

# Chapitre 17 : Thermodynamique

## Extrait programme Tspé

Modèle du gaz parfait. Masse volumique, température thermodynamique, pression.	- Relier qualitativement les valeurs des grandeurs macroscopiques mesurées aux propriétés du système à l'échelle microscopique.
Équation d'état du gaz parfait.	- Exploiter l'équation d'état du gaz parfait pour décrire le comportement d'un gaz.
Énergie interne d'un système.	- Identifier quelques limites du modèle du gaz parfait.
Aspects microscopiques.	- Citer les contributions microscopiques à l'énergie interne d'un système.
Premier principe de la thermodynamique. Transfert thermique, travail.	- Prévoir le sens d'un transfert thermique.
Capacité thermique d'un système incompressible.	- 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.
Énergie interne d'un système incompressible.	- 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.
Modes de transfert thermique	- <i>Effectuer l'étude énergétique d'un système thermodynamique.</i>
Flux thermique. Résistance thermique.	- Caractériser qualitativement les trois modes de transfert thermique : conduction, convection rayonnement.
Bilan thermique du système Terre-atmosphère. Effet de serre.	- Exploiter la relation entre flux thermique, résistance thermique et écart de température, l'expression de la résistance thermique étant donnée.
Loi phénoménologique de Newton, modélisation de l'évolution de la température d'un système au contact d'un thermostat.	- Effectuer un bilan quantitatif d'énergie pour estimer la température terrestre moyenne, la loi de Stefan-Boltzmann étant donnée.
	- Discuter qualitativement de l'influence de l'albédo et de l'effet de serre sur la température terrestre moyenne.
	- 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.
	- <i>Suivre et modéliser l'évolution de la température d'un système incompressible.</i>

## I- Le modèle du gaz parfait

### 1- Lien entre grandeurs macroscopiques et microscopiques

Afin de décrire un fluide, et plus spécifiquement un gaz, on utilise plusieurs grandeurs macroscopiques, qui traduisent des comportements à l'échelle microscopique.

À l'échelle macroscopique	Origine microscopique
<b>La masse volumique <math>\rho</math></b> <u>Unité</u> : $\text{kg.m}^{-3}$	Quantité de molécules pour un volume donné, liée à la distance entre les molécules.
<b>La pression <math>p</math></b> <u>Unité</u> : Pascal (Pa)	Chocs des molécules de gaz sur les parois du système. Plus le nombre de chocs est important, plus la pression est importante.
<b>La température <math>T</math></b> <u>Unité</u> : Kelvin (K) <u>Rq</u> : $T(\text{K}) = \theta (\text{°C}) + 273,15$	Agitation désordonnée des molécules. Plus l'agitation est importante, plus la température est élevée. <u>Rq</u> : 0 K est la température où toutes les molécules sont immobiles, c'est la température la plus basse qui existe, on l'appelle le zéro absolu.

## 2- Le modèle du gaz parfait et ses limites

La notion de gaz parfait est une modélisation simplifiée de la réalité qui satisfait deux critères concernant les molécules constituant le gaz :

- elles sont assimilées à des points matériels (on néglige leur volume).
- elles n'ont pas d'interaction les unes avec les autres (on ne considère que les chocs sur les parois).

Ce modèle fonctionne bien lorsque les molécules du gaz sont espacées, c'est-à-dire lorsque la pression du système est faible, mais aussi lorsque la température n'est pas trop basse.

Par ailleurs, pour certains gaz, il existe des interactions importantes entre les molécules : les ponts hydrogène et les liaisons de Van Der Waals par exemple. Dans ce cas, il faut utiliser un autre modèle qui tient mieux compte de ces paramètres.

## 3- L'équation d'état du gaz parfait

Il existe une équation d'état simple qui décrit le comportement d'un gaz parfait : On considère un système contenant une quantité de matière  $n$  de gaz (en mol), à la pression  $p$  (en Pa), occupant un volume  $V$  (en  $\text{m}^3$ ) à la température  $T$  (en K).

$$p \times V = n \times R \times T$$

$R$  est appelé constante des gaz parfaits et vaut  $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ .

### Remarques :

- Lorsque la température  $T$  et la quantité de matière  $n$  sont constantes, on retrouve la loi de Mariotte :  $p \times V = \text{constante}$  vue en 1<sup>ère</sup> spé.
- Le produit  $p \times V$  est homogène à une énergie en Joule.

Application : n°25 p 446

Applications en autonomie : n°24 p 446, n°36 p447, n°23 p 445 (partie 2 – corrigé détaillé), n°38 p 447

## II- Le premier principe de la thermodynamique

### 1- L'énergie interne

L'énergie d'un système se décompose en :

- Énergies microscopiques :
  - o Énergie cinétique des particules composant le système, en mouvement du fait de leur agitation thermique
  - o Énergies potentielles d'interactions électromagnétiques entre atomes (liaisons au sein des molécules), entre ions (cohésion dans un cristal ionique), ou entre molécules (interactions de Van Der Waals ou ponts hydrogènes)
- Énergies macroscopiques :
  - o Énergie cinétique du système s'il est en mouvement
  - o Énergies potentielles du système en interaction avec son environnement

L'énergie interne d'un système est notée  $U$ . C'est la somme de toutes les énergies microscopiques des particules constituant le système étudié.

$$U = E_{C,micro} + E_{P,micro}$$

Remarque : Pour un gaz parfait, il n'y a aucune interaction entre les molécules.  $E_{P,micro} = 0$  donc  $U = E_{C,micro}$

### 2- Différents transferts de l'énergie

Il est important de bien définir le système étudié et le milieu extérieur afin d'identifier les transferts d'énergie entre les deux.

Par convention, les énergies échangées sont des grandeurs algébriques : elles peuvent être négatives ou positives.

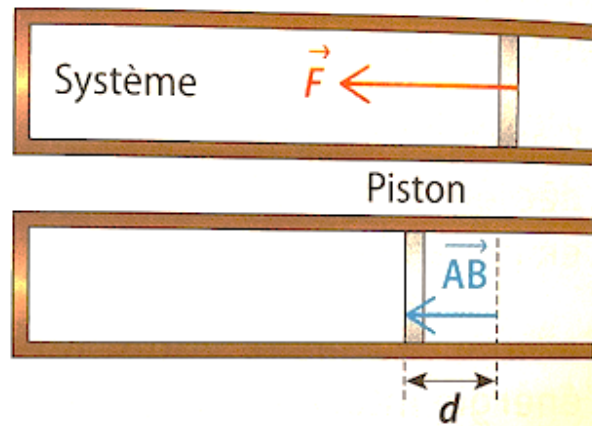
On compte une énergie positive si elle est **reçue** par le système étudié, et on compte une énergie négative si elle est **perdue** par le système étudié.

Il existe deux formes de transferts d'énergie entre le système et l'extérieur.

#### a. Le travail

Le travail  $W$  est un transfert d'énergie qui s'effectue macroscopiquement, par un déplacement du système (il faut que le système étudié soit compressible ou déformable). Il s'exprime en Joule et a été étudié en 1<sup>ère</sup> spé.

Par exemple, lorsqu'un système thermodynamique est au contact d'une pièce mobile, comme une pale d'une roue ou un piston dans un cylindre, il peut recevoir ou céder de l'énergie à l'échelle macroscopique :



Le gaz placé dans le cylindre muni d'un piston mobile. Il y a la force pressante exercée par l'air extérieur sur le piston, que l'on peut calculer par la relation  $F = p \times S$  (avec S surface du piston). Lorsque le piston se déplace d'une distance d, le système {piston + gaz} reçoit un travail dont la valeur est calculée par :  $W = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \times d$ .

### b. Le transfert thermique

Le transfert thermique Q est un transfert d'énergie qui s'effectue microscopiquement entre le système et l'extérieur.

Lorsqu'il existe une différence de température entre eux, ce transfert d'énergie se fait spontanément du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.

La conséquence macroscopique d'un transfert thermique est un changement de température ou un changement d'état physique du système.

### 3- Énoncé du premier principe

Le premier principe s'applique lorsqu'un système n'échange pas de matière avec l'extérieur, qu'il est au repos macroscopique (pas de variation d'énergie cinétique ni variation d'énergie potentielle).

La variation d'énergie interne d'un tel système d'un état  $U_1$  vers un état  $U_2$  est liée au travail W et au transfert thermique Q par la relation :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$$

Toutes les énergies sont exprimées en Joule.

Remarque : Le travail ici exprimé correspond au travail des forces non conservatives éventuellement appliquées.

#### Application : Le fluide frigorigène

Le fluide frigorigène d'un réfrigérateur échange avec des aliments une énergie  $Q_1 = 104 \text{ kJ}$  et échange avec l'extérieur une énergie  $Q_2 = -162 \text{ kJ}$ .

- 1) Indiquer si les énergies sont reçues ou cédées par le fluide en réalisant un schéma.
- 2) En déduire si les aliments se réchauffent ou se refroidissent. Même question pour l'extérieur.
- 3) En supposant sa variation d'énergie interne nulle, déterminer le travail mécanique W reçu par le fluide frigorigène du réfrigérateur.

#### 4- Application : énergie interne d'un système incompressible

On considère un système incompressible (dont le volume reste constant) pour lequel il n'y a pas de changement d'état, ni de transformations chimiques ou nucléaires.

Il ne subit aucun déplacement macroscopique et on peut donc écrire  $W = 0$ .

En appliquant le premier principe de la thermodynamique, il reste :  $\Delta U = Q$

La variation d'énergie interne d'un système incompressible est proportionnelle à la variation de température :

$$\Delta U = m \times c \times \Delta T = m \times c \times (T_f - T_i)$$

$\Delta U$  est en J,  $m$  en kg et  $\Delta T$  en K

$c$  est appelé la capacité thermique massique du système et s'exprime en  $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Elle caractérise sa capacité à stocker ou à céder de l'énergie interne.

#### Remarques :

- Dans les exercices, on utilise parfois la capacité thermique  $C$  en  $\text{J.K}^{-1}$ . Dans ce cas, la formule précédente est transformée en  $\Delta U = C \times \Delta T$ .
- Dans l'application de la formule  $\Delta T$  a la même valeur si  $T_i$  et  $T_f$  sont en degrés Celsius ou en Kelvin. Il n'est donc pas nécessaire de convertir.

[Applications : n°28 p 446, n°30 p 446](#)

### III- Étude des transferts thermiques

#### 1- Différents modes

Il existe trois modes de transfert thermique :

- la **conduction** est un transfert thermique par contact sans transport de matière. D'un point de vue microscopique, les constituants du matériau conducteur communiquent à leurs voisins leur agitation thermique, tout en restant globalement à la même place.
- la **convection** est un transfert thermique porté par un mouvement de matière.
- le **rayonnement** est un transfert thermique qui existe car tout corps chauffé émet un rayonnement électromagnétique. C'est le seul mode de transfert thermique possible dans le vide.

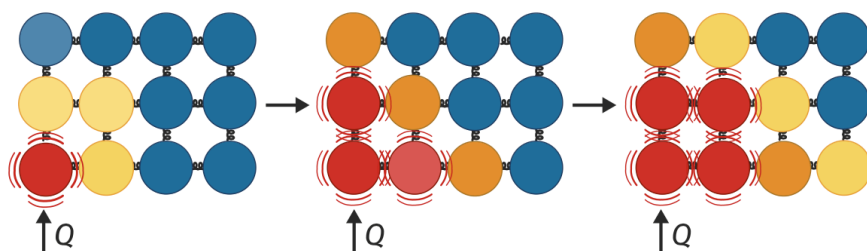

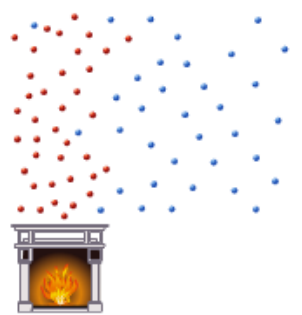
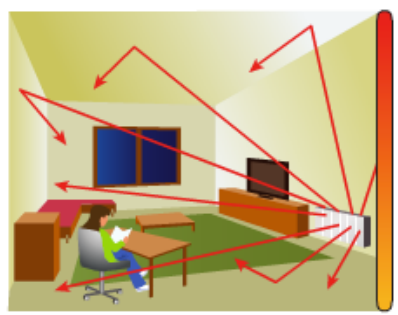


Illustration microscopique de la conduction : l'agitation thermique du corps le plus chaud augmente l'agitation thermique du corps le plus froid, de proche en proche.

Conduction	Convection	Rayonnement
		
<p>L'agitation des atomes est diffusée à partir de la partie chauffée du métal.</p>	<p>L'air chaud se déplace dans la pièce et augmente l'agitation des molécules de l'air froid avec lequel il se mélange.</p>	<p>Le rayonnement émis par une source d'ondes électromagnétiques se propage dans toutes les directions possibles.</p>

## 2- Le flux thermique

Le flux thermique  $\phi$  (phi) correspond à l'énergie thermique échangée par un système avec l'extérieur par unité de temps :

$$\phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

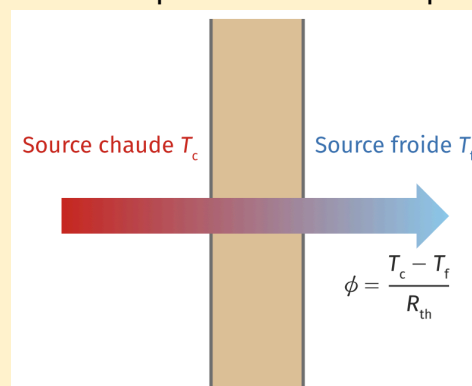
L'énergie  $Q$  s'exprime en Joules (J) et  $\Delta t$  en seconde (s), et  $\phi$  s'exprime en  $J.s^{-1}$ .

### Remarques :

- Le flux thermique est aussi appelé puissance thermique, car il est homogène à une puissance et peut aussi s'exprimer en Watt.
- $Q$  (et donc  $\phi$ ) est une grandeur algébrique, la convention vue dans le paragraphe II-2- s'applique toujours.

## 3- La résistance thermique

Un transfert thermique par conduction peut s'établir à travers une cloison, de la face la plus chaude à la température  $T_C$  vers la face la plus froide à la température  $T_F$ .



Le flux thermique est alors proportionnel à l'écart de température entre les deux faces. On a la relation :

$$\phi = \frac{T_C - T_F}{R_{th}}$$

Les températures s'expriment en K ou en °C

$R_{th}$  est la résistance thermique. C'est une grandeur positive, exprimée en  $K.W^{-1}$ , qui dépend de l'épaisseur de la paroi, de la surface d'échange, mais aussi de la nature du matériau considéré.

Remarque : Un bon isolant thermique est caractérisé par une résistance thermique élevée : le transfert thermique se fera peu.

L'expression de la résistance thermique n'est pas à connaître, elle vaut :

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

Avec  $e$  l'épaisseur de la cloison (en m),  $\lambda_{th}$  la conductivité thermique qui dépend de la nature du matériau (en  $W.K^{-1}.m^{-1}$ ) et  $S$  l'aire de la cloison (en  $m^2$ ).

[Applications](#) : n°32 p 446, n°41 p 447

[Applications en autonomie](#) : n°31 p 446, n°21 p 442 (corrigé détaillé)

## IV- Bilan thermique de la Terre

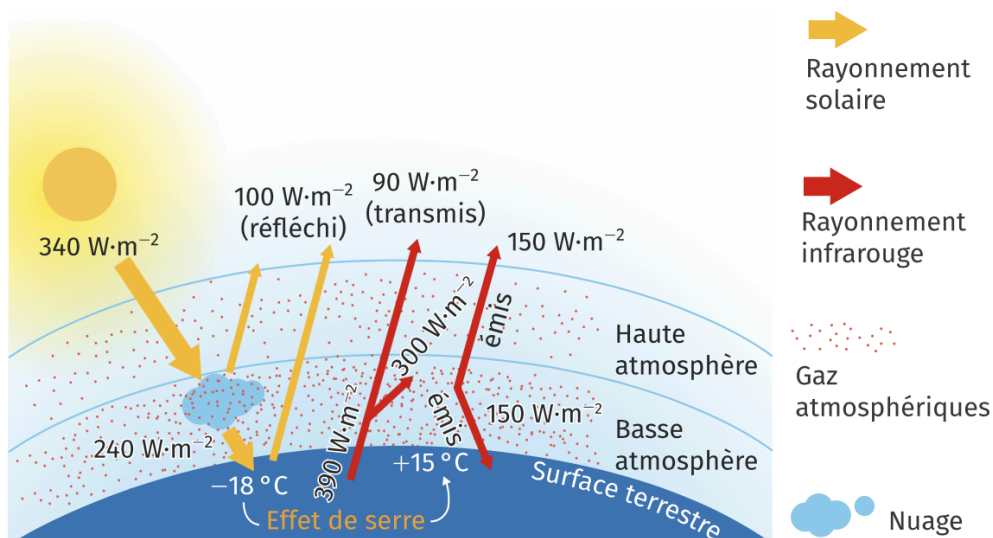
Activité p 432 (activité très calculatoire) à faire à la maison

La loi de Stefan-Boltzmann relie le flux thermique  $\varphi$  (en W) émis par rayonnement d'un corps de surface  $S$  (en  $m^2$ ) à sa température  $T$  (en K) :  $\varphi = \sigma \times S \times T^4$

$\sigma$  est la constante de Stefan Boltzmann  $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$

On peut appliquer cette relation à différents systèmes, comme le Soleil ou la Terre pour en déduire leur température moyenne de surface.

Le rayonnement solaire parvenant jusqu'à la Terre est sa source principale d'énergie thermique. Comme la température moyenne de la surface de la Terre est stable au fil des ans, cela signifie que la surface reçoit en moyenne autant d'énergie thermique qu'elle en émet vers l'espace par son propre rayonnement.



La Terre reçoit un rayonnement solaire dont le flux thermique surfacique moyen est de l'ordre de  $\varphi_s = 340 W.m^{-2}$ . Environ  $A = 30\%$  de ce rayonnement est réfléchi sans être absorbé par l'atmosphère : cette proportion est appelée **albédo**.

Plus l'albédo est élevé, plus le rayonnement solaire est réfléchi et moins la surface de la Terre reçoit d'énergie thermique. Si une partie du rayonnement émis par la Terre n'était pas absorbée par l'atmosphère (principalement dans le domaine des infrarouges), la température à la surface serait d'environ  $-18^\circ C$ . Cette absorption essentiellement due à la présence d'eau  $H_2O$  et de

dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère s'appelle **l'effet de serre**.

Cet effet de serre naturel permet à la surface de la Terre de récupérer une partie de l'énergie qu'elle rayonne, contribuant ainsi à son réchauffement jusqu'à une température moyenne de 15 °C.

Pour information, la vidéo sur le site [hatier-clic.fr](http://hatier-clic.fr) avec le code pct432 explique la notion d'albedo.

[Application](#) : n°34 p 446

## V- Loi phénoménologique de Newton

On cherche à trouver la loi d'évolution de température d'un système lorsqu'il est en contact avec un thermostat, par convection. Cette loi est appelée loi phénoménologique de Newton.

Les hypothèses de travail sur le système sont les suivantes :

- Il est incompressible
- Il est en contact avec le milieu extérieur à travers une surface S.
- Il n'y a pas d'échange de matière avec le milieu extérieur.
- Le système ou le milieu extérieur est un fluide.
- Le principal mode de transfert thermique est la convection dans le fluide
- Le milieu extérieur est un thermostat : sa température T<sub>e</sub> est supposée constante.
- On note T la température du système, cette température évolue au cours du temps t, depuis une température initiale T<sub>i</sub>.
- On note φ le flux thermique convectif

### 1- Établissement de l'équation différentielle

La loi phénoménologique de Newton calcule le flux thermique reçu par la surface S. Cette loi est toujours donnée. On l'appellera **l'équation 1** :

$$\varphi = h \times S \times (T_e - T)$$

S s'exprime en m<sup>2</sup>, T<sub>e</sub> - T s'exprime en K (ou en °C), h est le coefficient d'échange convectif entre le système et le milieu extérieur qui s'exprime en W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>

En écrivant le premier principe de la thermodynamique, appliqué au système on a :

$$\Delta U = Q + W$$

Or le système est incompressible : il n'y a pas de travail, donc W = 0.

Ainsi ΔU = Q

De plus, on a : ΔU = m × c × ΔT

On obtient donc **l'équation 2** :

$$m \times c \times \Delta T = Q$$

D'autre part, le flux thermique est relié à Q par l'expression Q = φ × Δt

En remplaçant φ par son expression dans l'équation 1, on obtient finalement **l'équation 3** :

$$Q = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

En combinant les équations 2 et 3, on a donc :

$$m \times c \times \Delta T = h \times S \times (T_e - T) \times \Delta t$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} &= \frac{h \times S}{m \times c} \times (T_e - T) \\ \rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} + \frac{h \times S}{m \times c} T &= \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e \end{aligned}$$

Lorsque l'on fait tendre  $\Delta t$  vers zéro, la limite de  $\frac{\Delta T}{\Delta t}$  se rapproche de  $T$  par rapport au temps  $t$ .

On obtient alors :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c} T = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e$$

C'est une équation différentielle d'ordre 1 : En effet, on peut mettre l'expression précédente sous la forme :

$$\frac{dT}{dt} + a \times T = b$$

Avec  $a = \frac{h \times S}{m \times c}$  et  $b = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e$

La solution d'une telle équation est de la forme  $T(t) = T_h(t) + T_p$  avec  $T_h(t)$  la solution générale de l'équation homogène et  $T_p$  une solution constante particulière.

## 2- Résolution de l'équation différentielle

### Solution particulière : $T_p$

Si  $T_p$  est solution, alors elle satisfait l'équation différentielle.

$$\frac{dT_p}{dt} = 0 \text{ car } T_p \text{ est une constante.}$$

Il reste  $\frac{h \times S}{m \times c} T_p = \frac{h \times S}{m \times c} \times T_e$  ce qui entraîne  $T_p = T_e$ .

### Solution de l'équation homogène : $T_h(t)$

L'équation homogène est  $\frac{dT_h}{dt} + a \times T_h = 0$

On sait que la solution générale de l'équation homogène a pour expression  $T_h(t) = A \times e^{-a \times t}$

On trouve  $A$  par les conditions initiales : à  $t = 0$ ,  $T(0) = T_i$ .

Et  $T(0) = A \times e^{-a \times 0} + T_e = A + T_e = T_i \rightarrow A = T_i - T_e$

On a donc  $T_h(t) = (T_i - T_e) \times e^{-a \times t}$

### Solution générale :

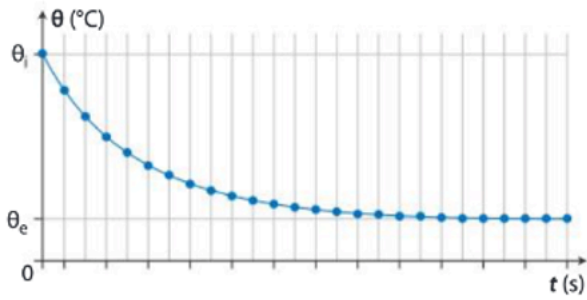
Finalement, on a la solution  $T(t) = (T_i - T_e) \times e^{-\frac{h \times S}{m \times c} \times t} + T_e$

Il y a deux cas possibles :

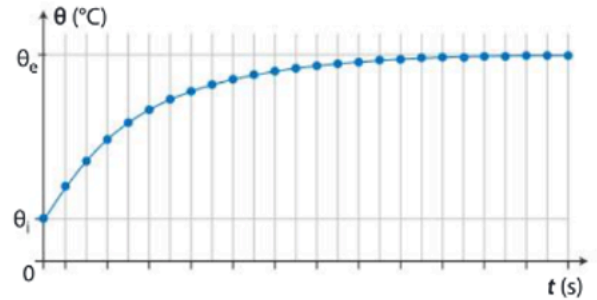
- Si  $T_i < T_e$  alors le système va se réchauffer (fonction de la forme  $T(t) = K - b e^{-t}$  fonction croissante)
- Si  $T_i > T_e$  alors le système va se refroidir (fonction de la forme  $T(t) = K + b e^{-t}$  fonction décroissante)

Allure de la courbe donnant la température d'un système en contact avec un thermostat, en fonction du temps

Refroidissement du système incompressible :  $T_i < T_e$



Réchauffement du système incompressible :  $T_i > T_e$



[Application](#) : n°35 p 446

[Application en autonomie](#) : n°22 p 443 (corrigé détaillé)

[Révision pour le bac](#) : Feuille d'annales