

## Enseignement de l'énergie

# Éléments de thermodynamique et concept d'exergie

Extrait de l'Atelier 16 Exergie PAC Chauffage électr.

à disposition dans le dossier ATELIERS ENERGIE

avec, ici, en format **mp4**, une séquence vidéo d'une émission de la RTS *À Bon Entendeur* (critique facétieuse d'une publicité mensongère pour un chauffage électrique).

- Le concept d'exergie ou comment comparer chauffage à mazout, chauffage électrique et chauffage par pompe à chaleur...
- Explication concernant la pompe à chaleur
- Critique de publicités pour du chauffage électrique

Ce dossier fournit une vulgarisation relative au 2ème principe de la thermodynamique et à ses conséquences lorsqu'on veut comparer des systèmes transformateurs d'énergie en prenant en compte une dimension écologique. Ce 2ème principe permet de définir une grandeur appelée **exergie** qui quantifie la **qualité** d'une énergie. Pour aider à comprendre cette notion d'exergie, le professeur Lucien Borel<sup>1</sup> a représenté les systèmes de soutirage d'énergie au moyen de dessins mettant en scène des personnages qui sont des paquets d'énergie. Ce document présente quelques-uns de ces dessins.

Ce dossier comporte en outre un document explicatif concernant la pompe à chaleur et des documents relatifs à une analyse critique de publicité pour des radiateurs électriques.

<sup>1</sup> Lucien Borel a été professeur à l'EPFL jusqu'en 1998 puis professeur émérite et a écrit de nombreux ouvrages tant destinés aux spécialistes qu'à un plus large public

## Un petit peu de thermodynamique ou comment comparer chauffage à mazout, chauffage électrique et chauffage par pompe à chaleur...

### Le rendement de Carnot

Le texte indenté ci-dessous est tiré de : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Deuxième\\_principe\\_de\\_la\\_thermodynamique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Deuxième_principe_de_la_thermodynamique)

Le deuxième principe de la thermodynamique (également connu sous le nom de deuxième loi de la thermodynamique ou principe de Carnot) établit l'irréversibilité des phénomènes physiques, en particulier lors des échanges thermiques. C'est un principe d'évolution qui fut énoncé pour la première fois par Sadi Carnot en 1824. Il a depuis fait l'objet de nombreuses généralisations et formulations successives par Clapeyron (1834), Clausius (1850), Lord Kelvin, Ludwig Boltzmann en 1873 et Max Planck [...], tout au long du XIXe siècle et au-delà jusqu'à nos jours.

Ce deuxième principe décrit une fonction d'état appelée entropie et désignée par la lettre **S**. Cette grandeur **S** est une mesure de l'état de désordre de la matière. Sa valeur est grande lorsque les molécules s'agitent en tout sens (énergie thermique) ; elle est plus petite si la matière est animée d'un mouvement d'ensemble (énergie mécanique).

En thermodynamique on parle parfois d'énergie noble et d'énergie dégradée. L'énergie est dite "noble", si elle peut être entièrement dégradée en chaleur. L'énergie cinétique d'une roue qui tourne ou d'un véhicule qui roule est noble (entropie relativement basse). L'énergie électrique est noble. L'énergie thermique libérée par la flamme d'un combustible n'est pas noble (entropie relativement élevée), mais elle n'est pas entièrement dégradée dans la mesure où l'on peut la dégrader encore pour se chauffer ou en soutirer une partie pour obtenir de l'énergie noble. L'énergie thermique libérée dans l'environnement à la température ambiante et qui ne peut plus être exploitée pour qu'une partie noble en soit soutirée est considérée comme complètement dégradée. Mais elle n'est pas considérée comme entièrement dégradée si on en tire de la chaleur grâce à une pompe à chaleur et qu'on la dégrade à une température plus basse que la température ambiante.

Il est donc possible de soutirer de la chaleur ou de l'énergie noble sous forme mécanique ou électrique à partir d'une source de chaleur à condition de faire transiter l'énergie thermique entre une source chaude de température **T<sub>c</sub>** (c pour chaude) et une source froide de température **T<sub>f</sub>** (f pour froide ou finale) dans un système (moteur, machine, centrale).

Le deuxième principe de la thermodynamique veut que seule une part de cette énergie thermique peut être "anoblée". Il est en effet impossible de convertir l'entier d'une énergie d'agitation désordonnée en un mouvement ordonné. On peut s'imaginer que seule la composante des vitesses d'agitation qui est orientée dans une direction donnée participe du mouvement attendu, le reste demeurant de la chaleur (penser au piston d'un moteur à explosion ou à vapeur). Carnot a établi que la part maximum d'énergie pouvant être soutirée lors du transfert d'énergie entre une source chaude et une source froide est donnée par la relation

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

$\eta$  est ce qu'on appelle le rendement de Carnot. Les températures sont les températures absolues donc exprimées en kelvins.

Le thermodynamicien Lucien Borel s'est, entre autres, intéressé aux systèmes de production de chaleur pour le chauffage ou la production d'eau chaude. La part d'énergie

noble que recèle une source donnée est appelée son exergie. Celle ci dépend des températures entre lesquelles l'énergie thermique est significative. Il a défini un **rendement exérgétique h** par la relation

$$h = e \left( 1 - \frac{T_f}{T_c} \right)$$

dans laquelle **e** est l'efficacité énergétique, c'est à dire la proportion d'énergie utile qui sort du système par rapport à l'énergie consommée entrant dans le système, **T<sub>f</sub>** est la température finale utile (température des locaux chauffés ou de l'eau chaude obtenue), **T<sub>c</sub>** est la température de la source chaude à laquelle l'énergie est fournie.

Pour aider à comprendre cette notion d'exergie, Lucien Borel a représenté les systèmes de soutirage d'énergie au moyen de dessins mettant en scène des personnages qui sont des paquets d'énergie. Il a affublé ces personnages d'une auréole lorsque l'énergie qu'ils représentent est noble. Ces personnages évoluent du haut des dessins vers le bas selon une gradation qui exprime la température à laquelle se passent les événements produits dans le système. Tout en haut, la température, celle qui correspond à de l'énergie noble, est infinie (**T** = ∞). Tout en bas, celle qui correspond à de l'énergie dégradée, est de 0°C (**T** = 273 K).

Les efficacités énergétiques **e** prises en compte par Lucien Borel sont de

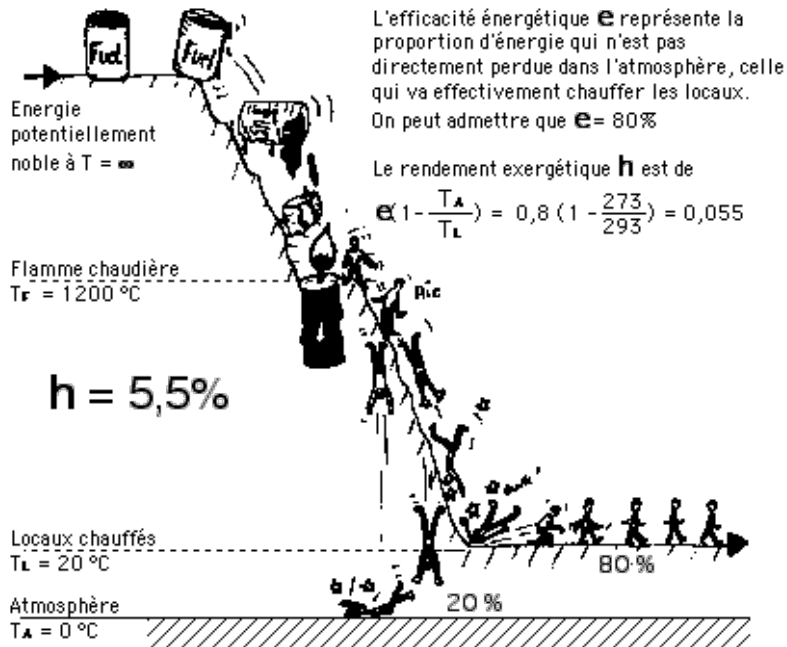
- 80 % pour un chauffage à mazout car 20% de l'énergie s'échappe par la cheminée et sous forme d'autres pertes.
- 100 % pour un chauffage électrique car l'énergie électrique est entièrement transformée en chaleur.
- 400 % pour pompe à chaleur, ce qui veut dire que le thermodynamicien admet qu'elle produit 4 fois plus d'énergie qu'elle en consomme au réseau électrique.

Pour les températures, Lucien Borel a fait les choix suivants :

- **T<sub>f</sub>** est considérée comme étant de 20°C c'est à dire 293 K, et désignée par **T<sub>L</sub>** pour température des locaux chauffés,
- **T<sub>f</sub>** est parfois de 70°C c'est à dire 343 K, et désignée par **T<sub>E</sub>** pour température de l'eau chauffée.
- **T<sub>c</sub>** est admis à 0°C (valeur standard) c'est à dire 273 K, et désignée par **T<sub>A</sub>** pour température de l'atmosphère.

## Des dessins explicatifs proposés par le professeur Lucien Borel

## L'exergie dans le cas d'un chauffage au mazout

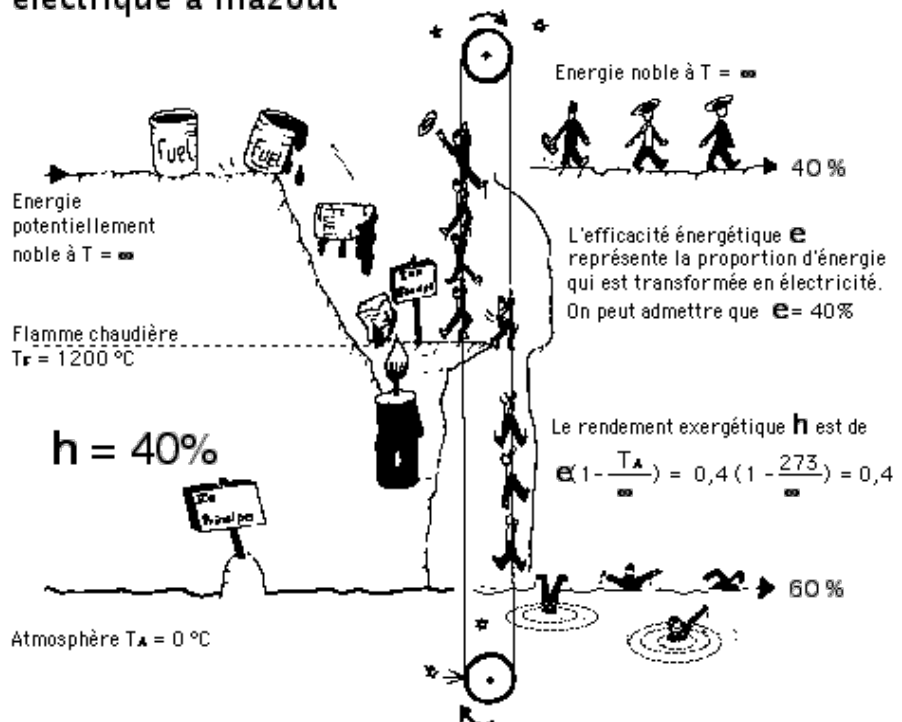


Tiré de l'ouvrage :  
Lucien Borel - Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques romandes, 1987

L'énergie finale utile est livrée pour le chauffage des locaux. Sa valeur réside dans le fait qu'elle maintient la température des locaux chauffés à  $20^\circ\text{C}$  au-dessus de la température de l'atmosphère, température de  $0^\circ\text{C}$  à laquelle cette énergie se dégradera finalement.

C'est pourquoi le calcul se fait avec  $T_L = 293\text{ K}$  et  $T_A = 273\text{ K}$

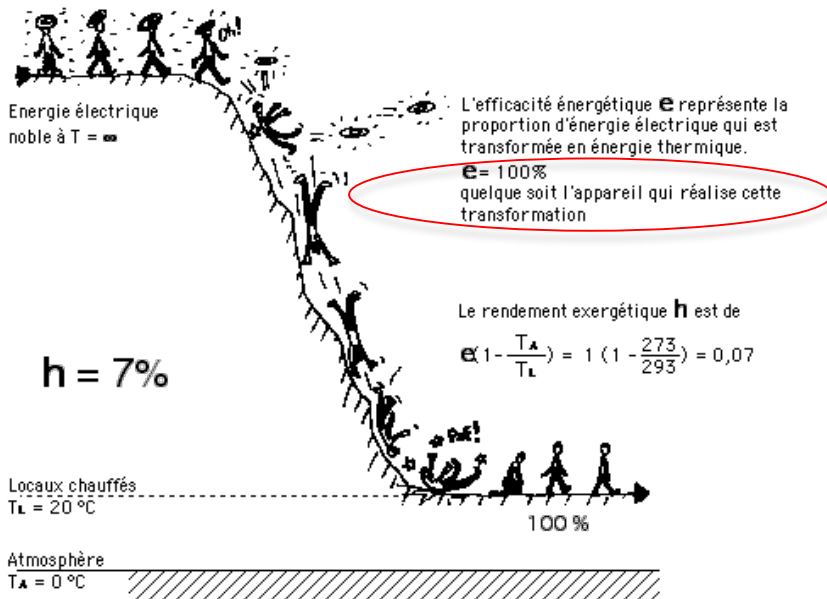
## L'exergie dans le cas d'une centrale électrique à mazout



Tiré de l'ouvrage :  
Lucien Borel - Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques romandes, 1987

L'énergie finale utile est de l'électricité. C'est de l'énergie noble et la température correspondante est infinie ( $T_f = \infty$ ) alors que le système fonctionne en puisant de l'énergie d'une source froide à  $0^\circ\text{C}$ . ( $T_A = 273\text{ K}$ )

## L'exergie dans le cas d'un chauffage électrique



Dans le cas où l'énergie électrique est produite par une centrale à mazout avec un rendement de 40 %, le rendement exergétique  $h$  global pour le chauffage électrique est de

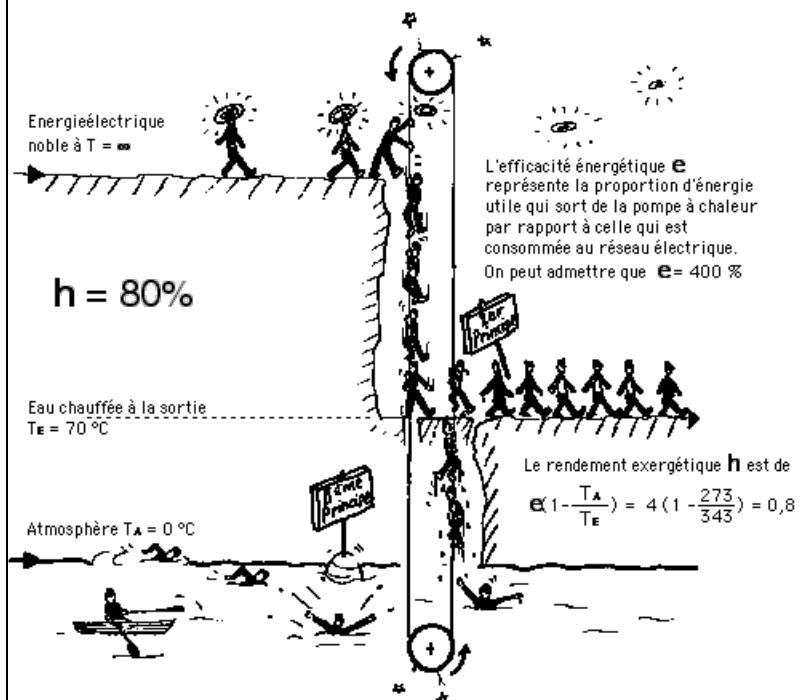
$$h = 40\% \cdot 7\% = 2,8\%$$

Tiré de l'ouvrage :  
 Lucien Borel – Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques romandes, 1987

### Important !

Quels que soient les arguments des commerçants qui vendent des chauffages électriques, aucun de ces chauffages ne peut avoir un rendement énergétique meilleur qu'un autre.

## L'exergie dans le cas d'une pompe à chaleur



### Remarque :

La pompe à chaleur représentée ici puise de l'énergie à la température de  $0\text{ °C}$ .

On pourrait imaginer une pompe à chaleur puisant son énergie à une plus basse température (cas des frigos ou congélateurs).

La température de  $70\text{ °C}$  peut être considérée comme une température d'utilisation finale dans le cas où elle sert d'eau sanitaire. Pour la part chauffage, la température d'utilisation  $T_L$  est de  $20\text{ °C}$  et le rendement exergétique  $h$  global est de

$$e(1 - \frac{T_A}{T_L}) = 4(1 - \frac{273}{293}) = 0,27$$

$$h = 27\%$$

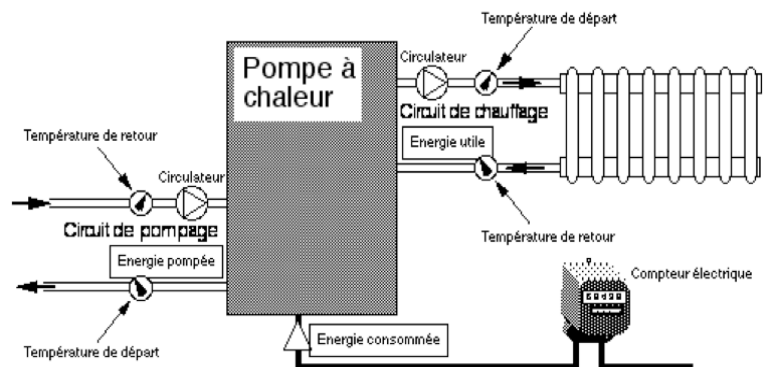
Tiré de l'ouvrage :  
 Lucien Borel – Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques romandes, 1987

## Pompe à chaleur (PAC)

### Principe :

Capter de l'énergie dans une source froide pour l'injecter dans le circuit de chauffage.

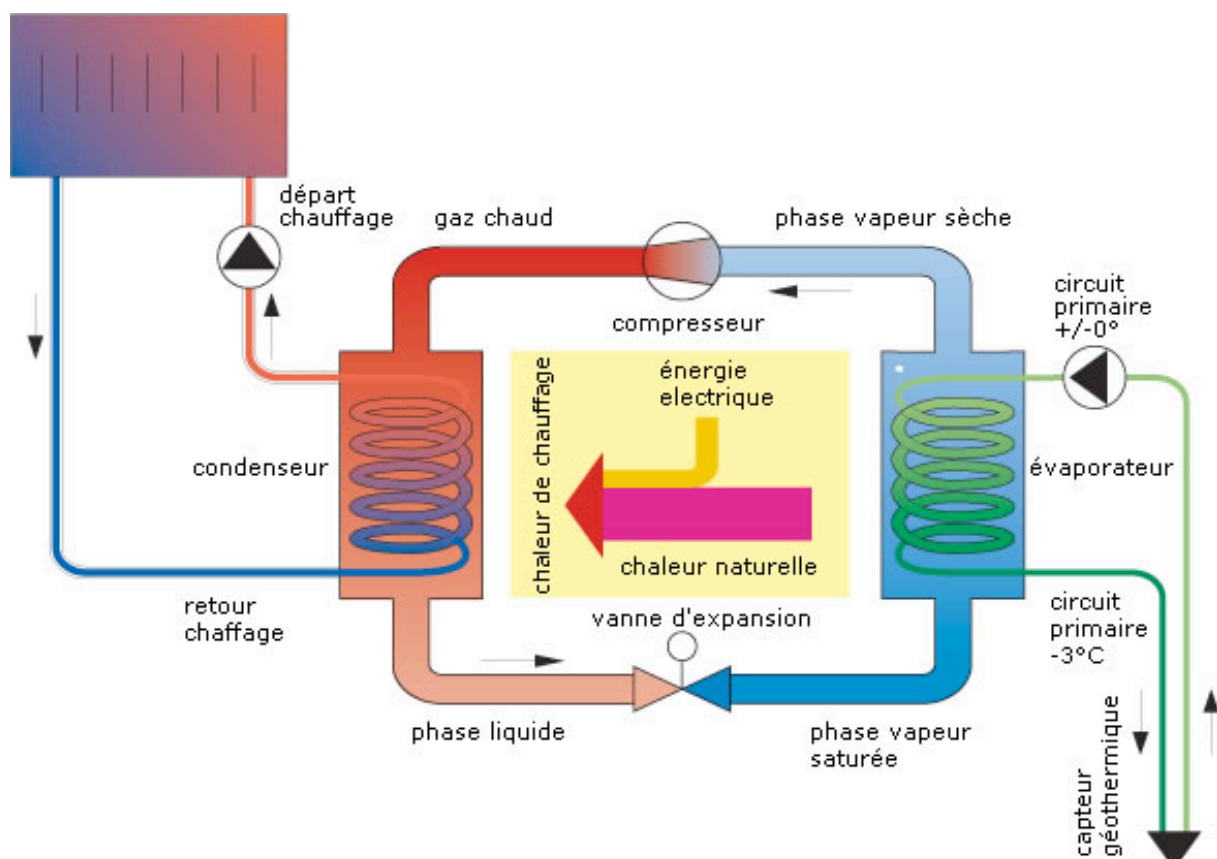
Comme ce transfert est « contre nature », il faut fournir de l'énergie pour qu'il ait lieu. Cette énergie fournie alimente un compresseur.



(Le texte qui suit est tiré de : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe\\_à\\_chaleur](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_à_chaleur))

La PAC dispose de quatre organes principaux (cf. schéma ci-dessous) :

1. le **condenseur** (source chaude) : le fluide frigorigène libère sa chaleur au fluide secondaire (eau, air...) en passant de l'état gazeux à l'état liquide,
2. le **réducteur de pression** (souvent improprement appelé détendeur) : il réduit la pression du fluide frigorigène en phase liquide.
3. l'**évaporateur** (source froide) : la chaleur est prélevée au fluide secondaire pour vaporiser le fluide frigorigène.
4. le **compresseur** : actionné par un moteur électrique, il élève la pression et la température du fluide frigorigène gazeux en le comprimant

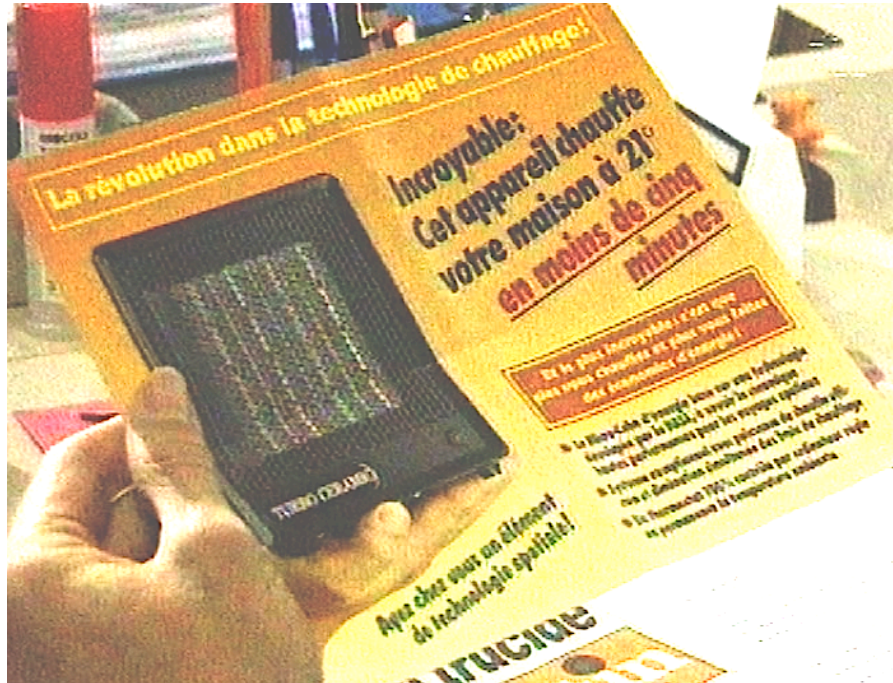


Dessin tiré de : <http://www.encyclopédie-gratuite.fr/Definition/Technique/images/pompe-chaleur.jpg>



Publicité diffusée en 1993 (Émission RTS ABE du 25.01.1994)

## La révolution dans la technologie de chauffage



**Incroyable :**  
Cet appareil  
chauffe votre  
maison à 21°C en  
moins de  
5 minutes

**Et le plus incroyable :**  
c'est que plus vous  
chauffez et plus vous  
faites des économies  
d'énergie  
Système exceptionnel  
avec puissance de  
chauffe efficace et  
diminution  
simultanée des frais  
de chauffage  
Un thermostat 100%  
contrôlé par  
ordinateur règle en  
permanence la  
température  
ambiante

Imaginez : il est capable de chauffer une pièce de 73 m<sup>3</sup> en quelques minutes même si la température est inférieure à 0°C au moment de sa mise en fonction.

Le microcube d'énergie basé sur une technologie développée par la NASA, à savoir la céramique haute performance pour les voyages spatiaux.

### Petit raisonnement

Quelle est l'énergie nécessaire à chauffer un volume de 73 m<sup>3</sup> d'air de 0 à 21 degrés et quelle puissance faut-il pour réaliser ce chauffage en 5 minutes ?

Hypothèse la plus optimiste :

On admet que l'on ne chauffe que l'air, sans chauffer les parois du local et sans qu'il y ait échange d'air (pas d'air froid qui entre dans la pièce et pas d'air chaud qui en sort).

Données pour l'air à la pression atmosphérique et avec un taux d'humidité moyen

Chaleur massique de l'air est de 1,0 kJ/kg-1

Masse volumique est de 1,3 kg/m<sup>3</sup>

Calcul :

Masse des 73 m<sup>3</sup> d'air :  $73 \cdot 1,3 = 94,9$  kg

Énergie pour chauffer l'air de 1 degré : 94,9 kJ

Énergie pour chauffer l'air de 21 degré : 1993 kJ, soit 553 kWh

Puissance requise pour 5 min de chauffage :  $553 \text{ kWh} / (1/12 \text{ h}) = 6643 \text{ W}$  soit plus de 6 kW !

Cette publicité a été critiquée dans l'émission de la RTS *À Bon Entendeur* du 25.01.1994

## Variante de publicité pour le même produit :

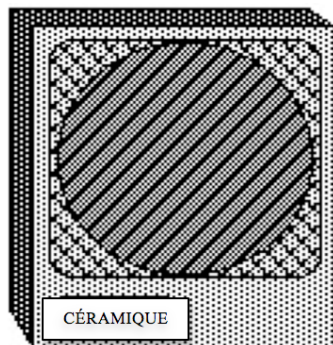
Une révolution dans le chauffage de la maison !

**Conçu grâce à la technologie des céramiques haute performance développées par la NASA pour la navette spatiale, ce microcube d'énergie** de 16 cm de côtés est le seul système de chauffage qui vous chauffe efficacement et qui diminue votre facture d'électricité

**Cet appareil chauffe une pièce avec l'énergie d'une ampoule de 60 W**

Les corps de chauffe noyés dans la masse de céramique alvéolée diffusent uniformément la chaleur. La céramique emmagasine cette chaleur et la libère dans l'air à travers les alvéoles

## CHAUFFAGE CÉRAMIQUE À DISQUES DE CÉRAMIQUE HAUTE TECHNOLOGIE



### Caractéristiques

Puissance de 500 à 1000 W  
approuvé normes USA, Canada et TUV

### PROMOTION

#### Une performance jamais atteinte

Ce petit cube est capable de chauffer une pièce de 60 m<sup>3</sup> en quelques minutes, même si la température est inférieure à 0°C

**Inspiré des systèmes thermiques des industries de pointe, ce chauffage utilise des éléments en céramique pure semi-conducteur, produisant une chaleur intense pour une très faible consommation d'énergie.**

## Une publicité trouvée sur Internet en 2015

<http://annonces-gratuites.index-net.org/petites-annonces-chauffage-et-climatisation-443/radiateur-electrique-economique-eure-vers-evreux-annonce-37070.html>

### NOUVEAU !

Réalisez 35% d'économie avec notre sélection de radiateur CALIDOUS PLUS



#### Fonte Active à Inertie Dynamique

- Avec 2 radiateurs dans seul radiateur
- Avec sa Fonte active à inertie dynamique
- Avec sa Façade rayonnante prioritaire
- Avec sa Nouvelle Intelligence sensorielle numérique
- Avec son indispensable Point Chaud permanent
- et... sa sortie d'air frontale, gage de propreté des murs et d'économies d'énergie.

**Question sans réponse : comment est obtenu ce « 35% d'économie » ?**



## Réchauffons-nous avec un peu de théorie :

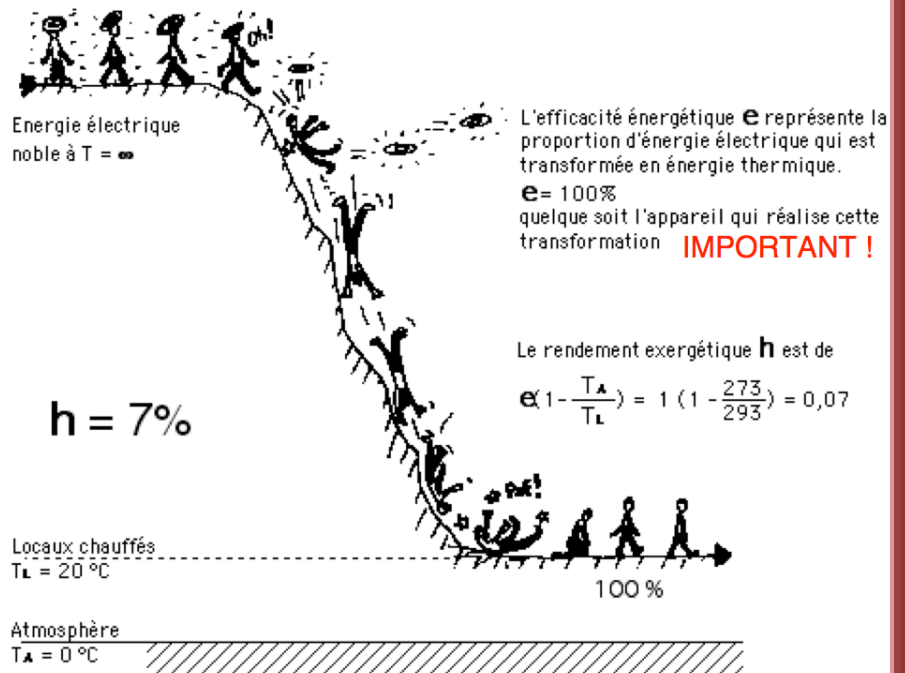
Lors de toute transformation de l'énergie, une part de celle-ci se dégrade en chaleur qui est le niveau le plus bas de la « qualité » de l'énergie résultant d'une agitation désordonnée des molécules et atomes.

Lorsque de la chaleur est produite à partir d'une autre forme d'énergie (électrique, mécanique, chimique, rayonnement), c'est le 100% de l'énergie qui se dégrade en chaleur ( $e = 100\%$ ) dans l'illustration ci-contre.

La conception du radiateur électrique n'y change absolument rien !

Ce qui distingue les diverses sortes de radiateurs électriques, c'est leur mode de diffusion de la chaleur. Il peut être immédiat ou retardé (accumulateur), par rayonnement ou convection, avec circulation d'air forcée (ventilateur) ou un mix de ces modes. Ces modes de diffusion influent sur la sensation de confort, mais le rendement du radiateur est toujours le même (100%).

### L'exergie dans le cas d'un chauffage électrique



Dans le cas où l'énergie électrique est produite par une centrale à mazout avec un rendement de 40 %, le rendement exergétique  $h$  global pour le chauffage électrique est de

$$h = 40\% \cdot 7\% = 2,8\%$$

Tiré de l'ouvrage :  
 Lucien Borel - Thermodynamique et énergétique. Presses Polytechniques romandes, 1987

Note : le rendement de 40% est celui, approximativement, de toute centrale thermique, y compris une centrale nucléaire