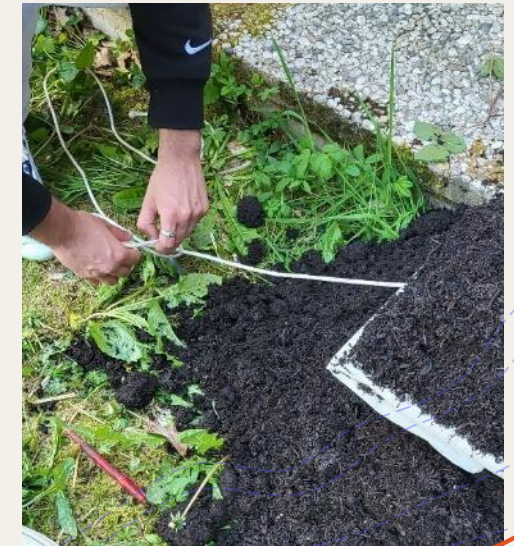
Réalisation :

- Nous l'avons construite en formant des étages, alternant entre couches de calcaire et de mortier (qui est un mélange de chaux, de ciment et d'eau nous servant à assembler les morceaux de calcaires entre eux) tout en faisant attention à ce que le mur ne penche ni vers l'intérieur ni vers l'extérieur.
- Puis, pour mieux isoler et renforcer la structure de la glacière que nous avons ensuite enterrée, nous avons décidé de lisser ses murs, à l'intérieur et à l'extérieur avec du mortier.



Mise en place de la maquette :

- Après avoir fini de réaliser la maquette, nous sommes allés la mettre en place dans le patio afin de pouvoir commencer nos premiers tests.
- Nous avons posé la maquette sur une cagette en plastique afin que les fils reliant le capteur de force au microcontrôleur puissent y passer. Puis, nous avons inséré le capteur de force et le contenant pour les glaçons dans la glacière.
- Par la suite, nous avons recouvert les côtés de la glacière avec du terreau.
- Enfin, nous avons fermé la glacière avec de la laine de verre et un toit que nous avons fixé au sol à l'aide de 2 piquets et de cordes avant de recouvrir le toit avec du terreau.





Bilan de la maquette 1 :

- Cette nouvelle version de la maquette nous a pris moins de temps à réaliser, elle est plus petite et plus isolante que la précédente mais l'inconvénient est que son poids la rend difficile à transporter.
- De plus, la rigidité et la forme cylindrique de la maquette nous permettent d'y insérer la partie électronique sans problème.
- Une fois enterrée dans le patio, la maquette se porte bien et ne se détériore pas.

Maquette 2 :

- La maquette 2 est la deuxième maquette que nous avons enterrée et testée.
- Nous l'avons construite sur le même modèle que la maquette 1 mais cette fois-ci en doublant l'épaisseur des murs.
- Puis nous l'avons enterrée de la même manière que la maquette 1 en rajoutant cette fois-ci du foin autour du terreau.



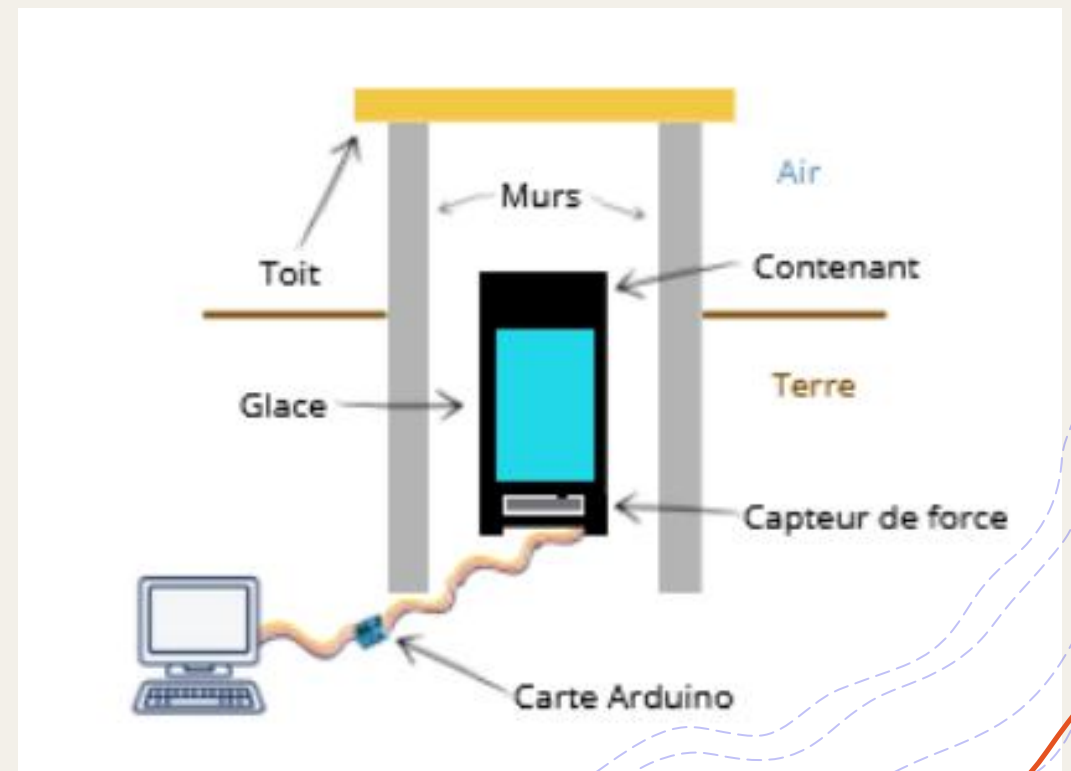
Bilan de la maquette 2 :

- Les murs sont deux fois plus épais et la maquette quatre fois plus lourde que la précédente. Elle pèse 24 kg.
- Une fois enterrée, la maquette tient bien et ne se détériore pas. Elle a bien supporté les températures élevées du mois de juin.

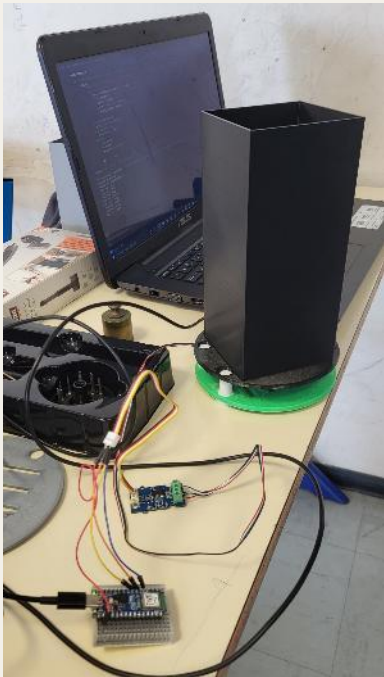


Début des expériences pour mesurer la fonte de la glace :

- Nous remplissons le contenant fait sur Solidworks et imprimé en 3D par le lycée à l'intérieur de la glacière avec un bloc de glace d'environ 400g. Une fois rempli, le poids de la glace est mesuré par le capteur de force puis convertit en masse par le programme Arduino qui transmet ensuite les informations sur notre ordinateur où elles sont traitées et stockées grâce à un programme python.
- Après avoir fini de réaliser nos maquettes, nous avons ainsi travaillé sur la partie électronique afin de pouvoir récolter et stocker les données de nos expériences.



Partie Electronique :



- Notre circuit comporte trois composants : le capteur de force HX711 qui est relié à une carte Arduino qui est quant à elle reliée à un PC.
- Au début, nous voulions utiliser un serveur pour sauvegarder les données, mais nous n'avons pas l'accès à l'Internet du lycée. Nous avons donc choisi d'utiliser un câble afin de faciliter la liaison entre la carte Arduino et l'ordinateur.
- Pour traiter les données, nous avons ensuite réalisé des programmes Arduino et python qui permettent de relever les données du capteur de force, d'effectuer un calcul afin de déterminer la masse de glace qu'il reste dans notre maquette puis de stocker ces résultats.

Description du programme-Partie 1 :

Le système repose sur une chaîne d'acquisition de données permettant de convertir une contrainte mécanique en une information numérique exploitable sur une interface informatique.

➤ 1. Algorithme d'Acquisition et de Traitement du Signal (Mesure)

L'objectif de l'algorithme est de transformer les micro-variations de tension provenant du capteur de force en une unité de masse précise.

- **Numérisation** : Le module **HX711** convertit le signal analogique de faible amplitude en une donnée numérique sur 24 bits, offrant une haute résolution.
- **Filtrage Numérique** : Pour éliminer le bruit électronique et les perturbations mécaniques (vibrations), l'algorithme applique un **lissage par moyenne glissante**. Il compile plusieurs échantillons avant de retourner une valeur stable.
- **Étalonnage (Calibration)** : L'algorithme applique une fonction de transfert linéaire de type $y=ax+b$:
 - **La Tare (b)** : Définit l'origine en soustrayant la masse statique du contenant.
 - **Le Facteur d'Échelle (a)** : Coefficient multiplicateur déterminé par une masse étalon pour convertir les "points" du convertisseur en kilogrammes.

Description du programme-Partie 2 :

➤ 2. Algorithme de Gestion des Flux et Communication (Transmission)

L'algorithme orchestre le séquençage des tâches et l'échange bidirectionnel entre le microcontrôleur et la station de travail (PC).

- **Protocole de Communication** : Utilisation du protocole **UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)** via une liaison série émulée sur USB. La vitesse est synchronisée à 57 600 bauds.
- **Encapsulation des Données** : La donnée brute traitée est formatée en chaînes de caractères ASCII. Ce formatage garantit que les données sont lisibles par n'importe quel logiciel de terminal ou de traitement de données (Excel, Python, etc.).
- **Interactivité Bidirectionnelle** : L'algorithme intègre une interruption logicielle qui surveille le tampon de réception (Buffer). Cela permet à l'utilisateur d'envoyer des commandes de contrôle depuis le PC vers l'Arduino pour déclencher des actions spécifiques sans redémarrer le système.

Partie physique :

➤ Nous avons différentes problématiques :

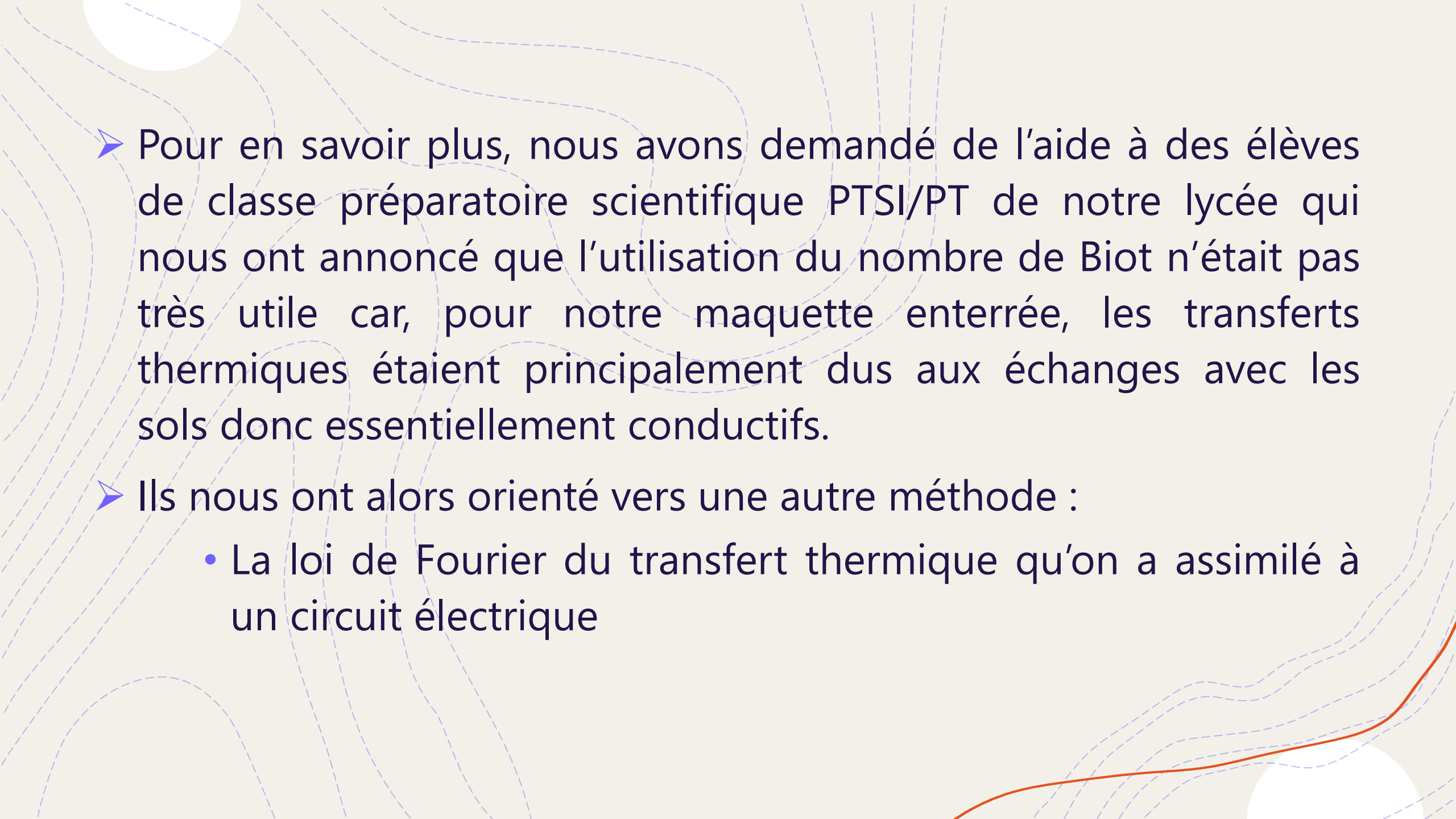
- Nos maquettes sont-elles représentatives de la réalité ?
- Comment savons-nous si elles fonctionnent aussi bien qu'une vraie glacière ?
- Laquelle de nos maquettes isole le mieux ?

➤ Nous avons étudié plusieurs méthodes pour répondre à ces problématiques :

- Le nombre de Biot
- La Loi de Fourier du transfert thermique

Le nombre de Biot :

- Pour savoir si nos maquettes sont représentatives de la réalité, nous pouvons regarder son nombre de Biot, noté Bi . C'est un nombre sans dimensions, et qui n'a donc pas d'unité.
- Ainsi, nous pouvons calculer séparément le nombre de Biot de notre maquette, le comparer avec celui d'une vraie glacière, et selon leur écart, savoir si notre maquette est plus ou moins représentative de la réalité.
- Pour le calculer, on utilise la **formule** suivante : **$Bi = hL/k$**
 - **h** : coefficient de transfert de la chaleur par convection (en W/m^2)
 - **L** : longueur caractéristique du corps étudié (en m)
 - **k** : conductivité thermique du corps (en $W/(m \cdot K)$)

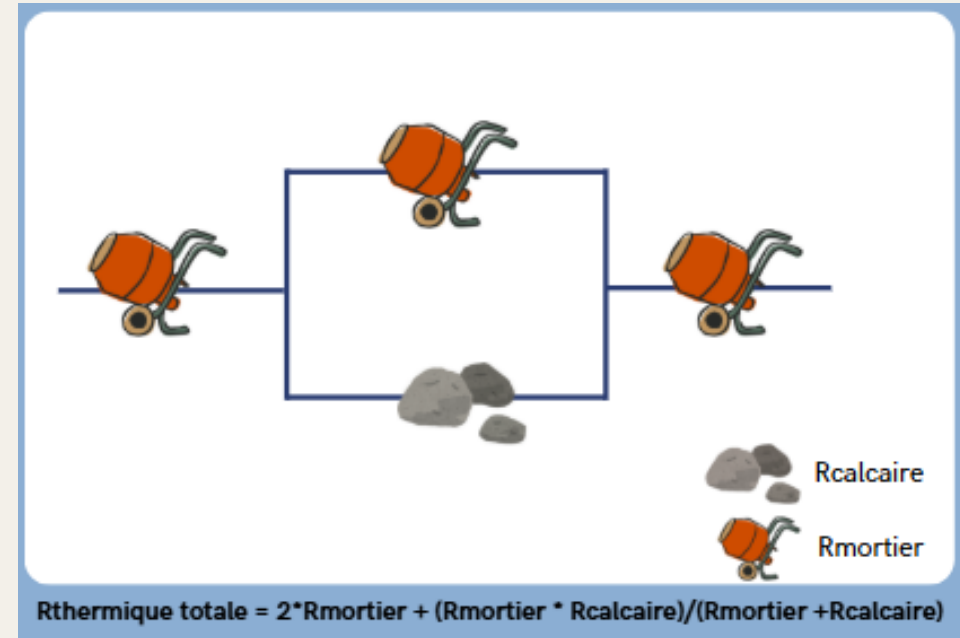
- 
- Pour en savoir plus, nous avons demandé de l'aide à des élèves de classe préparatoire scientifique PTSI/PT de notre lycée qui nous ont annoncé que l'utilisation du nombre de Biot n'était pas très utile car, pour notre maquette enterrée, les transferts thermiques étaient principalement dus aux échanges avec les sols donc essentiellement conductifs.
 - Ils nous ont alors orienté vers une autre méthode :
 - La loi de Fourier du transfert thermique qu'on a assimilé à un circuit électrique

Loi de Fourier du transfert thermique assimilée à un circuit électrique :

- Nous pouvons calculer l'échange thermique de la glacière en considérant le flux thermique comme un courant électrique.
- On peut considérer que le flux de chaleur traverse le mur en passant d'abord par le mortier, puis soit par une seconde couche de mortier soit par une couche de calcaire, et enfin repasse par du mortier. Pour chaque matériau, on aura une résistance thermique différente.
- On suppose que la quantité de mortier présente dans notre maquette est égale à la quantité de calcaire, sans prendre en compte les couches extérieurs de mortier que l'on a appliquées pour lisser les murs de la maquette.

- On considère le mur de notre glacière ainsi :

$$R_{thermique\ totale} = 2R_{mortier} + \frac{R_{mortier} \cdot R_{calcaire}}{R_{mortier} + R_{calcaire}}$$



- Le circuit thermique de notre glacière peut être comparé à un circuit électrique. Nous pouvons donc considérer que les murs de notre glacière forment un circuit en dérivation ce qui permet de représenter le circuit thermique comme un circuit en série électrique, avec le flux thermique à la place de l'intensité.
- Nous reprendrons cette étude après la présentation de nos résultats expérimentaux.

Récolte et analyse de nos données :

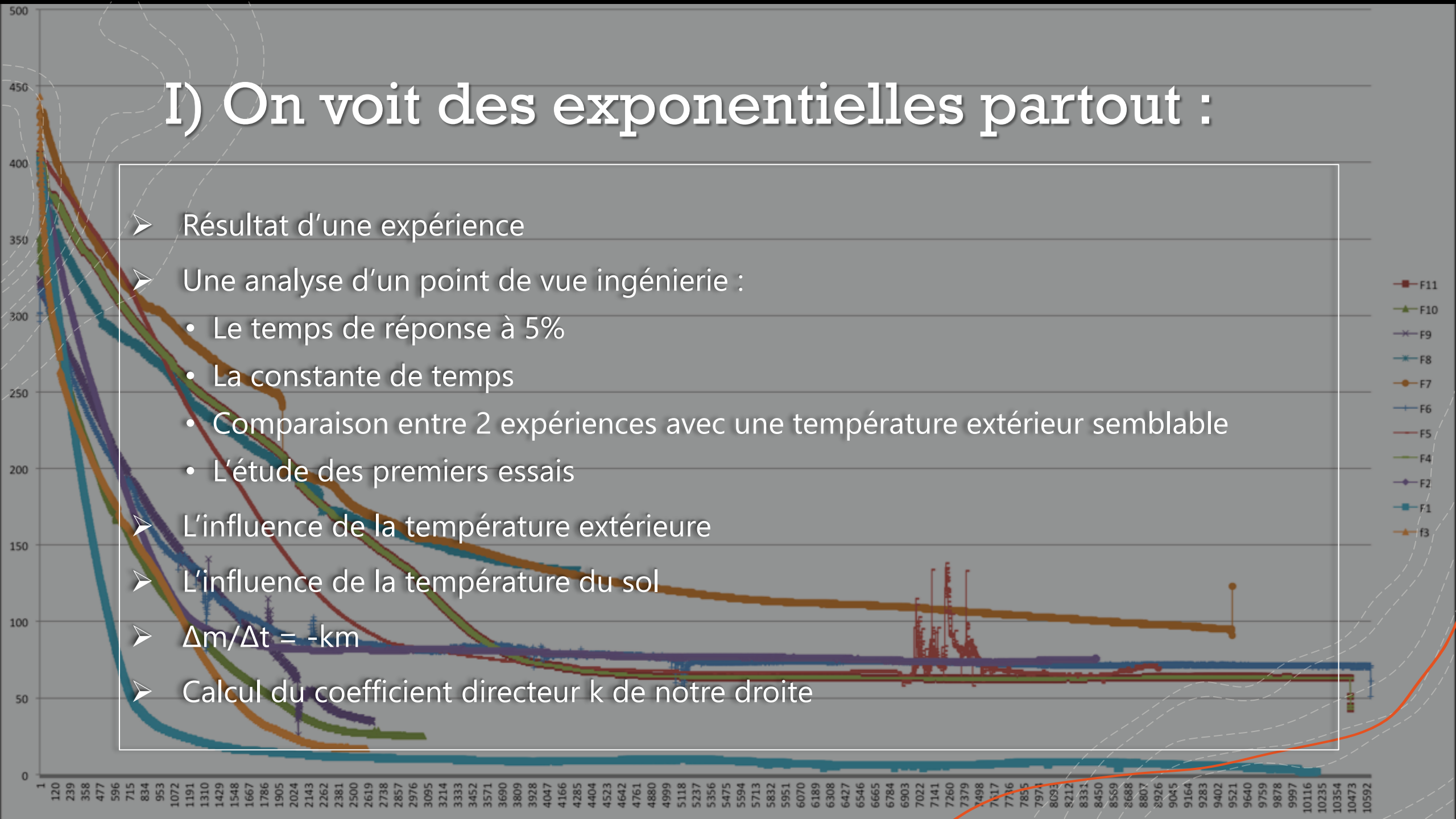
- Nos expériences ont été réalisés sur plusieurs heures (durant de 12h à 72h), à différents moments de l'année (d'avril 2025 à février 2026)
- Sur l'ensemble des 50 séries de mesures effectuées, nous en avons 14 qui ont été réalisées sur la maquette 1, 31 sur la maquette 2 et 5 sur la structure témoin en béton. Nous avons également récolté d'autres données que nous n'avons pas utilisé car les résultats n'étaient pas cohérents.

I) On voit des exponentielles partout

II) Un travail en physique plus rigoureux

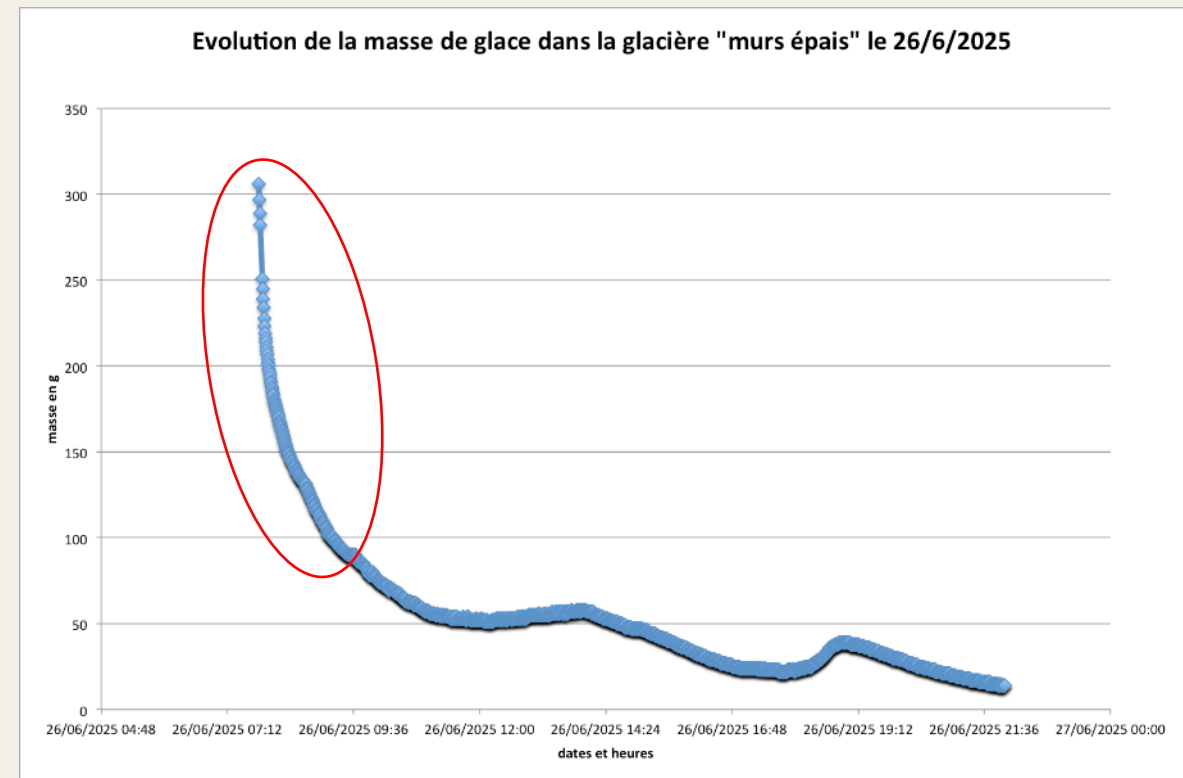
I) On voit des exponentielles partout :

- Résultat d'une expérience
- Une analyse d'un point de vue ingénierie :
 - Le temps de réponse à 5%
 - La constante de temps
 - Comparaison entre 2 expériences avec une température extérieur semblable
 - L'étude des premiers essais
- L'influence de la température extérieure
- L'influence de la température du sol
- $\Delta m / \Delta t = -km$
- Calcul du coefficient directeur k de notre droite



Résultat d'une expérience :

- Après avoir traité les données d'une expérience, en traçant l'évolution de la masse de glace dans la glacière en fonction du temps, on obtient une courbe qui ressemble a une exponentielle telle qu'elle obéit à une équation différentielle $y' + ay = 0$
- Mais les dernières données n'étant pas fiables, il nous a semblé préférable de travailler seulement sur la première partie de la courbe qui est presque la représentation graphique d'une fonction affine.
- Nous n'utilisons donc que cette partie afin de déterminer k .
- De plus, nous avons trouvé la formule suivante : $\Delta m / \Delta t = -km$

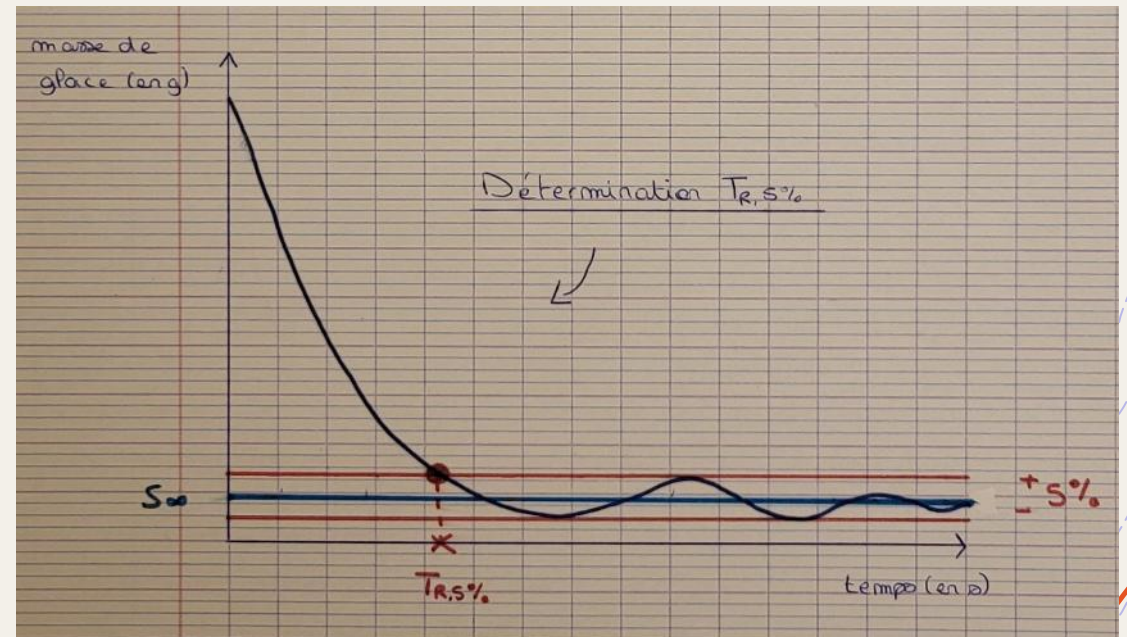


Une analyse d'un point de vue ingénierie :

- Lors de notre rencontre avec un professeur de science de l'ingénieur (SI) de CPGE, celui-ci nous a expliqué que l'approximation que nous avons faite en ne prenant que la partie « affine » de la courbe correspondait à prendre la partie de la courbe jusqu'à $t_{r5\%}$ et à simplifier cette partie en « fonction affine ».
- Il nous a également présenté ce qu'était la constante de temps τ . Celle-ci peut nous permettre de comparer nos maquettes.

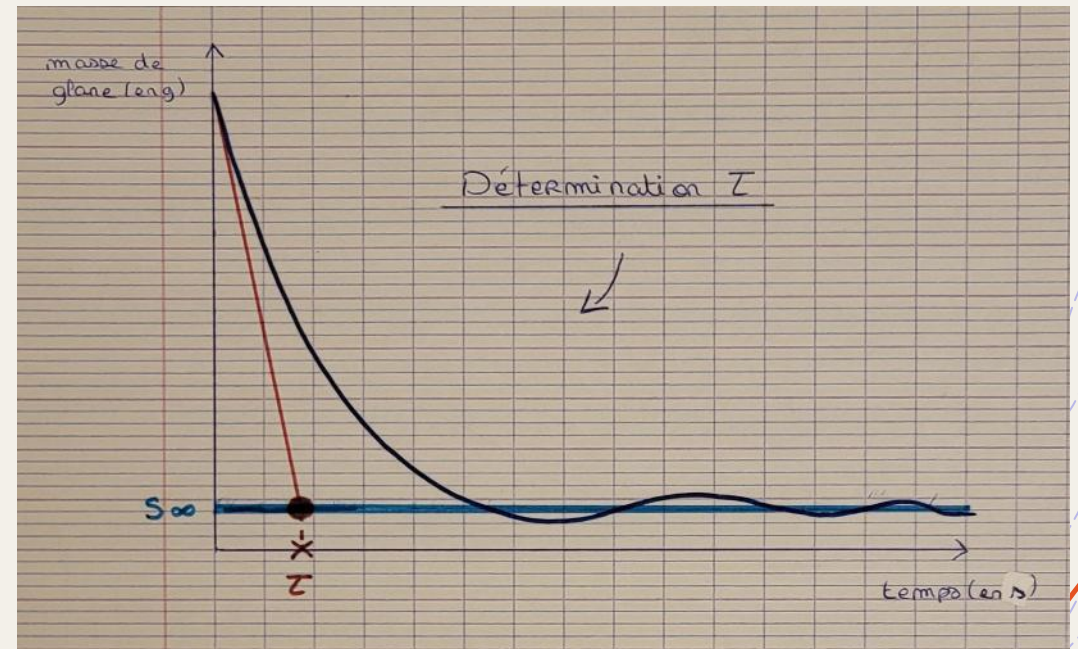
Le temps de réponse à 5% :

- Le temps de réponse à 5%, noté $t_{r5\%}$ est la durée mise par la grandeur de sortie (ici la masse de glace) pour rentrer dans la bande des 5% et ne plus en sortir. Il est exprimé en s dans le SI.
- Pour trouver le temps de réponses à 5%, il faut :
 - Déterminer la limite de la fonction
 - Tracer les + ou - 5% autour de la limite
 - Relever l'abscisse du dernier point auquel la courbe est hors des + ou - 5%
- Le temps de réponse à 5% correspond à cette abscisse.

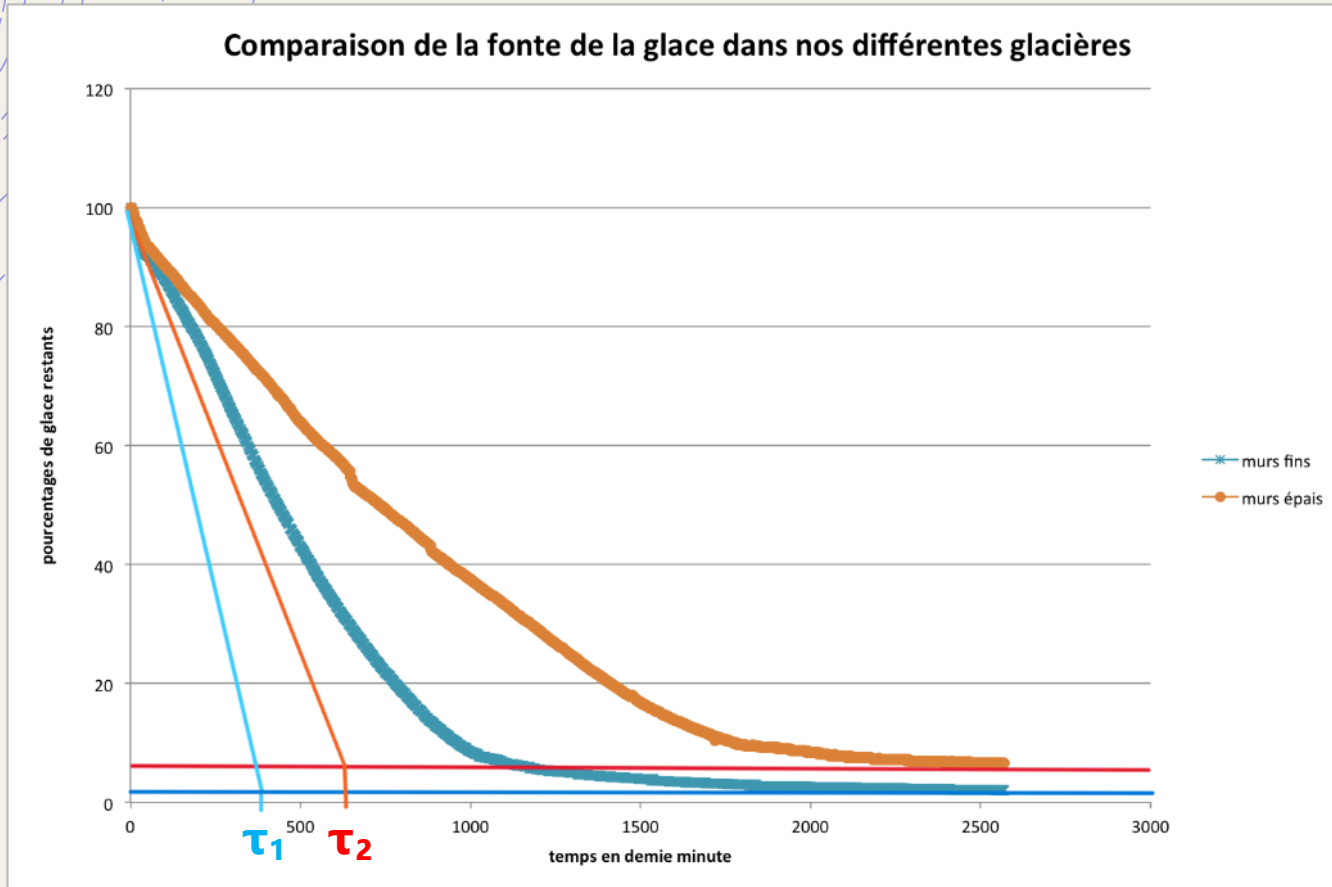


La constante de temps :

- C'est parce que notre courbe ressemble à une exponentielle qu'on peut déterminer la constante de temps τ (tau).
- En physique, une constante de temps est une grandeur caractérisant la rapidité de l'évolution d'une grandeur physique dans le temps (ici c'est l'évolution de la masse de glace). Elle est exprimée en s dans le SI.
- Pour déterminer la constante de temps, il faut :
 - Déterminer la limite de notre fonction
 - Tracer la tangente à la courbe au point d'abscisse 0
 - Relever l'abscisse du point d'intersection entre la tangente et la limite de la suite
- Notre constante de temps correspond à cette abscisse.



Comparaison entre 2 expériences avec une température extérieur semblable :



➤ Nous cherchons à déterminer τ afin de pouvoir comparer nos différents tests.

=> La maquette avec la constante de temps la plus élevée est la maquette la plus isolante. **Plus τ est grand**, plus le système met du temps à évoluer (évolution lente).

Analyse :

$\tau_2 > \tau_1$ donc la maquette aux murs épais est plus isolante

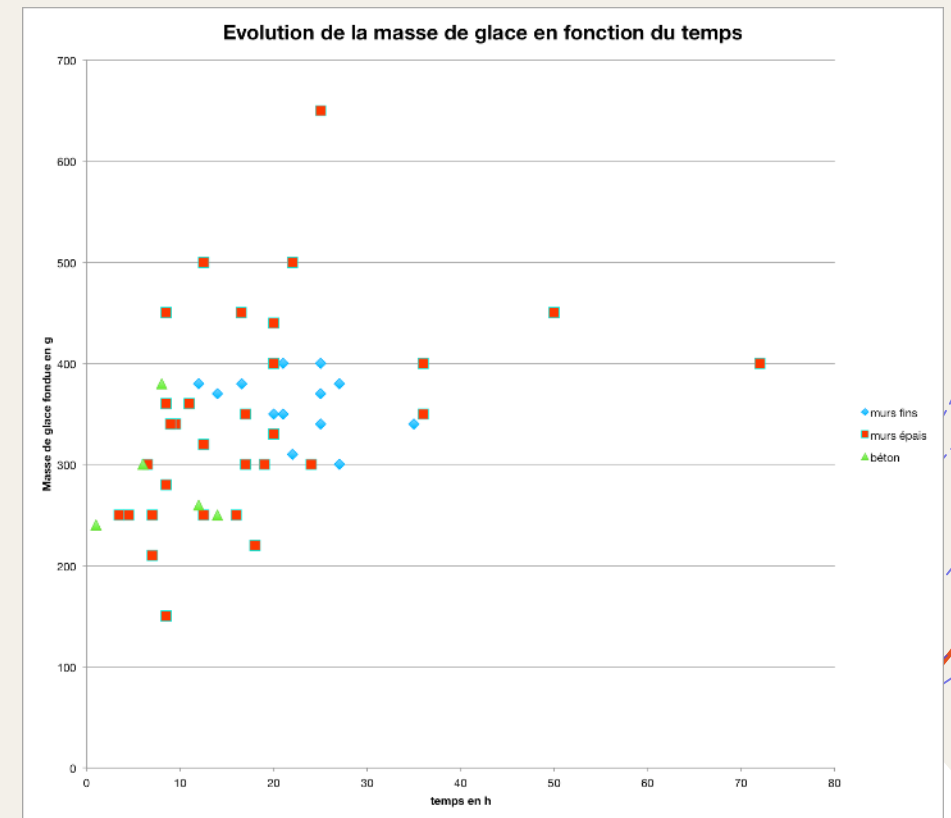


Etude des premiers essais :

- On calcule la masse de glace fondue (en g) et le temps mis pour fondre (en h).
- On réalise un nuage de points avec nos 50 mesures dans lequel chaque point correspond à une expérience
- On observe les résultats lors de trois premiers modèles d'expériences :
 - Des murs en béton, des murs fins ou des murs épais.

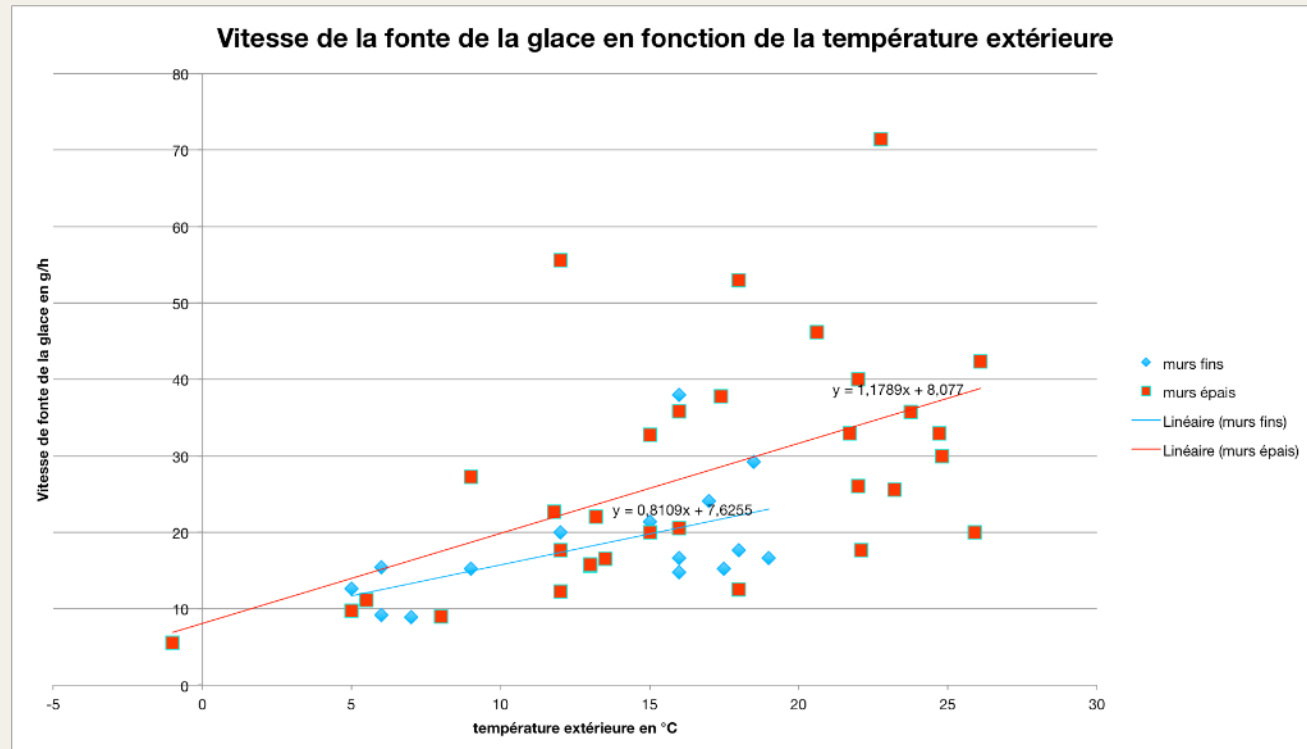
Analyse :

- Le mur fin semble offrir la meilleure isolation thermique (moins de glace fondue par heure), c'est mieux que le mur épais, ce qui est contre-intuitif mais qui peut s'expliquer si le mur épais accumule la chaleur (effet d'inertie thermique).
- Le béton donne de bons résultats, mais il faudrait plus de mesures pour conclure.
- Mais dans ces résultats, nous ne tenons pas compte des facteurs extérieurs.



Influence de la température extérieure :

- On utilise les vitesses de fonte de la glace obtenues précédemment (en g/h).
- On détermine la température extérieure de la journée (en °C) à l'aide de [notre station météo](#). Pour cela on réalise un petit programme python.
- On trace un nuage de points représentant les expériences pour les deux maquettes : murs fins et murs épais

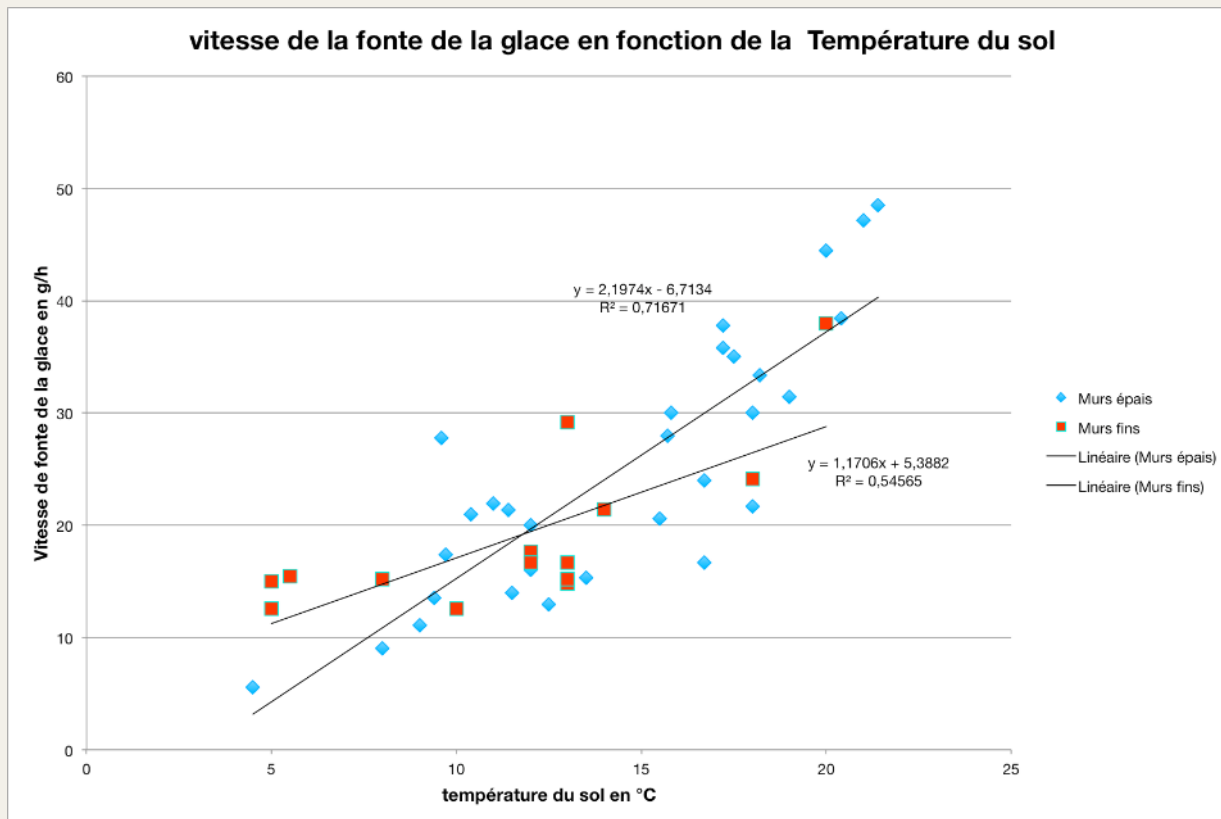


Analyse :

- Lors des expériences avec les murs fins, plus la température extérieure moyenne est élevée plus la glace fond. Ces résultats sont semblables pour les murs épais.
- Un autre facteur n'a pas encore été testé : la température du sol.

Influence de la température du sol :

- On utilise les vitesses de fonte de la glace (en g/h) obtenues précédemment.
- On a prélevé la température du sol (en °C) lors de la mise en place de la glace.
- On trace un nuage de points dans lequel chaque point représente une expérience

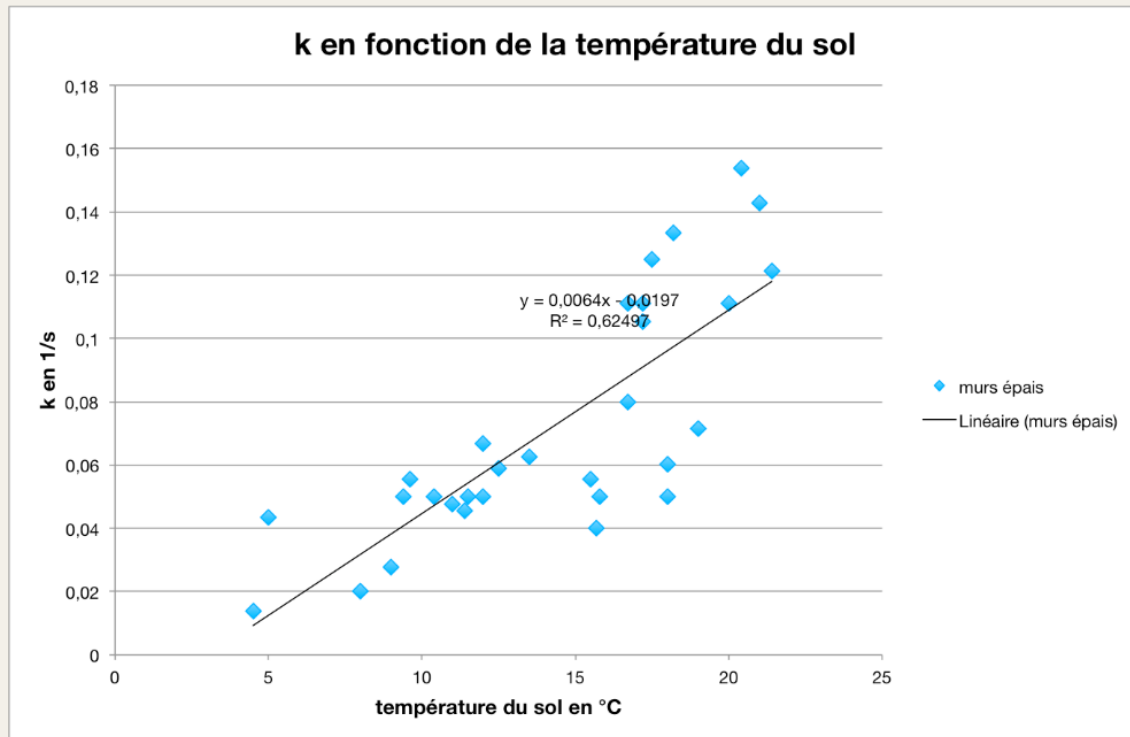


Analyse :

- La température du sol semble être un facteur influençant la fonte de la glace.

Calcul du coefficient directeur k de notre droite :

- On espérait $\Delta m / \Delta t = -km$
- On a essayé de voir si $k = -v/m$, avec k (en 1/s), v (en g/h) et m (en g)



Analyse :

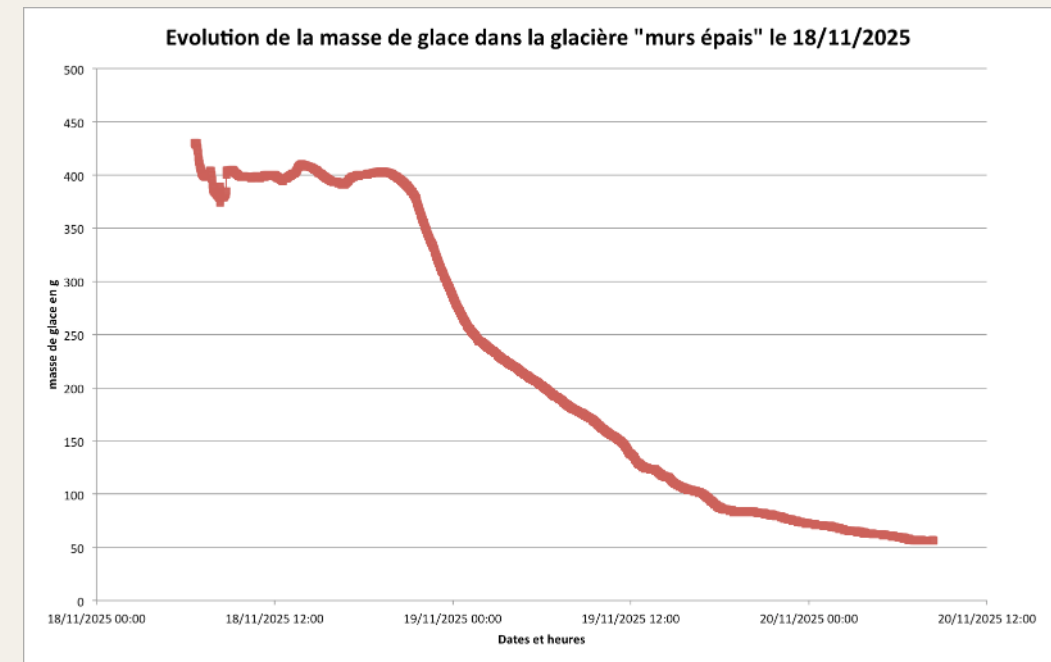
- Notre droite ne passe pas par l'origine et notre R^2 est éloigné du 0,7 espéré donc notre approximation n'est pas parfaite.
- Comme d'après nos data cela semble faux, nous allons donc repartir dans de la physique.

II) Un travail en physique plus rigoureux :

- Adaptation du modèle
- La résistance thermique
- Calcul de la résistance thermique de nos maquettes
- Ce ne sont que des fonctions affines
- Modélisation de nos formules

Adaptation du modèle :

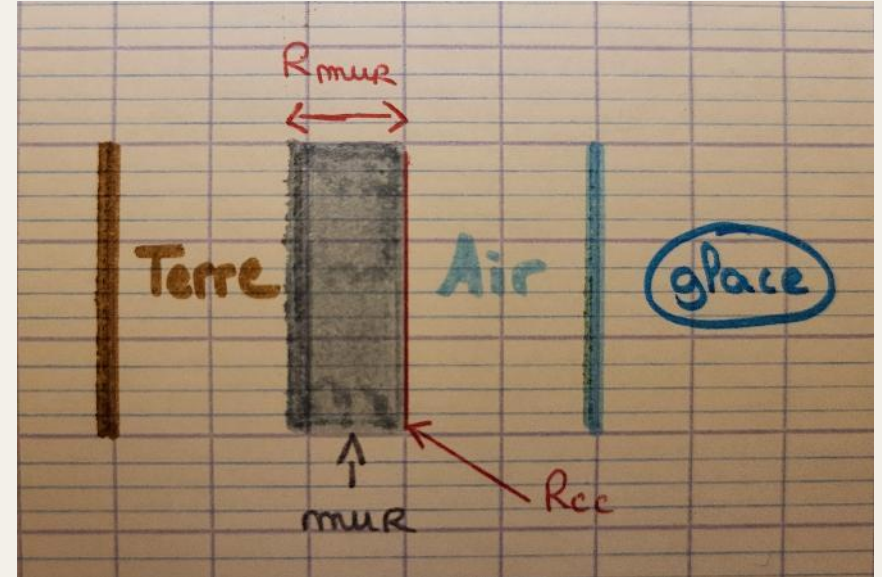
- À la suite d'un de nos tests, nous avons remarqué que nous nous étions trompées et que nos courbes n'étaient pas tout à fait des exponentielles !
- Lorsqu'il fait froid, la glace ne fond pas directement et on peut observer un palier de température avant que la masse de glace ne commence à diminuer.
- Nous pouvons donc d'une part comparer la durée des paliers entre les deux maquettes et d'autre part continuer à déterminer et comparer la constante de temps pour les 2 maquettes (à partir de la fin du palier).
- Après avoir échangé avec un prof de Physique de prépa PTSI/PT, nous avons décidé de tourner notre travail vers une physique plus rigoureuse et d'étudier la thermodynamique de nos maquettes.



La résistance thermique :

- Nous avons ainsi calculé la résistance thermique de nos 2 maquettes afin de pouvoir les comparer et déterminer laquelle était la plus isolante.
- Pour calculer leur résistance thermique (en K/W), nous avons du calculer :
 - La conduction thermique du mur grâce à la loi de Fourier : $R_{\text{mur}} = \frac{e}{\lambda S}$
 - La conducto-convexion entre le mur et l'air avec la Loi de Newton : $R_{\text{cc}} = \frac{1}{hS}$
- La résistance totale de notre glacière correspond à l'addition de ces deux éléments :

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{mur}} + R_{\text{cc}} = \left(\frac{1}{S}\right) \left(\frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h}\right)$$



Grandeurs physiques :

- e -> épaisseur du mur (en m)
- S -> surface (en m^2)
- λ -> conductivité thermique (en $W/(m \cdot K)$)
- h -> coefficient de convection thermique (en W/m^2)

Calcul de la résistance thermique (1) :

Mesures des maquettes :

↳ Pour les deux :

- $R_m = 18 \text{ cm}$
- $d = 20 \text{ cm}$
- $R = 10 \text{ cm}$

↳ maquette 1 :

- $e_1 = 2,0 \text{ cm} = 2,0 \times 10^{-2} \text{ m}$

↳ maquette 2 :

- $e_2 = 4,5 \text{ cm} = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}$

↳ Surface des maquettes :

$$\begin{aligned} \bullet S_1 = S_2 &= 2\pi R R_m \\ &= 2\pi \times 10 \times 10^{-2} \times 20 \times 10^{-2} \\ &= \underline{1,1 \times 10^{-1} \text{ m}^2} \end{aligned}$$

Calcul R_{mur} :

• Prenons $\lambda_{\text{mortier}} = 0,93 \text{ W/(m.K)}$

et $\lambda_{\text{calcaire}} = 1,7 \text{ W/(m.K)}$

$$R_{\text{mur}} = \frac{e}{\lambda S}$$

Notre maquette étant faite de mortier et de calcaire, on calcule

λ_M la moyenne de λ_{mortier} et

$\lambda_{\text{calcaire}}$:

$$\begin{aligned} \lambda_M &= \frac{\lambda_{\text{mortier}} + \lambda_{\text{calcaire}}}{2} \\ &= \frac{0,93 + 1,7}{2} \\ &= \underline{1,3 \text{ W/(m.K)}} \end{aligned}$$

• Maquette 1 :

$$\begin{aligned} R_{1,\text{mur}} &= \frac{e_1}{\lambda_M S} \\ &= \frac{2,0 \times 10^{-2}}{1,3 \times 1,1 \times 10^{-1}} \\ &= \underline{1,4 \times 10^{-2} \text{ K.W}^{-1}} \end{aligned}$$

• Maquette 2 :

$$\begin{aligned} R_{2,\text{mur}} &= \frac{e_2}{\lambda_M S} \\ &= \frac{4,5 \times 10^{-2}}{1,3 \times 1,1 \times 10^{-1}} \\ &= \underline{3,1 \times 10^{-1} \text{ K.W}^{-1}} \end{aligned}$$

Calcul de la résistance thermique (2) :

Calcul R_{cc} :

• Prenons $h = 7,5$ car

$$5 \leq h \leq 10$$

$$R_{cc} = \frac{1}{hS}$$

OR $S_1 = S_2$ donc :

$$R_{cc1} = R_{cc2} = \frac{1}{hS}$$
$$= \frac{1}{7,5 \times 1,1 \times 10^{-1}}$$

$$= \boxed{1,2 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

Calcul R_{TOT} :

$$R_{TOT,1} = R_{2,mur} + R_{cc1}$$

$$= 1,4 \times 10^{-2} + 1,2$$

$$= \boxed{1,34 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$R_{TOT,2} = R_{2,mur} + R_{cc2}$$

$$= 3,1 \times 10^{-2} + 1,2$$

$$= \boxed{1,51 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$\text{Donc } R_{TOT,1} < R_{TOT,2}$$

Conclusion :

- La résistance thermique la plus élevée est celle de la maquette 2 qui est la plus épaisse, c'est donc la maquette la plus isolante.
- Le fait d'avoir une épaisseur 2 fois plus grande modifie de 10% la résistance thermique.

Ce ne sont que des fonctions affines :

- $\frac{dm}{dt} = \frac{T_{\text{glace}} - T_{\text{terre}}}{R \times L_f}$ donc $m(t) = m_0 - \frac{T_{\text{terre}}}{R \times L_f} t$
- Nos fonctions sont donc des fonctions affines.
- Or au cours du temps, le volume de glace dans la glacière diminue, il y a donc plus d'air dans la maquette et la résistance thermique de celle-ci diffère ce qui explique pourquoi nos graphiques ressemblent à des exponentielles.

Grandeurs physiques :

- m_0 (en kg)
- t (en s)
- $T_{\text{glace}} = 0$ (en °C)
- T_{terre} (en °C)
- L_f : chaleur latente de fusion (en J/kg)
- R : la résistance de notre glacière (en W/K)

Modélisation de nos formules :

- ▶ On utilise nos formules de physique pour notre modélisation :

```
Entrée[1]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# =====
# DIMENSIONS RÉELLES
# =====

# Dimensions du cylindre
R_int = 0.10 # m
R_ext = 0.125 # m
H = 0.20 # m

# Surface de paroi
A_lat = 2 * np.pi * R_ext * H # surface latérale
A_top = np.pi * R_ext**2 # couvercle
A_bot = A_top # dessous
A_eff = A_lat + A_top + A_bot # total

print("Surface effective A_eff =", A_eff, "m²")

# Paroi : calcaire + mortier => conductivité moyenne ~1 W/m/K
k = 1.0
e = 0.025 # épaisseur 2,5 cm

R_th = e / k
print("Résistance thermique R_th =", R_th, "K/W")

# =====
# GLACE
# =====

# Dimensions du bloc de glace 10 x 10 x 18 cm
V_ice = 0.1 * 0.1 * 0.18
rho_ice = 917 # kg/m3
m0 = rho_ice * V_ice

print("Masse initiale m0 =", m0, "kg")

# =====
# FONTE
# =====

T_ext = 25.0 # température extérieure, à ajuster
L_f = 334000 # chaleur latente J/kg

# Flux thermique entrant
Q_dot = A_eff * T_ext / R_th
print("Flux thermique Q_dot =", Q_dot, "W")

# Débit de fonte
dm_dt = -Q_dot / L_f # kg/s
print("Vitesse de fonte =", dm_dt*3600, "kg/h")
```

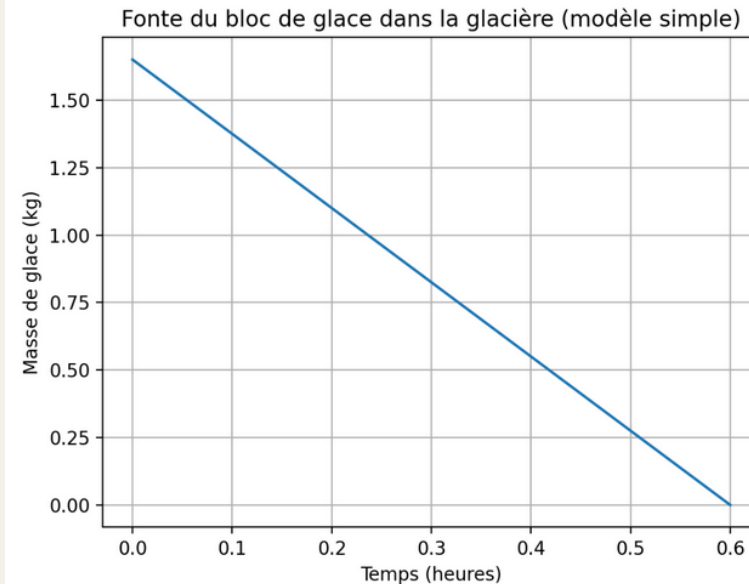
```
# =====
# SIMULATION
# =====

t_max = abs(m0 / dm_dt)
t = np.linspace(0, t_max, 500)
m = m0 + dm_dt * t

plt.plot(t/3600, m)
plt.xlabel("Temps (heures)")
plt.ylabel("Masse de glace (kg)")
plt.title("Fonte du bloc de glace dans la glacière (modèle simple)")
plt.grid()
plt.show()

Surface effective A_eff = 0.2552544031041707 m²
Résistance thermique R_th = 0.025 K/W
Masse initiale m0 = 1.6506000000000003 kg
Flux thermique Q_dot = 255.25440310417068 W
Vitesse de fonte = -2.751245063398247 kg/h
```

Figure 1



Conclusion :

- Certains de nos objectifs ont été atteints :
 - Nous avons réalisé 2 maquettes que nous testons régulièrement
 - Nous avons pu analyser et modéliser la fonte de la glace à l'intérieur de nos maquettes grâce aux données récoltées lors de nos expériences.
 - Nos modèles sont cohérents
 - Nous avons comparé l'isolation de nos 2 maquettes entre elles et déterminé que la maquette la plus épaisse était en effet plus isolante.
- Mais il nous reste encore du travail ! Nous n'avons pas encore comparé l'isolation de nos maquettes à de vraies glaciers du 18^{ème} siècle !

Remerciements :

- Nous souhaitons remercier pour leur aide et leur participation dans la réalisation de ce projet :
 - M. Le Bars, professeur de physique en prépa PTSI/PT dans notre lycée.
 - M. Maghdissian, professeur de science de l'ingénieur en prépa PTSI/PT dans notre lycée.
 - Francine Noël et MassyStoric qui nous ont permis de visiter la glacière de Massy situé dans le parc du château de Vilgénis.
 - M. Andreau, enseignant en MIC qui nous a aidé pour l'installation de la maquette.
 - Wissam BOUZIDI, élève de BTS, ainsi que Dewi CHRISTIAN et Aurèle JOUSSELME, anciens élèves de terminale qui nous ont aidés et ont travaillé sur la partie électronique de notre maquette.