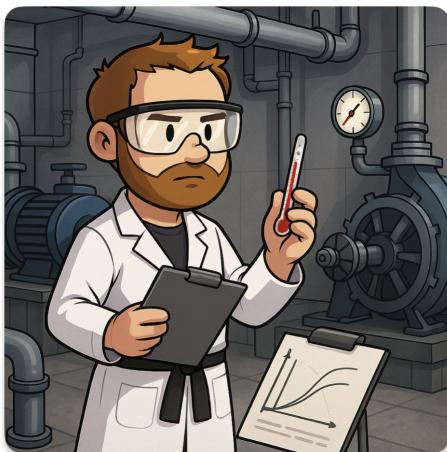


L'ÉNERGIE - CONVERSION ET TRANSFERT

Cours

v1.0

Lycée de Cachan – 63 Avenue du Président Wilson 94230 Cachan - Académie de Créteil



Compétences visées:

- Prévoir le sens d'un transfert thermique.
- Distinguer, dans un bilan d'énergie, le terme correspondant à la variation de l'énergie du système des termes correspondant à des transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.
- Exploiter l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible en fonction de sa capacité thermique et de la variation de sa température pour effectuer un bilan énergétique.
- Procéder à l'étude énergétique d'un système thermodynamique.
- Décrire les trois modes de transfert thermique : **conduction, convection, rayonnement**.
- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.
- Effectuer un bilan d'énergie pour un système incompressible échangeant de l'énergie par un transfert thermique modélisé à l'aide de la loi de Newton fournie. Établir l'expression de la température du système en fonction du temps.

Exercices :

- Cuisine d'étudiants
- Cuisiner sans four
- Transfert thermique classique
- Température au sein d'un igloo - *Bac CA 2025*
- Refroidissement d'un objet
- Température dans une bouteille isotherme - *Bac Polynésie 2 2022*

Table des matières

I Énergie interne et capacité thermique des systèmes incompressibles	3
A Énergie interne et premier principe de la thermodynamique	3
A-1 Principe de Lavoisier	3
A-2 Non conservation de l'énergie mécanique	3
B Premier principe de la thermodynamique	5
C Système incompressible et capacité thermique	5
 II Modes de transfert thermique	 8
A Transfert thermique par conduction	9
A-1 Définition	9
A-2 Flux thermique et résistance thermique	9
B Transfert Conducto-Convectif	13
B-1 Définition	13
B-2 Loi phénoménologique de Newton	13
B-3 Évolution thermique d'un système au contact d'un thermostat	13

En mécanique, on a étudié des mouvements en ne tenant compte que des actions extérieures appliquées au système. En réalité, le système peut subir des variations internes d'énergie, notamment en fonction des variations de température et pression internes. L'étude de ces phénomènes est appelée la **thermodynamique**.

I Énergie interne et capacité thermique des systèmes incompressibles

A Énergie interne et premier principe de la thermodynamique

A-1 Principe de Lavoisier

Rappel

L'énergie totale d'un système isolé reste constante. C'est Antoine Lavoisier, chimiste français qui l'énonça en premier via sa célèbre phrase :

Rien ne perd, rien ne se crée, tout se transforme.

Antoine Lavoisier est guillotiné des suites de la révolution française, il aurait demandé un report pour finir une expérience, ce à quoi on lui a répondu : « *La République n'a pas besoin de savants, ni de chimistes ; le cours de la justice ne peut être suspendu* »



FIGURE 1 – Antoine Lavoisier, (1743 - 1794) - Wikipédia

A-2 Non conservation de l'énergie mécanique

Propriété : Faire un bilan d'énergie

Faire un bilan d'énergie consiste à compter l'énergie initiale du système, et d'y soustraire l'énergie finale.

$$\Delta E = E_{\text{tot}}^{\text{final}} - E_{\text{tot}}^{\text{initial}}$$

Si $\Delta E = 0$ alors l'énergie se conserve.

Exemple

Un solide de masse m glisse sur un plan incliné rugueux, sans vitesse initiale, depuis une hauteur h .

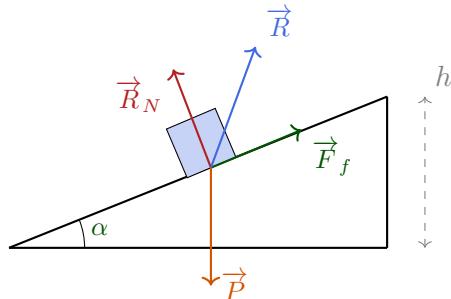


FIGURE 2 – Cube glissant sur un plan incliné

Faisons un bilan d'énergie sur notre cas d'étude :

L'énergie mécanique initiale du système est décrite comme :

Lorsqu'il arrive en bas du plan, **le cube s'arrête.**

L'énergie mécanique finale du système est alors :

Nous pouvons faire le bilan :

L'énergie mécanique n'est pas conservée.

Attention : Rien ne se perd...

Cette diminution ne signifie pas que l'énergie a disparu. Elle a été **transformée**.

Définition : Énergie interne

Pour retrouver une conservation globale, il faut élargir le bilan :

$$E_{\text{tot}} = E_c + E_{pp} + \mathbf{U} = \text{constante}$$

où U est l'**énergie interne**, est forme d'énergie liée à l'agitation microscopique de la matière.

B Premier principe de la thermodynamique

❖ Propriété : Premier principe

La variation d'énergie interne ΔU d'un système fermé est égale à la somme du travail W des forces extérieures et de la chaleur Q échangée avec l'extérieur :

$$\Delta U = Q + W$$

⚠ Attention : Signes !

Convention portefeuille

- Le signe de Q est positif si le système reçoit de l'énergie thermique, il sera négatif s'il donne de l'énergie thermique.
- Le signe de W est positif si le système reçoit du travail, il sera négatif s'il en donne.

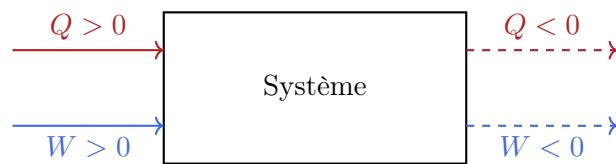


FIGURE 3 – Schéma convention portefeuille

💡 Remarque

Cette loi permet de généraliser le théorème de l'énergie mécanique quant à la conservation de l'énergie d'un système. La variation totale d'énergie d'un système, s'il est en mouvement, est donc :

$$\Delta E = \Delta E_m + \Delta U$$

C Système incompressible et capacité thermique

▣ Définition : Système incompressible

On dit qu'un système est incompressible lorsqu'il ne subit pas de **variation de volume**. On peut en général faire cette hypothèse pour les **liquides et les solides**. Dans ce cas :

- Le travail $W = 0$.
- La variation d'énergie interne $\Delta U = Q$

Propriété : Transfert thermique pour un système incompressible

Lorsqu'un système thermodynamique incompressible subit un transfert thermique, sa variation d'énergie interne ΔU est proportionnelle à la variation de température ΔT :

$$\Delta U = Q = C\Delta T = m.c.\Delta T$$

avec :

- C la capacité thermique ($J.K^{-1}$)
- m la masse du système incompressible (kg)
- ΔT la variation de température (K ou C)
- c la capacité thermique massique ($J.K^{-1}.kg^{-1}$)

Définition : Capacité thermique ou capacité thermique massique ?

On définit aussi la capacité thermique massique comme l'énergie à fournir au système pour éléver la température de 1 degré par $1kg$:

$$C = mc$$

Exercice 1 Cuisine d'étudiant (★)

Un étudiant souhaite chauffer 2 L d'eau de $20^{\circ}C$ à $100^{\circ}C$.

Q1 Quelle est la variation d'énergie interne de l'eau ?

Données

Capacité thermique massique de l'eau : $c_e = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

**Exercice 2** Cuisiner sans four (★ ★)

Un cuisinier est embarrassé car son four est cassé et il lui reste encore un poulet à faire cuire... Maîtrisant son premier principe de la thermodynamique, il décide d'utiliser une option originale, il gifle le morceau de poulet à maintes reprises.

On suppose que le poulet a une masse de 1,0 kg et que sa température initiale est de 20 °C. On souhaite l'amener à une température de 75 °C, température de cuisson à cœur.



FIGURE 4 – Cuisinier frappant le poulet

Q1 Calculer la variation d'énergie interne ΔU nécessaire pour chauffer le poulet de 20 °C à 75 °C.

Q2 En admettant que les gifles soient parfaitement efficaces (toute l'énergie du travail est transmise au poulet sans perte), combien faut-il fournir de travail pour atteindre cette température ?

Q3 On estime qu'une gifle énergique transfère environ 150 J de travail mécanique au poulet. Combien de gifles faudrait-il donner pour le cuire ?

Q4 Un four électrique a une puissance de 2000 W. En supposant que toute cette puissance serve à chauffer le poulet sans perte, combien de temps (en secondes puis en minutes) faudrait-il pour transférer la même énergie que celle calculée à la question 1 ?

☰ Données

- Lien entre l'énergie et la puissance $E = P \times \Delta t$.
- La capacité thermique massique moyenne de la chair est estimée à $c = 2,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

II Modes de transfert thermique

☰ Définition : Transfert thermique

Un transfert thermique est un transfert d'énergie thermique (chaleur) qui se fait toujours d'une source chaude, vers une source froide.



FIGURE 5 – Schéma du transfert thermique

PropertyParams : Différents modes de transferts thermiques

Il existe trois modes de transferts thermiques :

- **Conduction thermique** : transfert d'énergie sans déplacement de matière, par interaction entre particules.
- **Conducto-Convection** : transfert d'énergie avec déplacement macroscopique de matière (dans les fluides).
- **Rayonnement** : transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques.

A Transfert thermique par conduction

A-1 Définition

Définition : Transfert thermique par conduction

Un transfert thermique par conduction est un transfert de chaleur qui se fait par **contact direct** entre deux systèmes thermodynamiques.

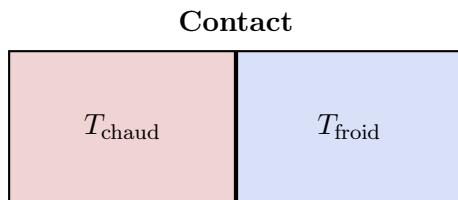


FIGURE 6 – Transfert thermique par conduction

A-2 Flux thermique et résistance thermique

Définition : Flux et résistance thermique

Le flux thermique est un indicateur de la rapidité et de l'intensité du transfert de chaleur entre deux systèmes en contact.

$$\phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} \quad \text{avec} \quad R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S}$$

avec :

- ϕ : flux thermique (W),
- $\Delta T = T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$: écart de température (K ou °C),
- R_{th} : résistance thermique du matériau ($\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$).



Exercice 3 Transfert thermique classique (★)

Une plaque de métal de surface $S = 0,050 \text{ m}^2$, d'épaisseur $e = 2,0 \text{ cm}$, est soumise à un écart de température de $\Delta T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. La conductivité thermique du métal est $\lambda = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Q1 Calculer la résistance thermique R_{th} du système A.

Q2 En déduire le **flux thermique** ϕ qui traverse la plaque.

**Exercice 4****Température au sein d'un igloo - Bac CA 2025 (★)**

Les habitants des régions polaires comme les Inuits savent qu'un abri constitué de neige (igloo, quinzee, hutte, abri sous arbre, trou à neige, etc.) offre un rempart efficace contre le froid. Nous allons nous intéresser ici au cas de l'igloo. L'objectif est de comparer l'évolution de la température au sein de l'igloo dans différentes situations.



FIGURE 7 – Igloo

☰ Données

- L'igloo est modélisé par une demi-sphère creuse d'aire de surface extérieure $S = 9,0 \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$;
- L'aire intérieure est également S ;
- On néglige les transferts thermiques avec le sol et la fonte de la paroi;

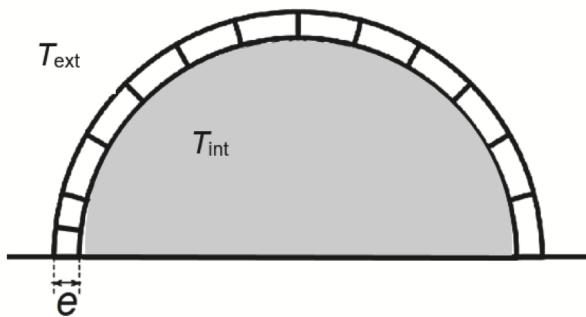


FIGURE 8 – Schéma de l'igloo

- La résistance thermique est donnée par :

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

- La température extérieure $T_{\text{ext}} = -30^\circ\text{C}$;
- Le système étudié est l'air intérieur à température homogène T_{int} ;
- La personne dans l'igloo dégage un flux thermique $\Phi_1 = 13 \text{ MJ/jour}$;
- $\lambda = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Q1 Citer les trois modes de transferts thermiques.

Q2 Montrer que le flux thermique produit par la personne est d'environ 150 W.

Q3 Déterminer le sens de variation de la résistance thermique d'une paroi d'épaisseur e lorsque la conductivité thermique du matériau constituant celle-ci augmente.

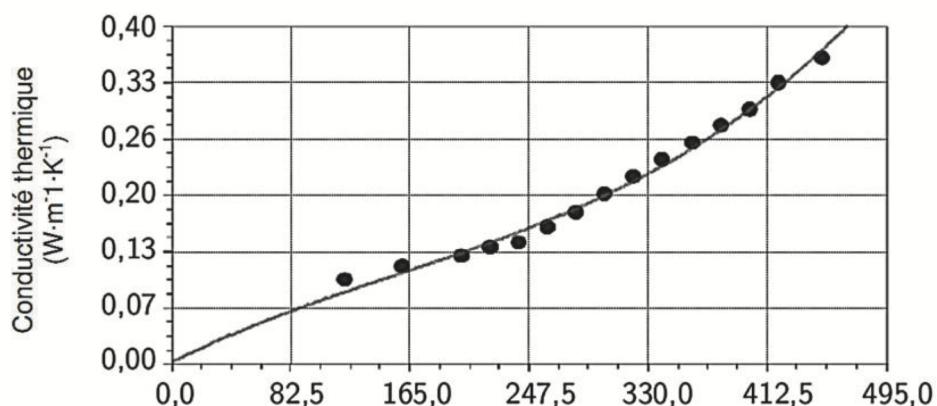


FIGURE 9 – Évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique

Q4 Discuter, à l'aide de la figure ci-dessus, de l'efficacité de l'isolation thermique de la paroi de l'igloo si la neige a été très tassée lors de la réalisation de l'igloo. Proposer une explication.

Dans les questions suivantes, on s'intéresse à l'évolution de la température T_{int} à l'intérieur de l'igloo. On considère une neige de conductivité thermique $\lambda = 0,15 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$

Q5 Rappeler la relation entre le flux thermique traversant une paroi, la différence de température de part et d'autre de la paroi et la résistance thermique de la paroi. Déterminer la valeur de ϕ_2 , le flux thermique sortant à travers la paroi de l'igloo, pour une température intérieure initialement égale à $T_{int} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Q6 Déterminer par un raisonnement qualitatif si la température intérieure T_{int} va diminuer, augmenter ou stagner en comparant les flux ϕ_1 et ϕ_2 .

À la suite d'une chute de neige, l'igloo est désormais recouvert de $e' = 3,0\text{cm}$ de neige fraîche, appelée poudreuse, de conductivité thermique $\lambda' = 0,040 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$.

Q7 On suppose que l'aire S n'a pas varié. Montrer que la valeur de la nouvelle résistance thermique de l'igloo est environ $R'_{th} = 0,27\text{KW}^{-1}$.

Q8 Vérifier qu'alors la valeur de la température à l'intérieur de l'igloo lorsque **l'équilibre thermique** est atteint est d'environ $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Discuter des hypothèses simplificatrices indiquées dans les données de l'exercice.

B Transfert Conducto-Convection

B-1 Définition

Définition : Transfert Conducto-Convection

Un transfert thermique **conducto-convection** est un transfert de chaleur qui se fait par contact direct entre un système thermodynamique solide et un fluide. La chaleur se transfère alors par déplacement des molécules.

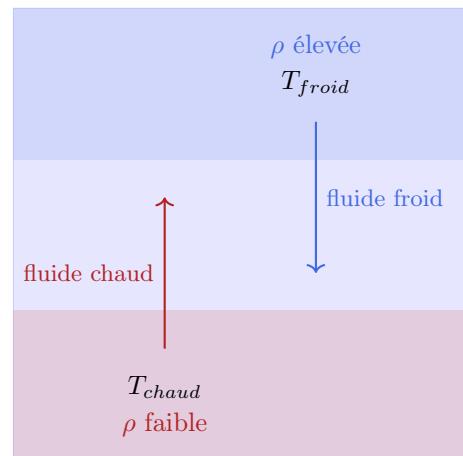


FIGURE 10 – Transfert conducto-convectif

B-2 Loi phénoménologique de Newton

Définition : Loi phénoménologique de Newton

La **loi phénoménologique de Newton** décrit la puissance thermique $\varphi(t)$ échangée par conduction-convection entre un solide et un fluide en contact via une surface S :

$$\varphi(t) = hS(T_{\text{ext}} - T(t))$$

- $\varphi(t)$: puissance thermique (en W),
- h : coefficient de transfert conducto-convection (en $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$),
- S : surface d'échange (en m^2),
- T_{ext} : température du fluide extérieur (en K),
- $T(t)$: température du système au temps t (en K).

B-3 Évolution thermique d'un système au contact d'un thermostat

Définition : Thermostat

Un **thermostat** est un système dont la température reste constante lors des échanges thermiques (capacité thermique très grande).

**Exercice 5****Refroidissement d'un objet (★ ★)**

Soit un système thermodynamique solide (incompressible), de capacité thermique C , plongé dans un fluide de température constante T_{ext} , ayant une surface S de contact avec le fluide. On considère l'évolution de la température T de ce système entre un instant t et un instant plus tard $t + \Delta t$.

Q1 Que vaut le travail W appliqué sur le système ?

Q2 Énoncer le premier principe de la thermodynamique au temps t , puis au temps $t + \Delta t$.

Q3 En déduire ΔU la variation d'énergie interne entre le temps t et le temps $t + \Delta t$.

Q4 Quelle est la formule reliant ΔU , $\phi(t)$ et Δt ?

Q5 A partir des réponses précédentes ainsi que de la **loi phénoménologique de Newton**, montrer que :

$$C \times \frac{T(t + \Delta t) - T(t)}{\Delta t} = hS \times (T_{ext} - T(t))$$

Q6 Que devient l'expression précédente lorsque $\Delta t \rightarrow 0$?

Q7 En déduire une équation différentielle sur $T(t)$ et la résoudre.

Propriété : Equation d'évolution de la température

Lorsqu'un système de capacité thermique C est plongé dans un fluide à température constante T_{ext} , la température $T(t)$ du système évolue selon l'équation différentielle :

$$\frac{T(t)}{t} + \frac{hS}{C} T(t) = \frac{hS}{C} T_{\text{ext}}$$

où :

- h est le coefficient de transfert conducto-convectif (en $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$),
- S la surface de contact (en m^2),
- C la capacité thermique du système (en $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$).

La solution de cette équation différentielle, si la température initiale du système est T_0 , est :

$$T(t) = T_{\text{ext}} + (T_0 - T_{\text{ext}}) e^{-t/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{C}{hS}$$

où τ est le **temps caractéristique** d'évolution (en secondes).

Définition : Temps caractéristique

La valeur τ correspond au temps mis par le système pour que l'écart de température ait diminué d'un facteur e (environ 37 % de sa valeur initiale), ou équivalement pour atteindre environ 63 % de la variation totale.

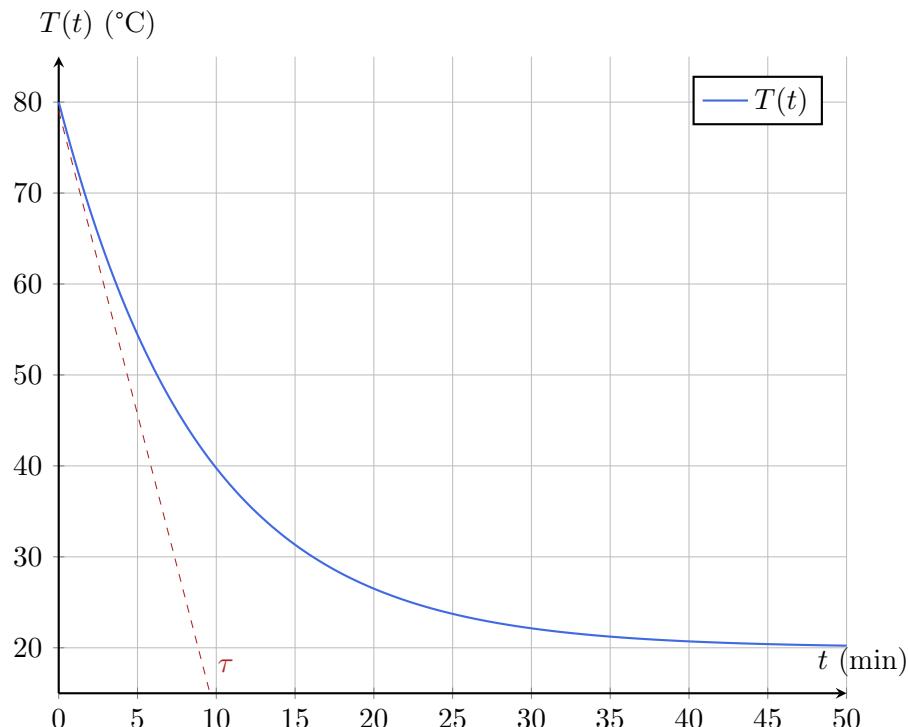


FIGURE 11 – Évolution de la température et constante de temps

Exercice 6**Température dans une bouteille isotherme - Bac Polynésie 2 2022 (★ ★)**

Une bouteille isotherme est bien utile en milieu froid, en montagne par exemple. Cela permet de se réchauffer, de conserver de l'eau chaude pour un repas ultérieur. Le matin par exemple, il peut être inutile de rallumer le réchaud, si la veille, on a fait chauffer l'eau pour le lendemain.

D'après <https://www.expemag.com/article/hydratation/test-thermos>

On modélise l'évolution de la température à l'intérieur d'une bouteille isotherme en fonction du temps, sachant qu'on verse de l'eau à $T_{\text{ini}} = 92^\circ\text{C}$ dans la bouteille isotherme, puis qu'on place la bouteille dans une pièce de température constante $T_{\text{ext}} = 12^\circ\text{C}$. On mesure au cours du temps avec une sonde thermométrique la température de l'eau sans ouvrir la bouteille.

Q1 Citer les trois modes de transfert thermique.

Q2 Indiquer le mode du transfert thermique à travers la paroi de la bouteille et son sens.

On suppose que l'équation différentielle suivante modélise l'évolution de la température $T(t)$ de l'eau à l'intérieur de la bouteille isotherme en fonction du temps :

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (T_{\text{ext}} - T(t))$$

Q3 Déterminer la dimension de la constante τ en la justifiant.

La température de l'eau en fonction du temps, solution de cette équation différentielle, est de la forme :

$$T(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + B$$

avec A , B et τ des constantes. L'origine des temps $t = 0$ est choisie au moment où l'eau, à la température initiale $T_{\text{ini}} = 92^\circ\text{C}$, est versée.

Q4 Établir les expressions de A et B en fonction de la température initiale T_{ini} et de la température extérieure T_{ext} , puis calculer leurs valeurs.

La modélisation de l'évolution de la température $T(t)$ de l'eau en fonction du temps dans la bouteille isotherme est représentée ci-dessous :

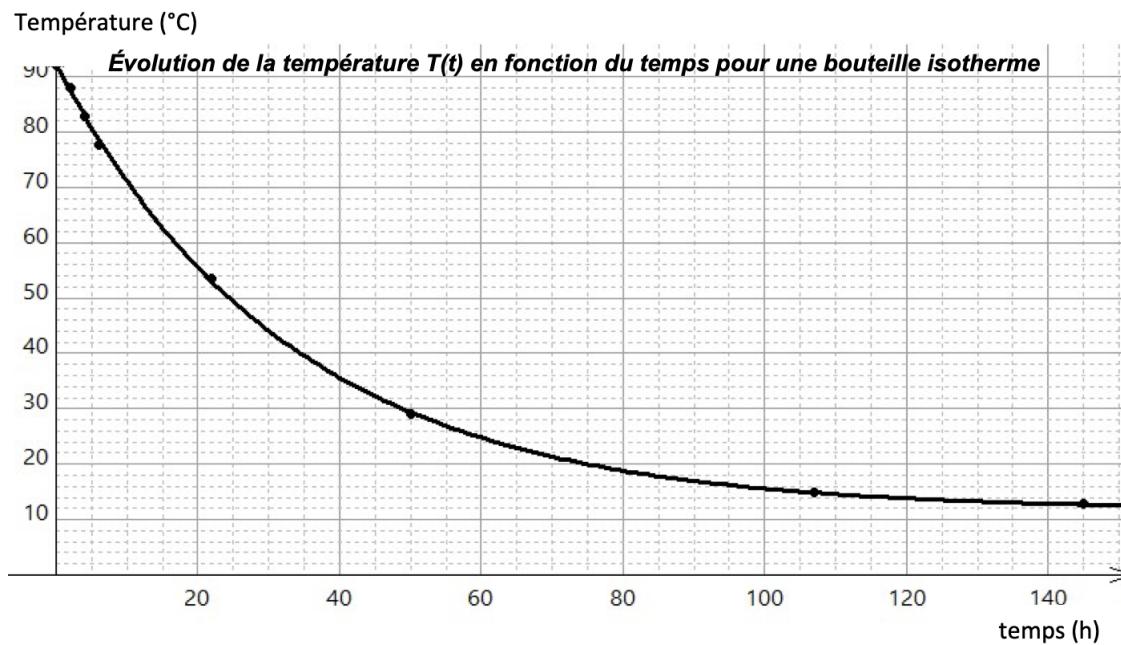


FIGURE 12 – Évolution de la température $T(t)$ en fonction du temps pour une bouteille isotherme

Q5 Positionner T_{ini} et T_{ext} sur le graphique représenté ci-dessus.

Q6 Montrer, par une méthode graphique, que la valeur de τ est d'environ 35 heures.

Indication : On peut déterminer τ graphiquement en trouvant le temps pour lequel la température atteint environ 63 % de l'écart initial entre T_{ini} et T_{ext} .

Lors d'une randonnée en montagne, une bouteille isotherme différente est utilisée. Elle est caractérisée par une valeur de $\tau = 51,2$ h. De l'eau à haute température est versée dans la bouteille le soir à 21 h. La loi de décroissance thermique est toujours valable :

$$T(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + B$$

Les nouvelles conditions donnent :

$$A = 78 \text{ } ^\circ\text{C} ; B = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Q7 Sachant que pour faire infuser un thé, la température de l'eau doit être supérieure à $70 \text{ } ^\circ\text{C}$, calculer jusqu'à quelle heure le lendemain matin il est possible de faire infuser un thé. Conclure.

Les candidats sont invités à prendre des initiatives, notamment sur les valeurs numériques éventuellement manquantes, et à présenter clairement la démarche suivie, même si elle n'a pas abouti.

