

# Les mécanismes de l'effet de serre

Jean-Louis Dufresne

Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)  
Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)

[jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr](mailto:jean-louis.dufresne@lmd.jussieu.fr)  
[www.lmd.jussieu.fr/~jldufres](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres)

# Température d'équilibre d'une planète

1) L'émission de rayonnement

2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

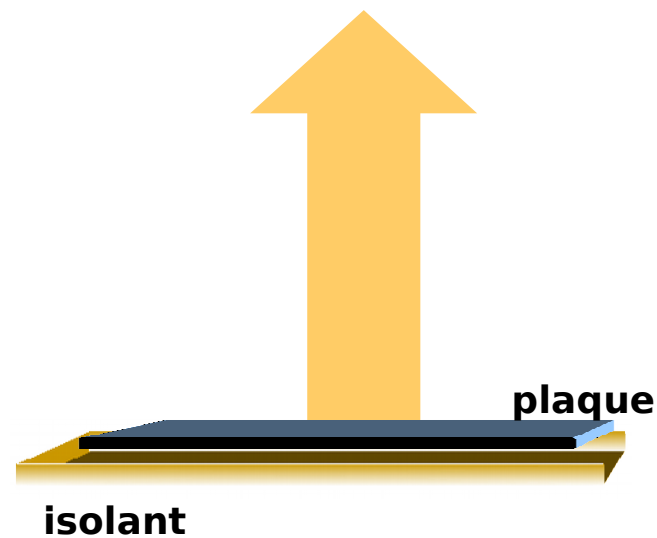
3) L'équilibre énergétique

4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil

5) L'effet de serre

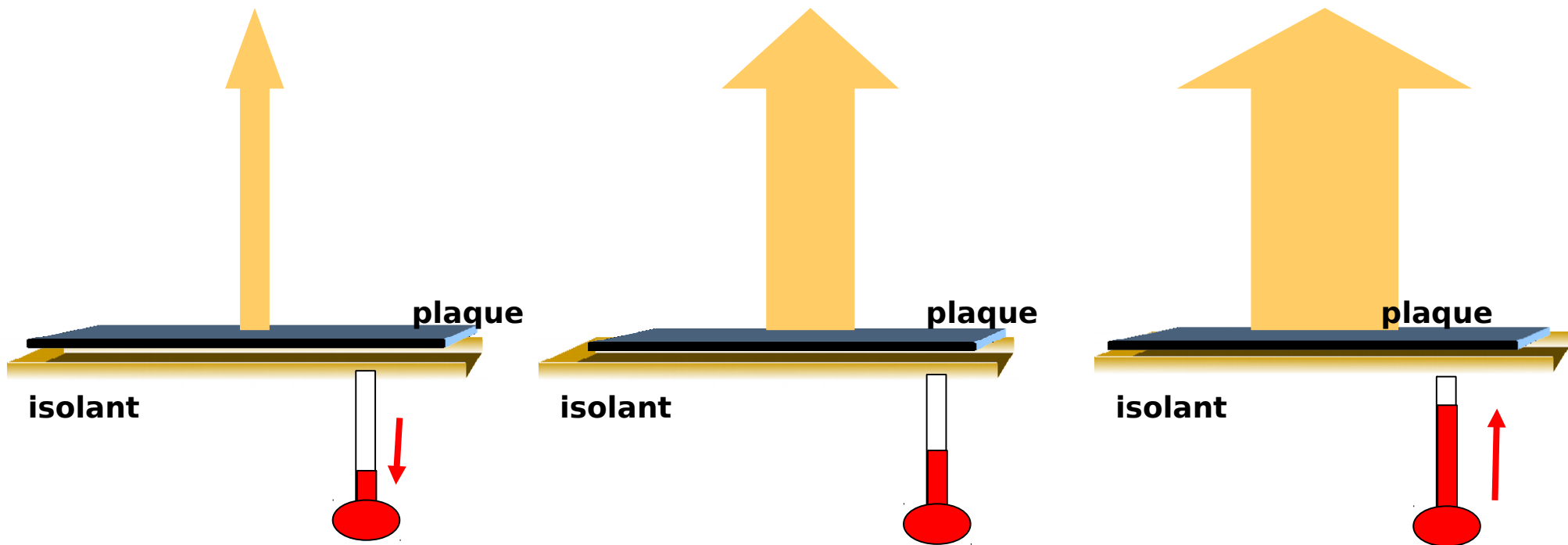
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum?

# 1) L'émission de rayonnement



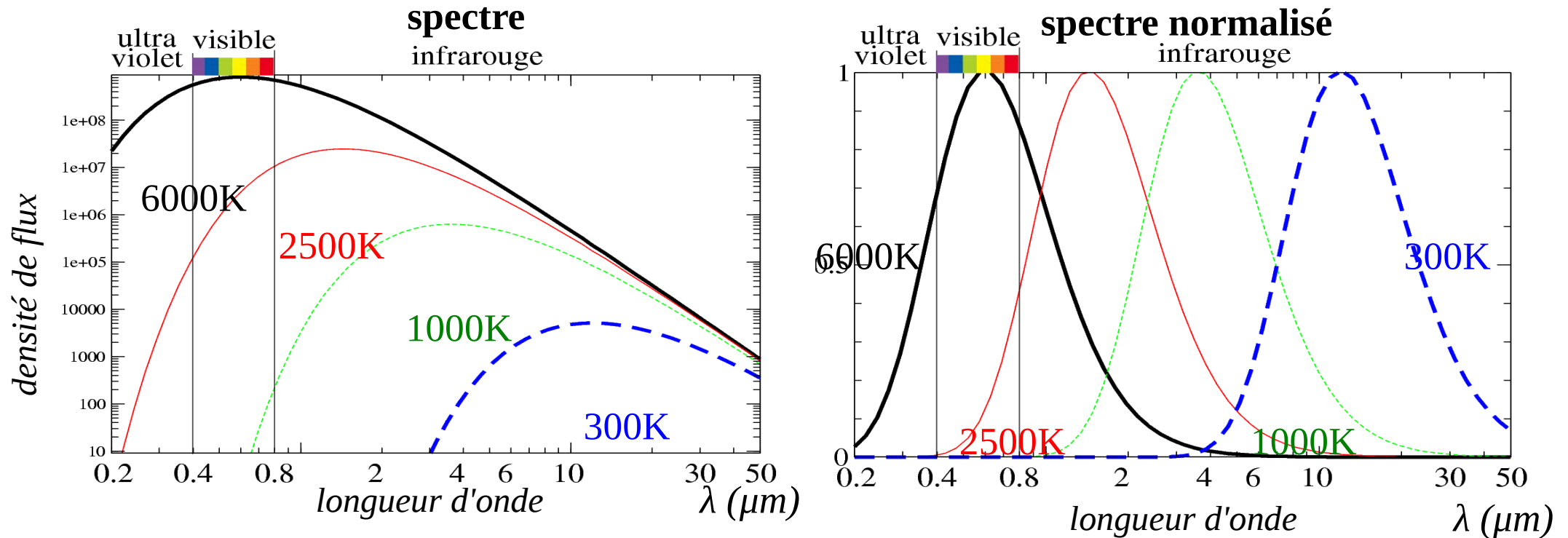
*a) Tout corps (ici une plaque posée sur un isolant thermique) émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie*

# 1) L'émission de rayonnement



*b) Plus la température du corps est élevée, plus l'énergie perdue est élevée*

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge



a) Si la température de l'objet est inférieure à  $700^\circ\text{C}$ , notre œil ne voit pas le rayonnement émis par l'objet :

C'est le rayonnement infrarouge

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

b) Si la température de l'objet est très élevée (supérieure à environ  $700^{\circ}\text{C}$ ), notre œil voit une partie du rayonnement émis par cet objet :

C'est le rayonnement visible



Lampe à filament de tungsten :  $T \approx 2700\text{-}3100\text{ K}$

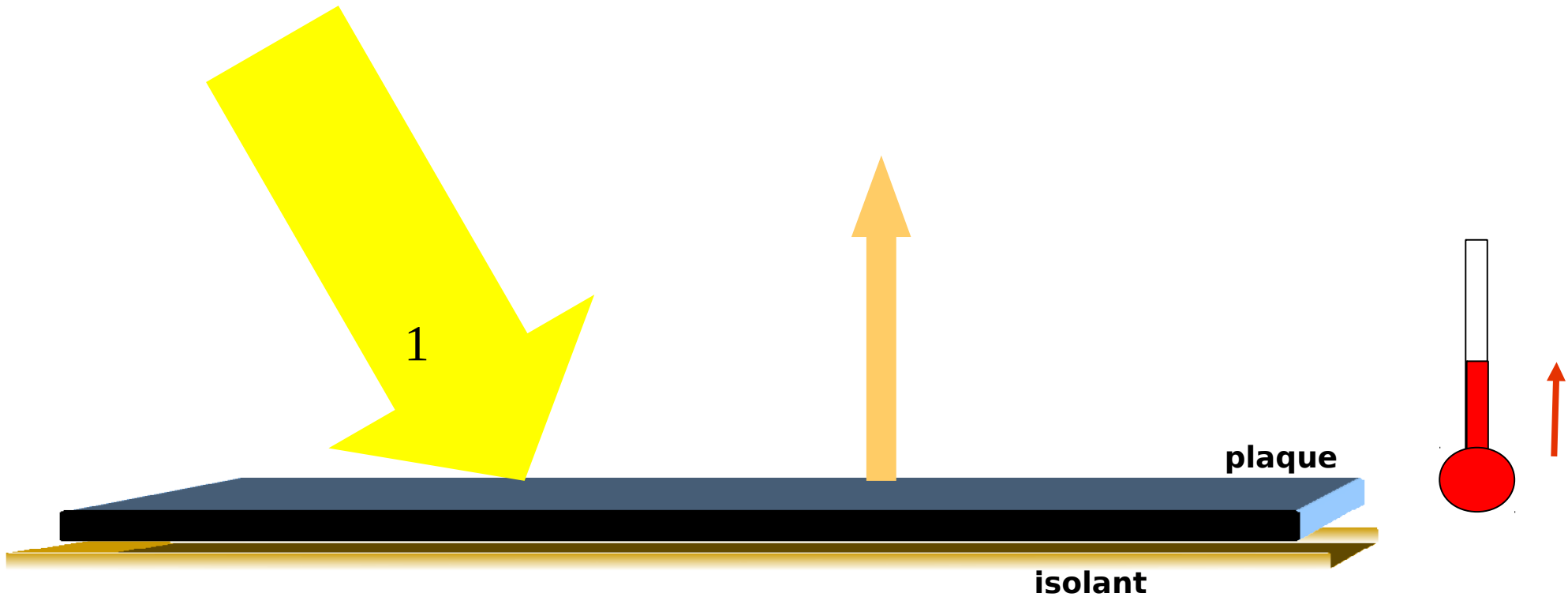


Soleil :  $T \approx 6000\text{ K}$



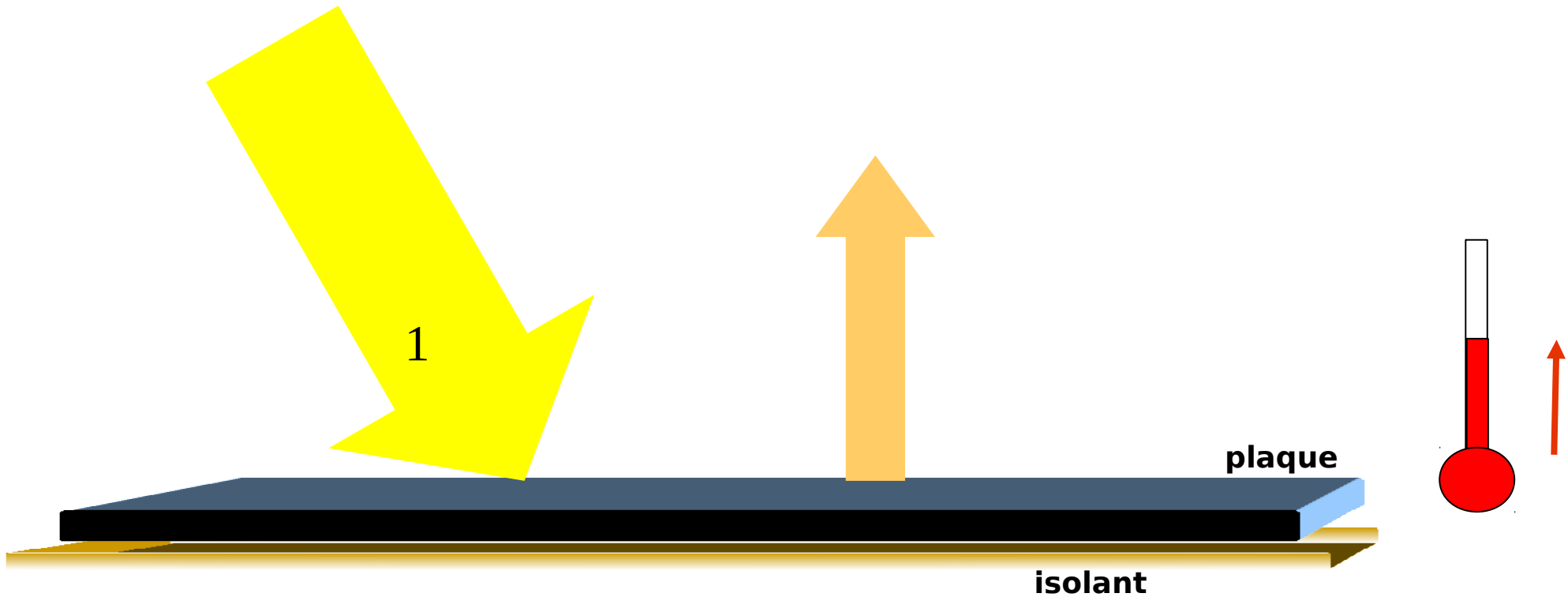
Lave de volcan :  $T \approx 1000\text{ K}$

### 3) L'équilibre énergétique



- Si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.

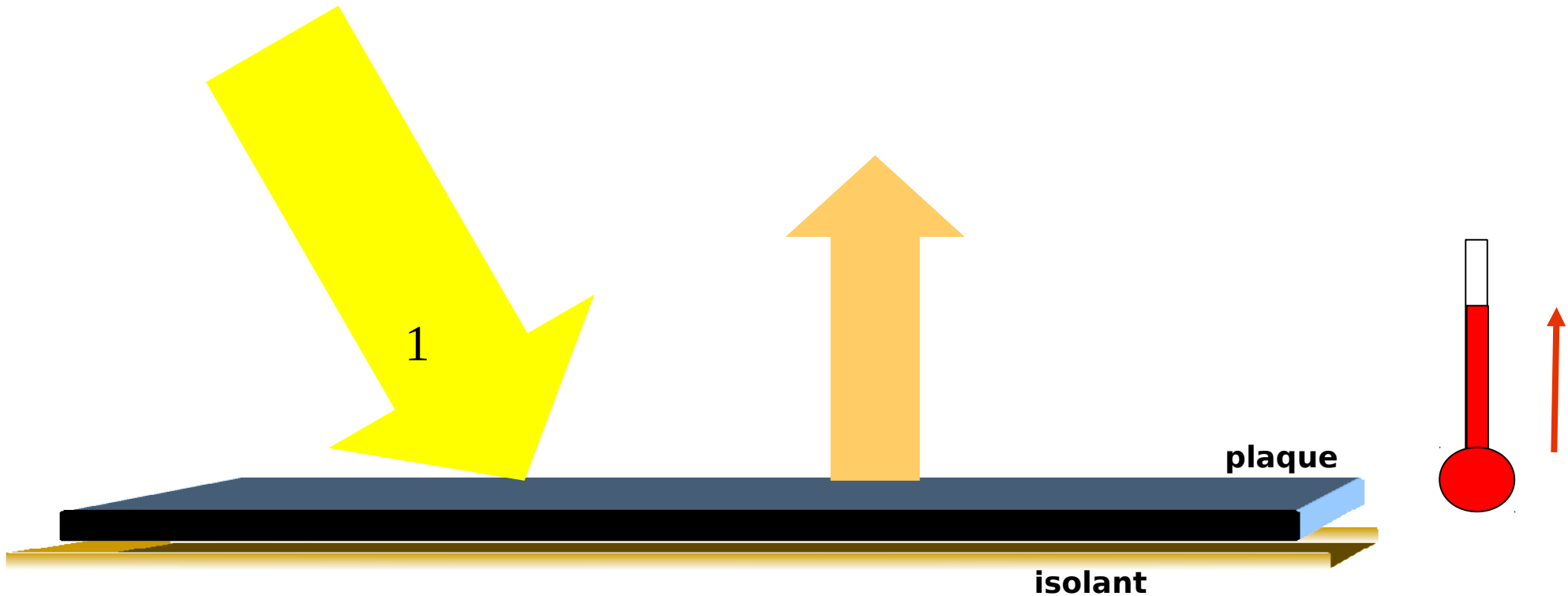
### 3) L'équilibre énergétique



- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

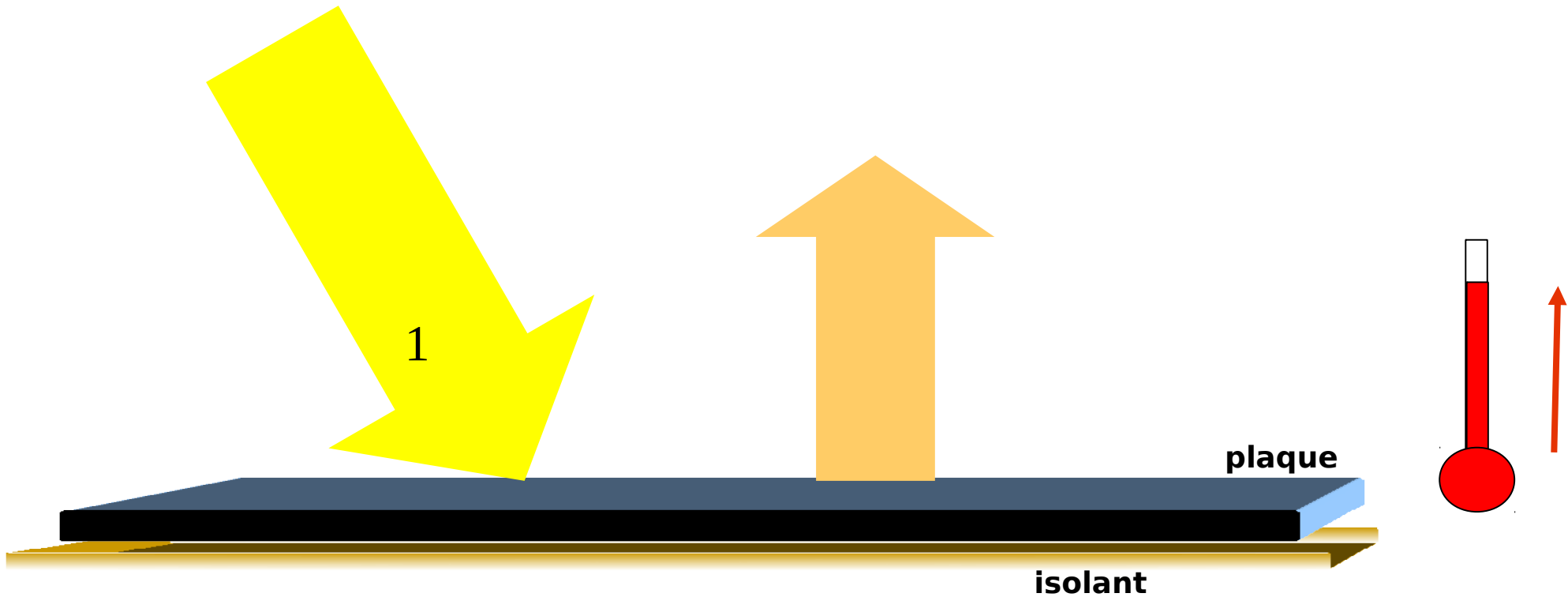


### 3) L'équilibre énergétique



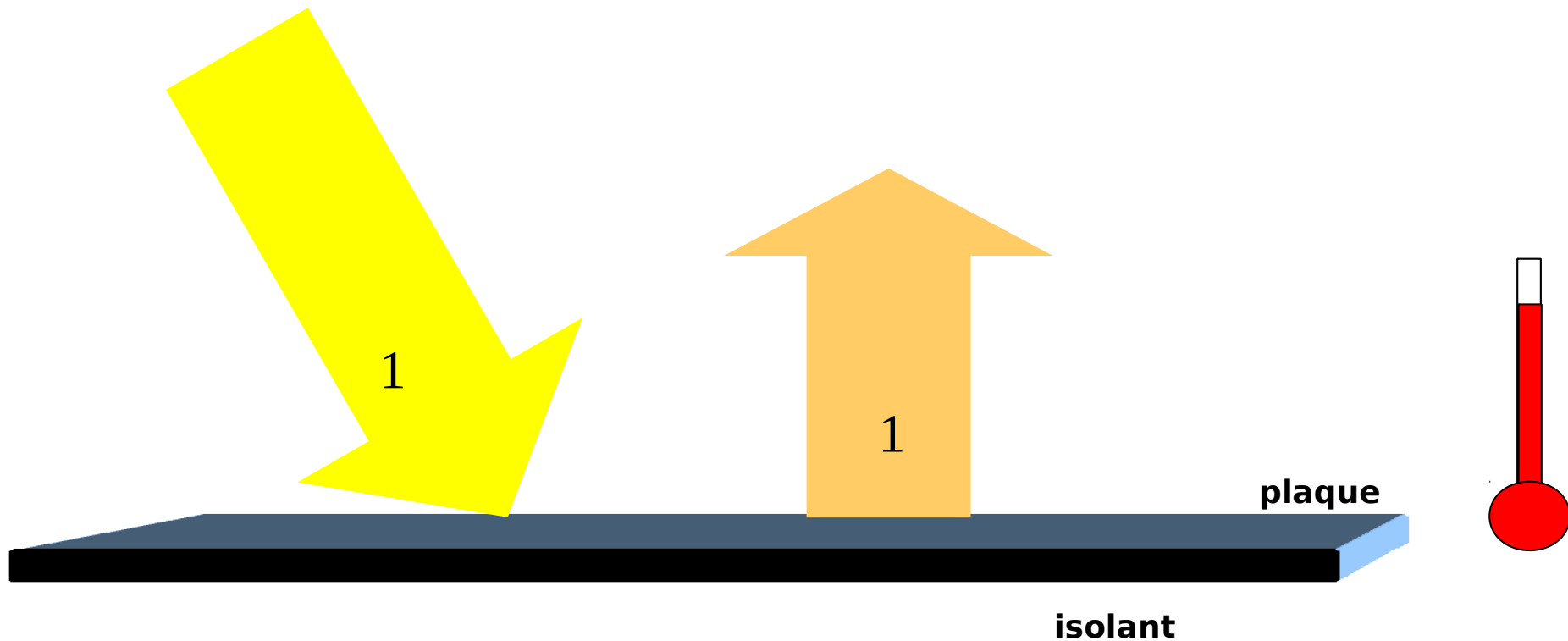
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



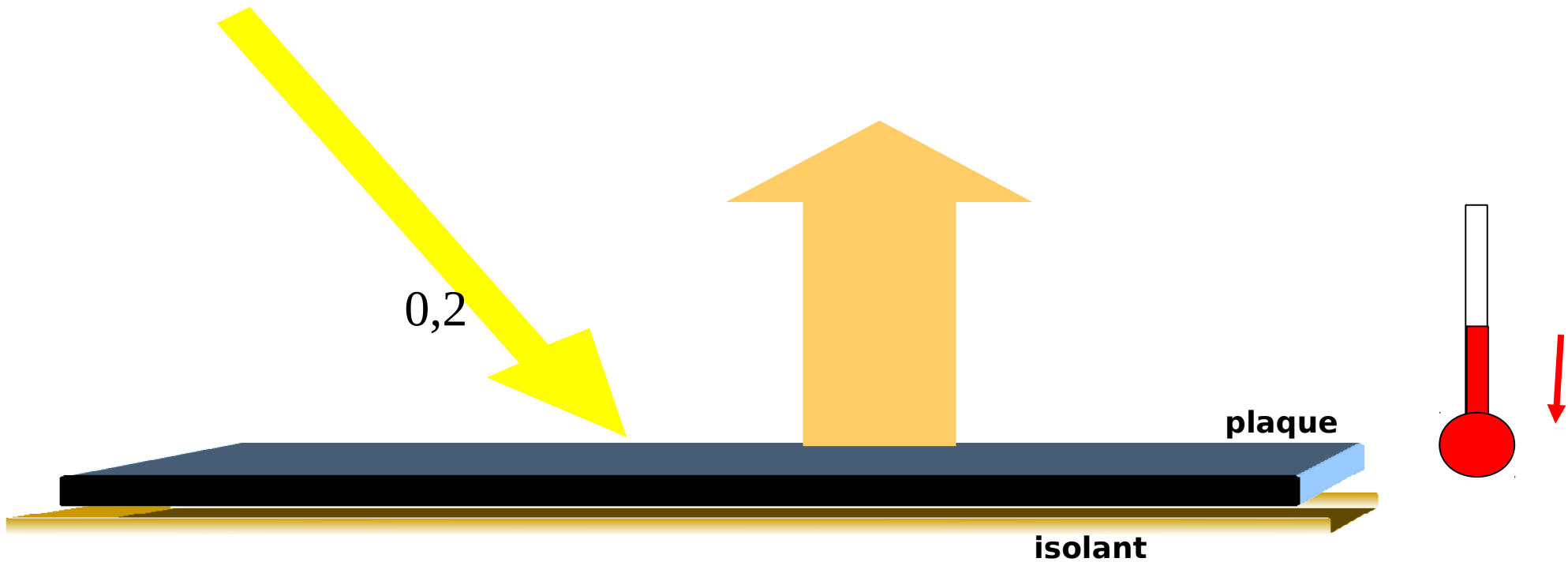
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



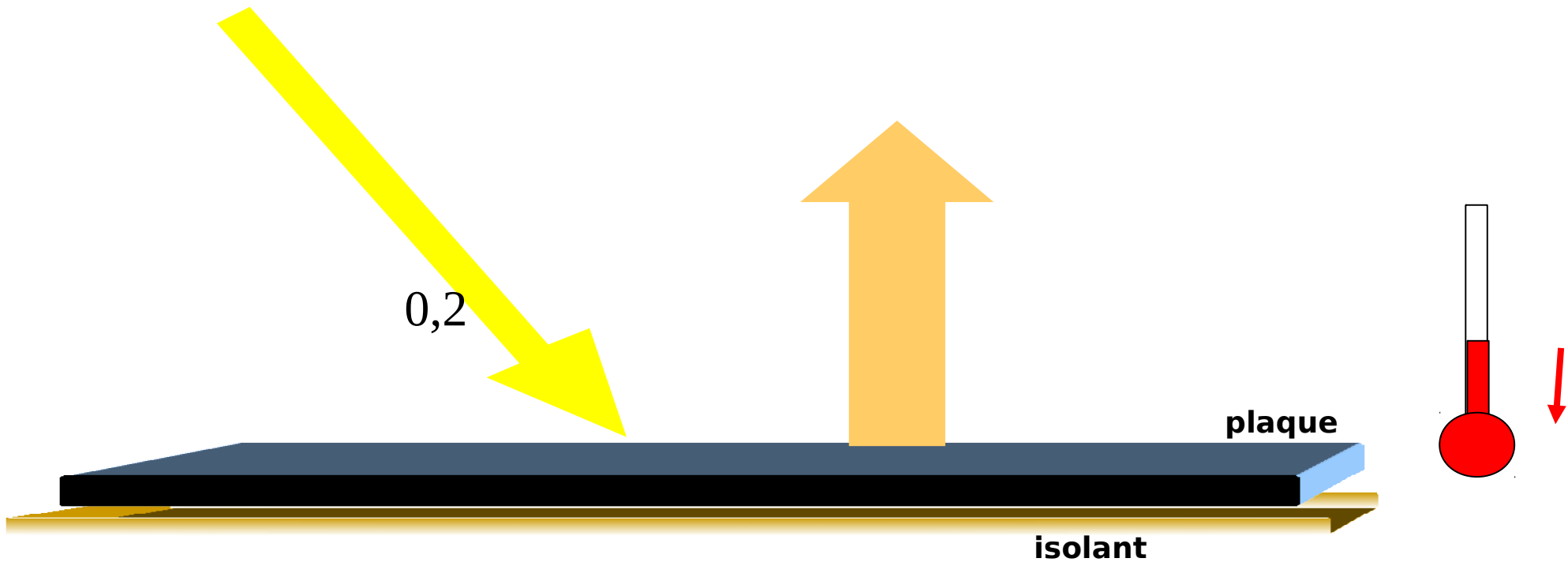
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

### 3) L'équilibre énergétique



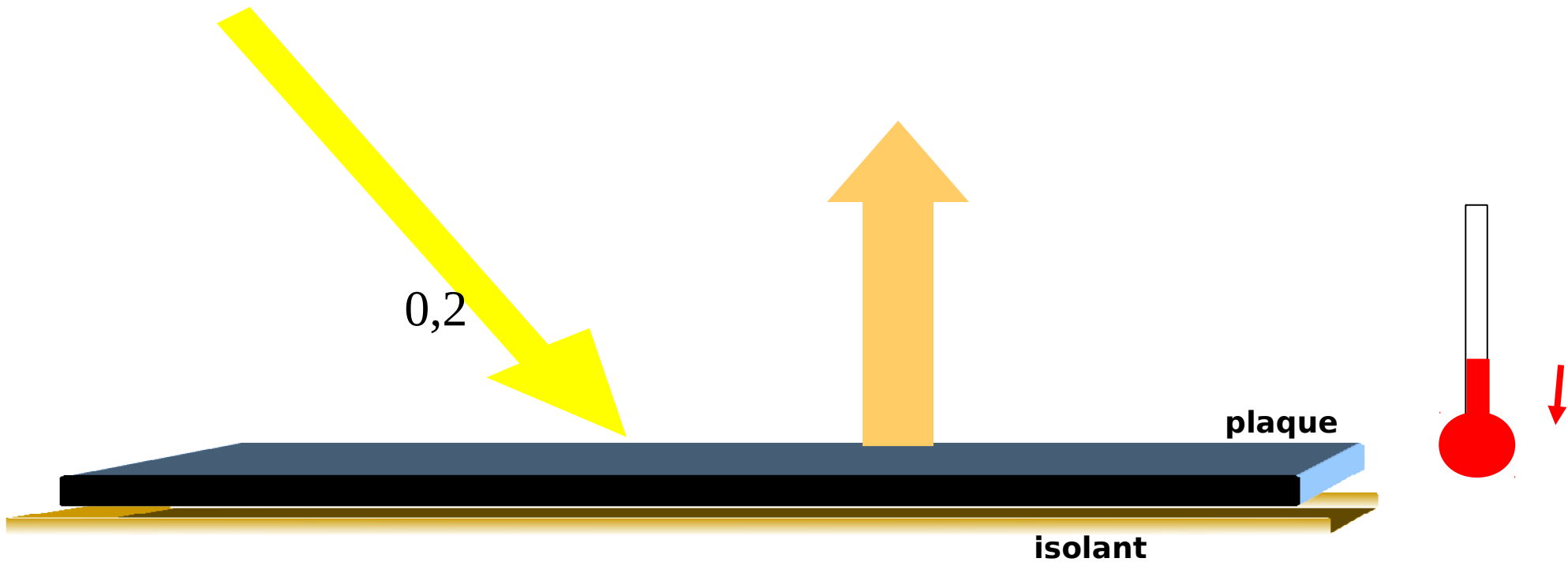
- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



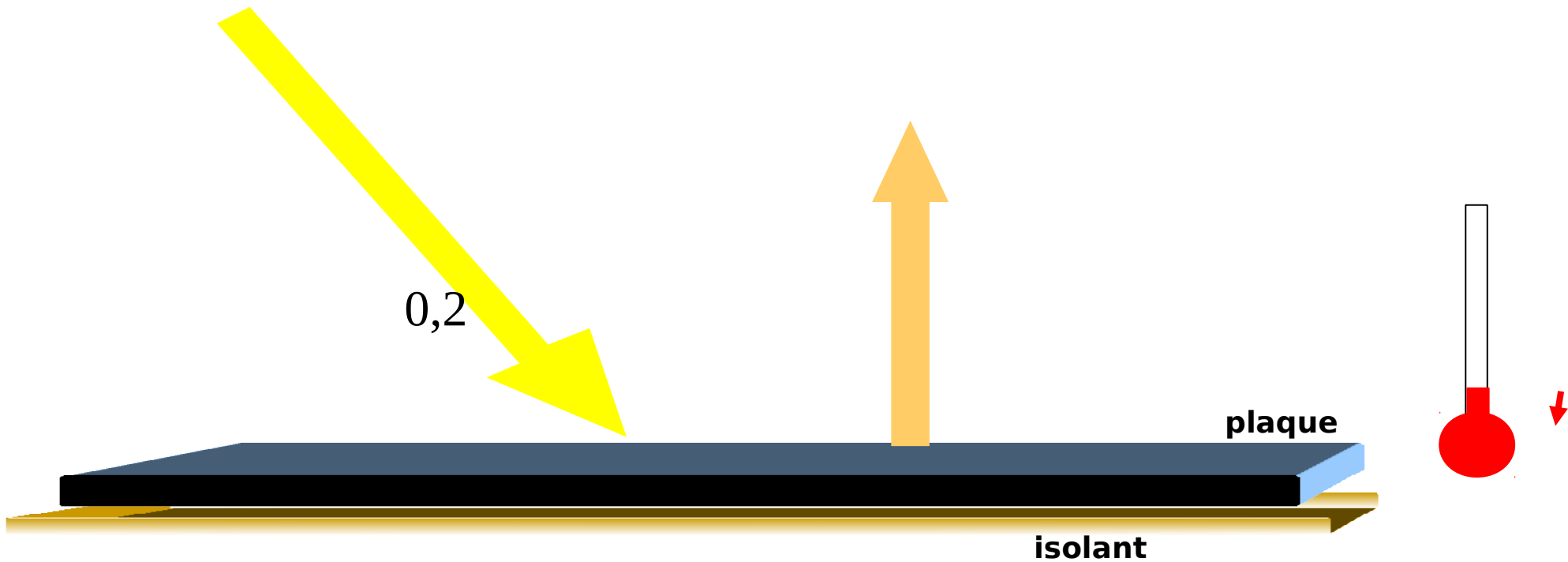
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



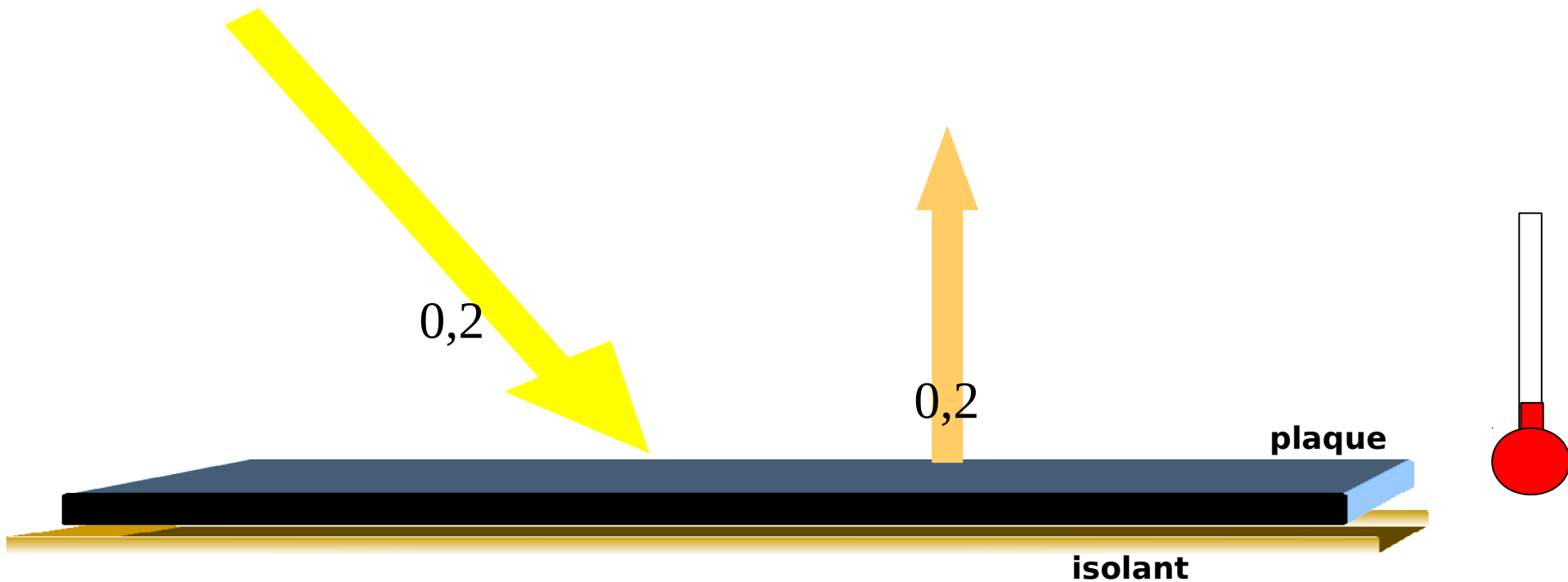
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

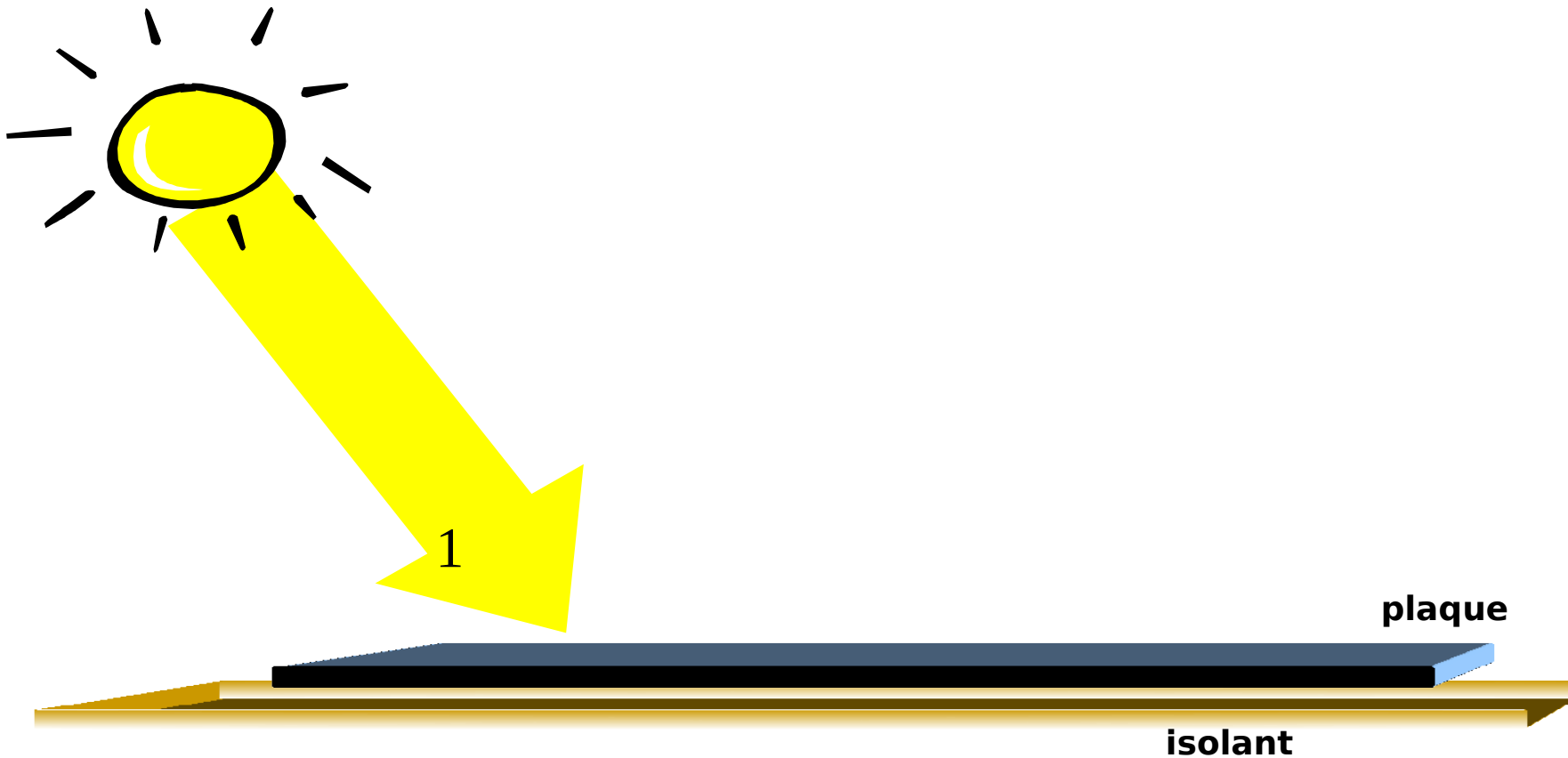
### 3) L'équilibre énergétique



- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

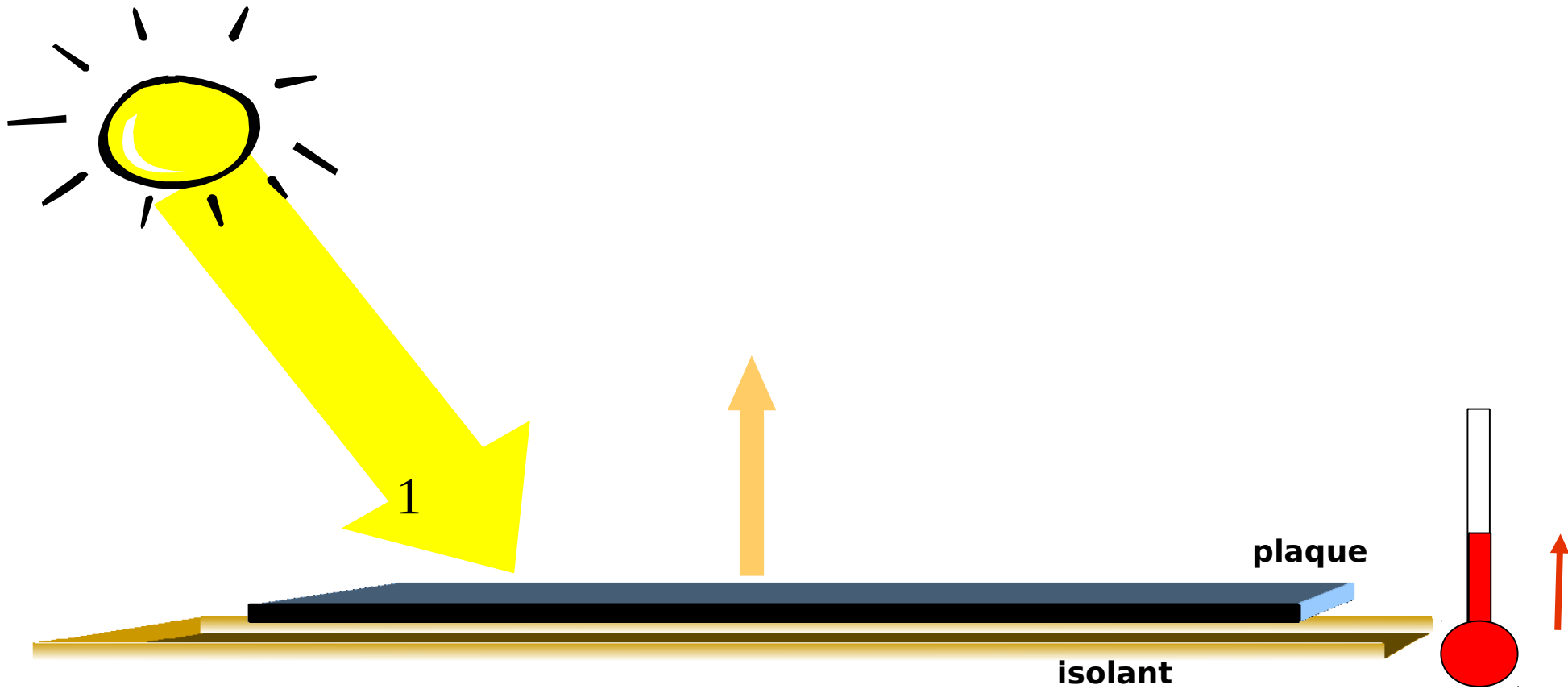


## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



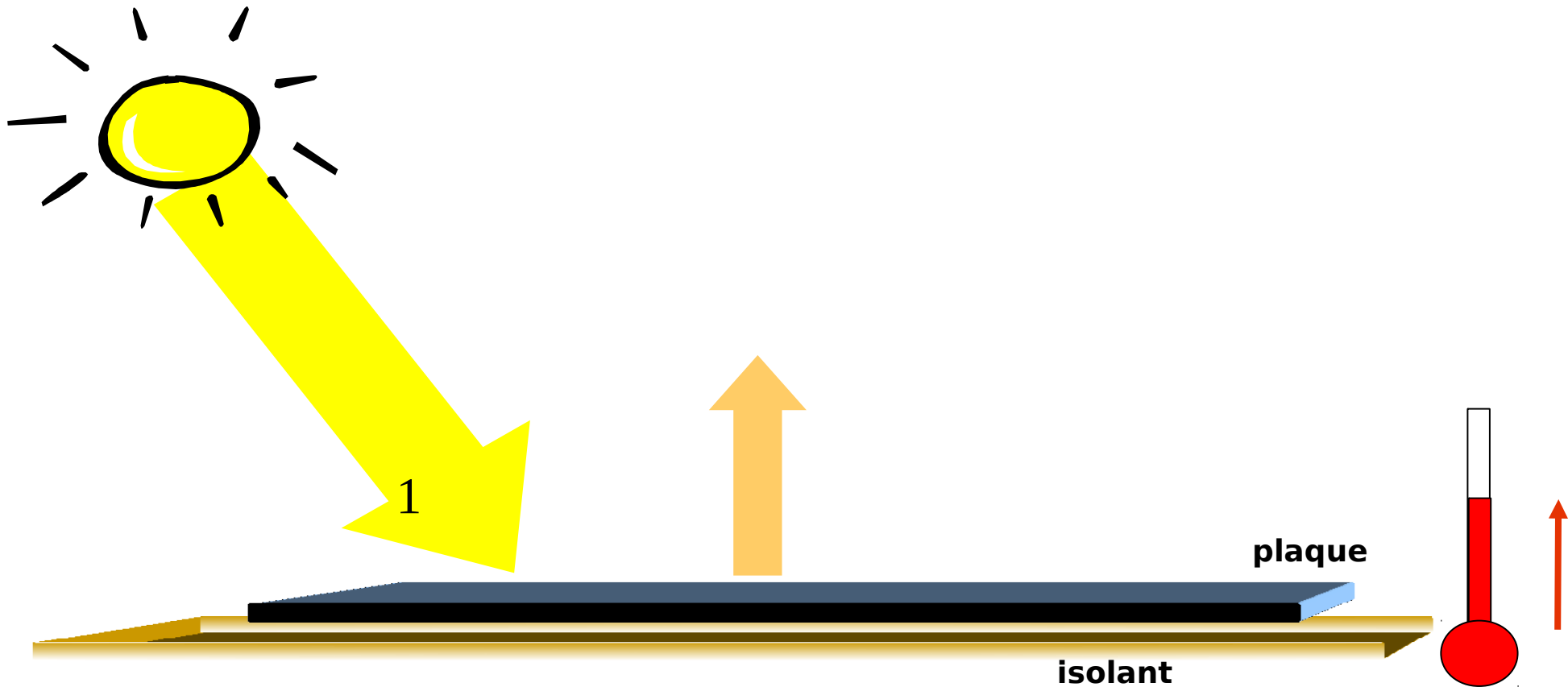
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.

## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



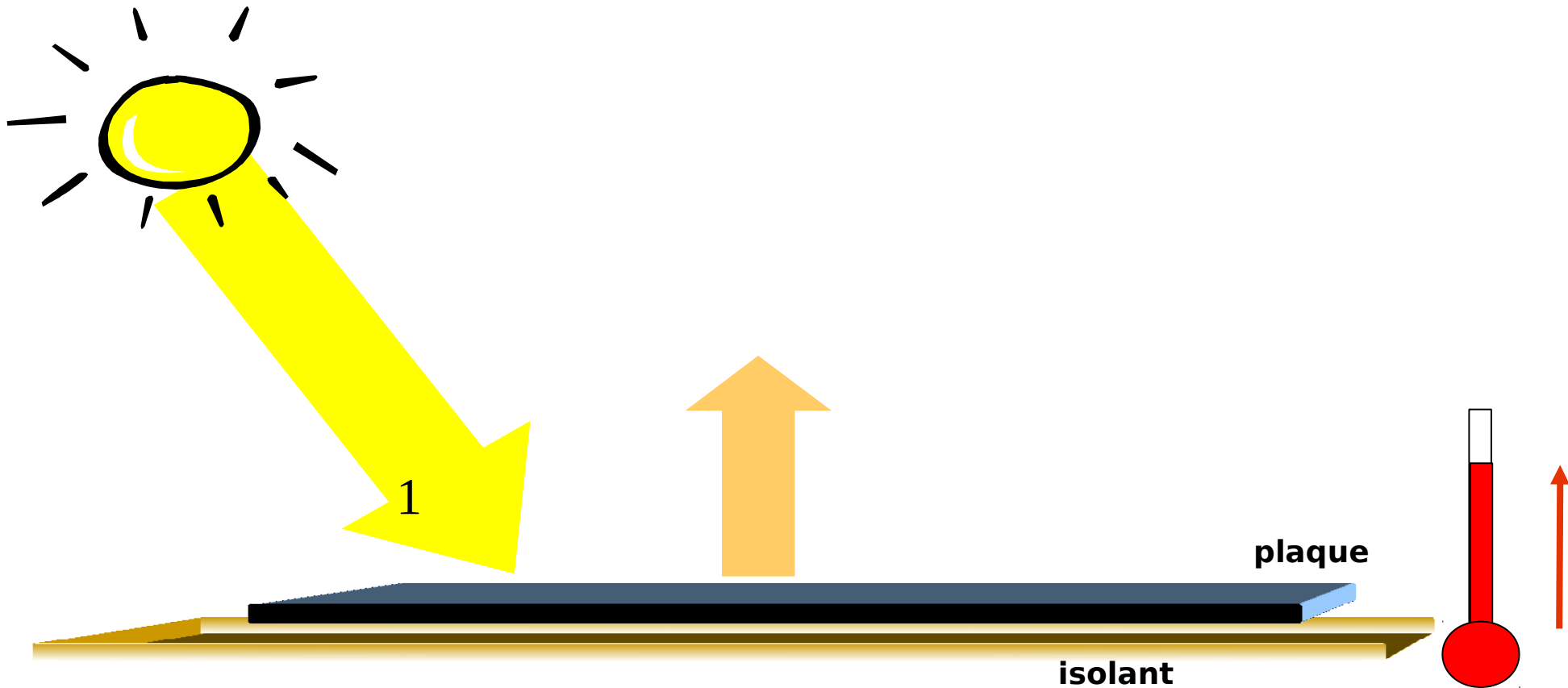
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



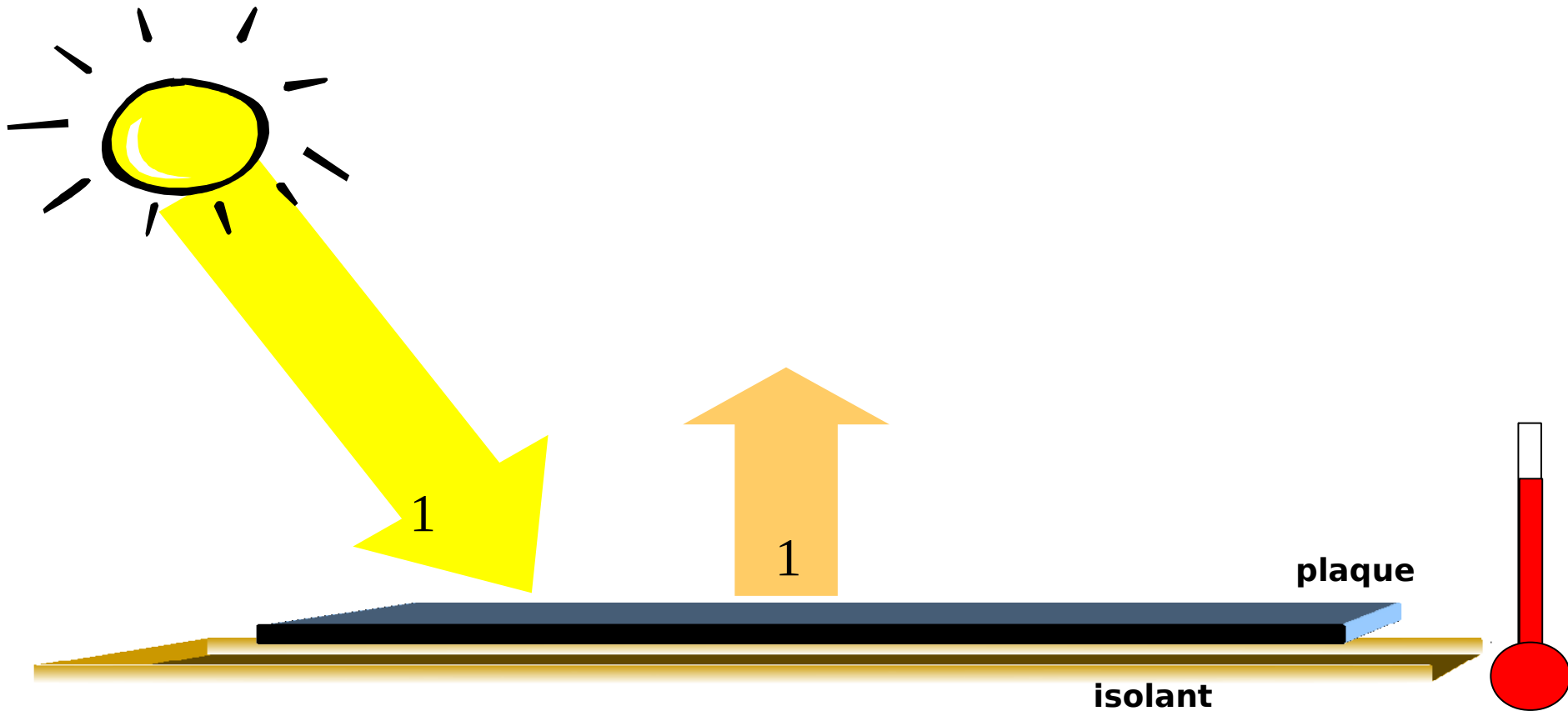
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



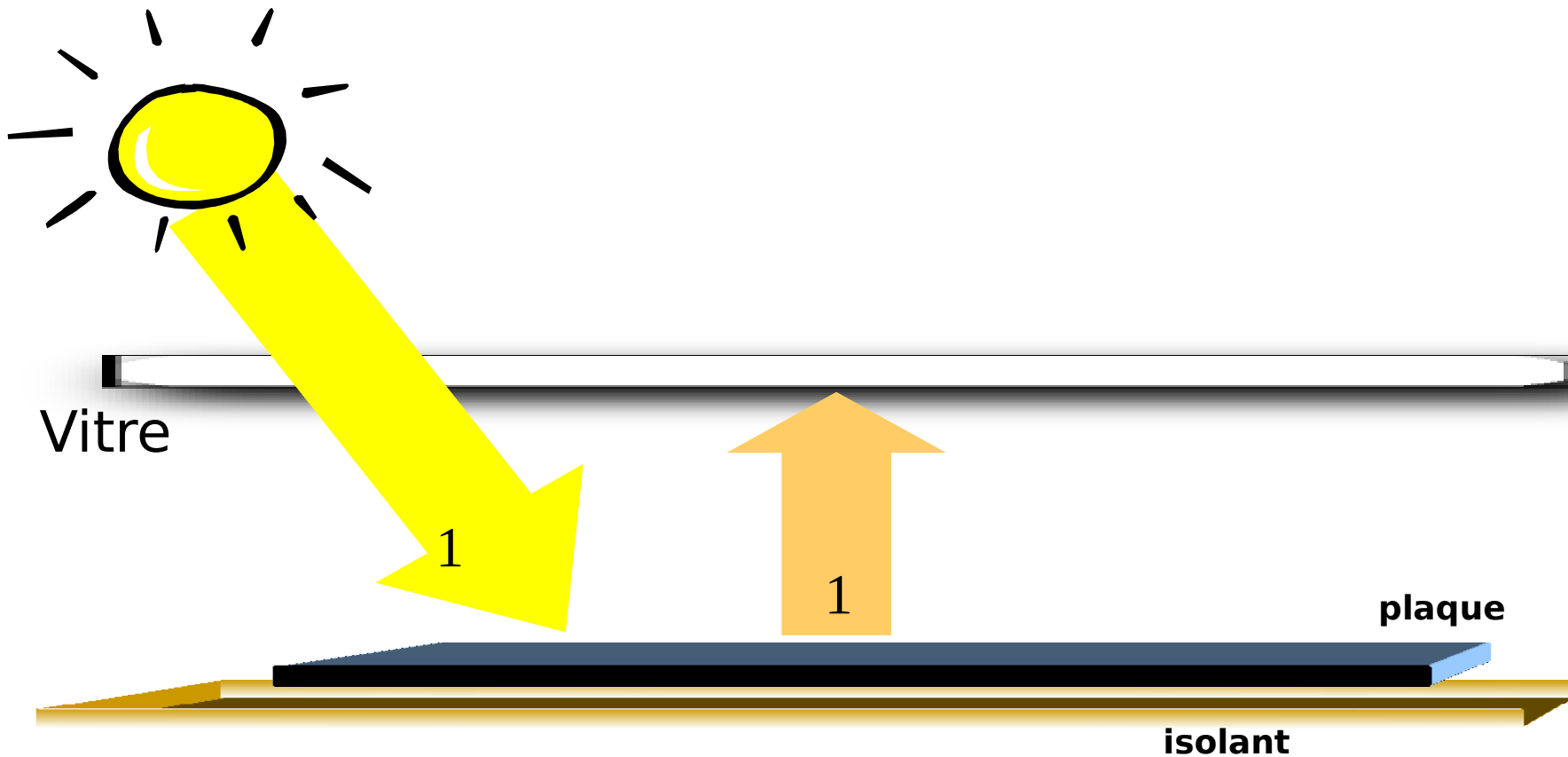
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



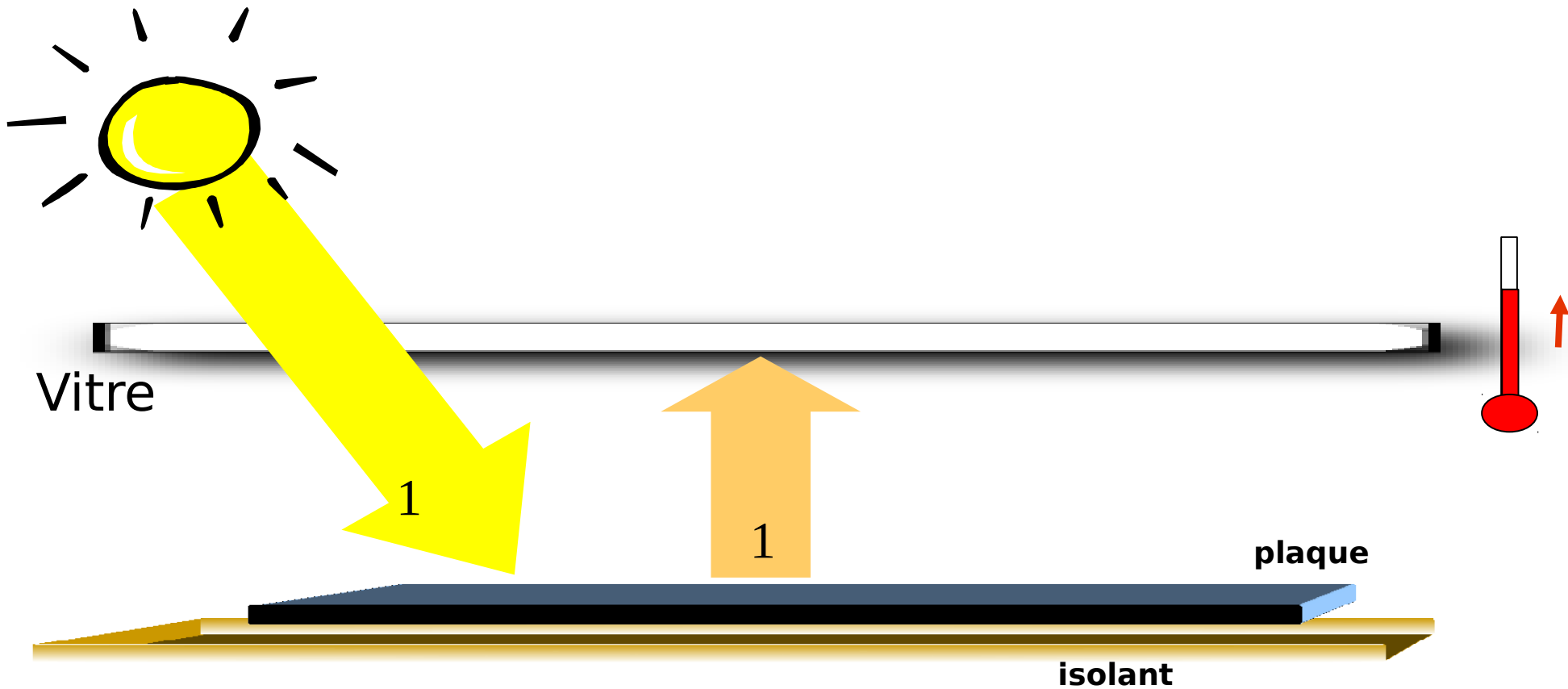
c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.

## 5) L'effet de serre



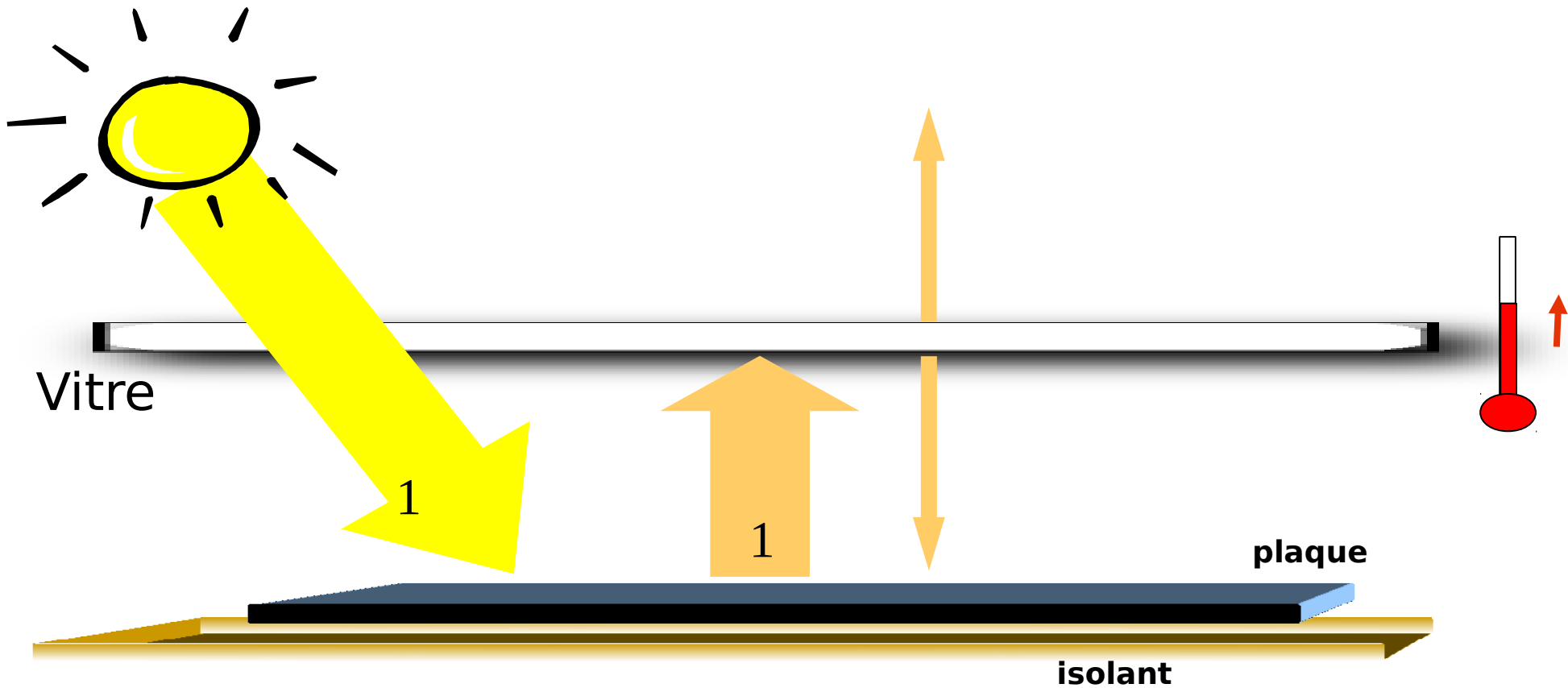
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

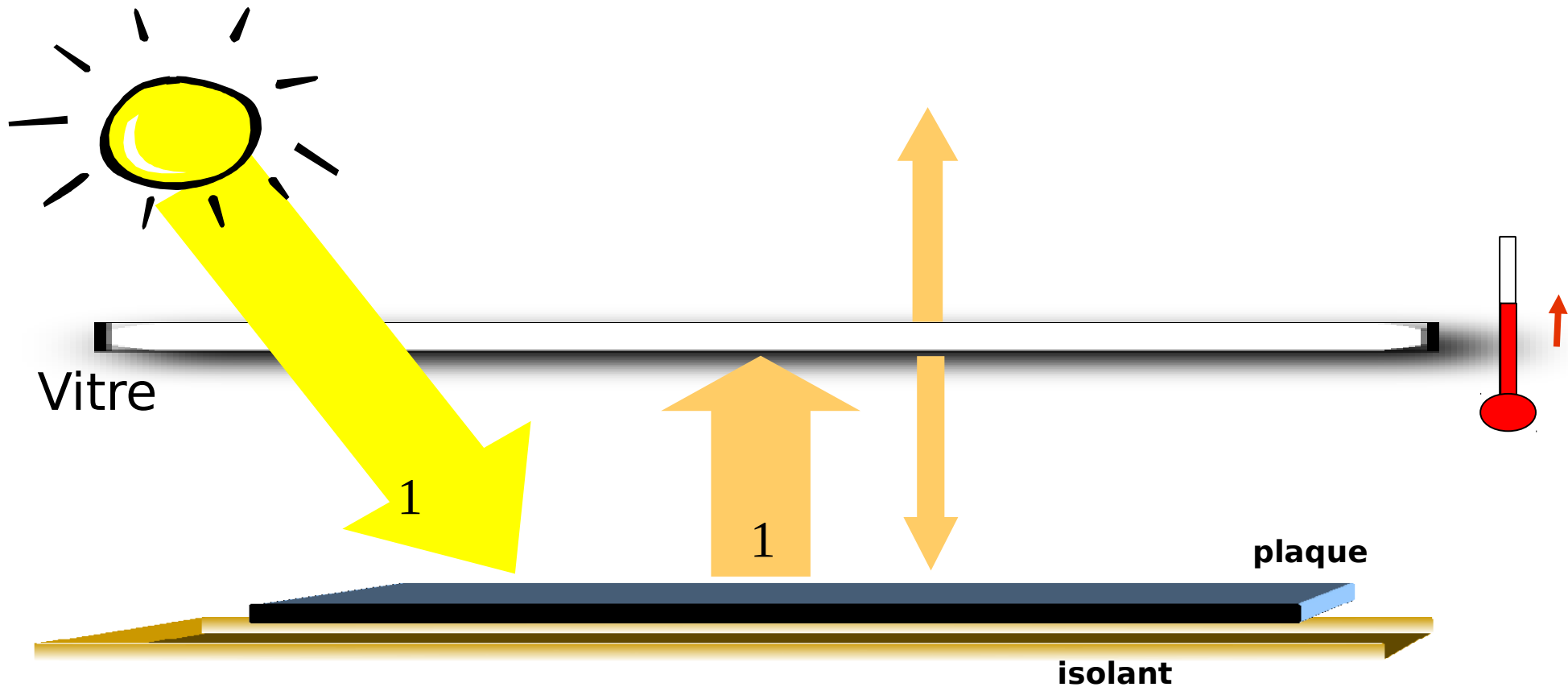
## 5) L'effet de serre



Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

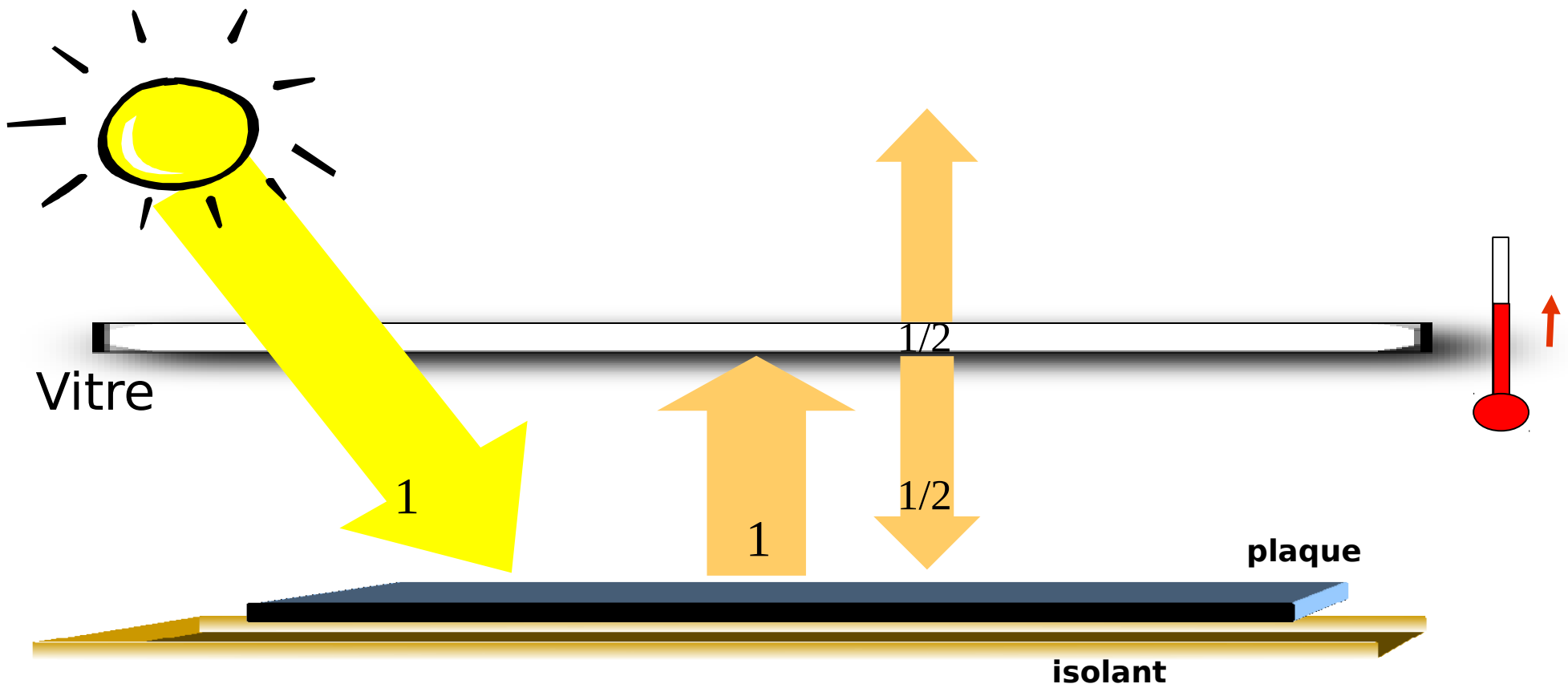


## 5) L'effet de serre



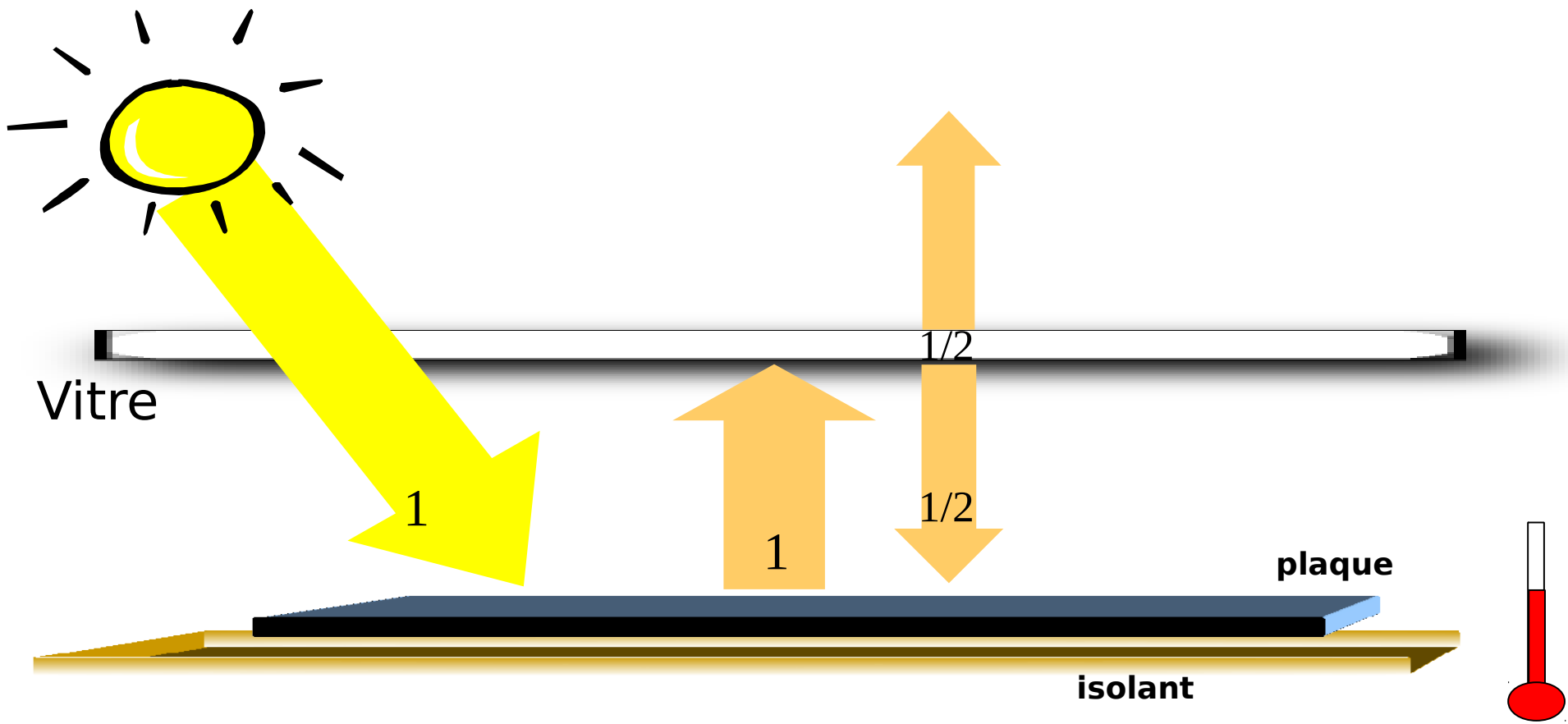
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



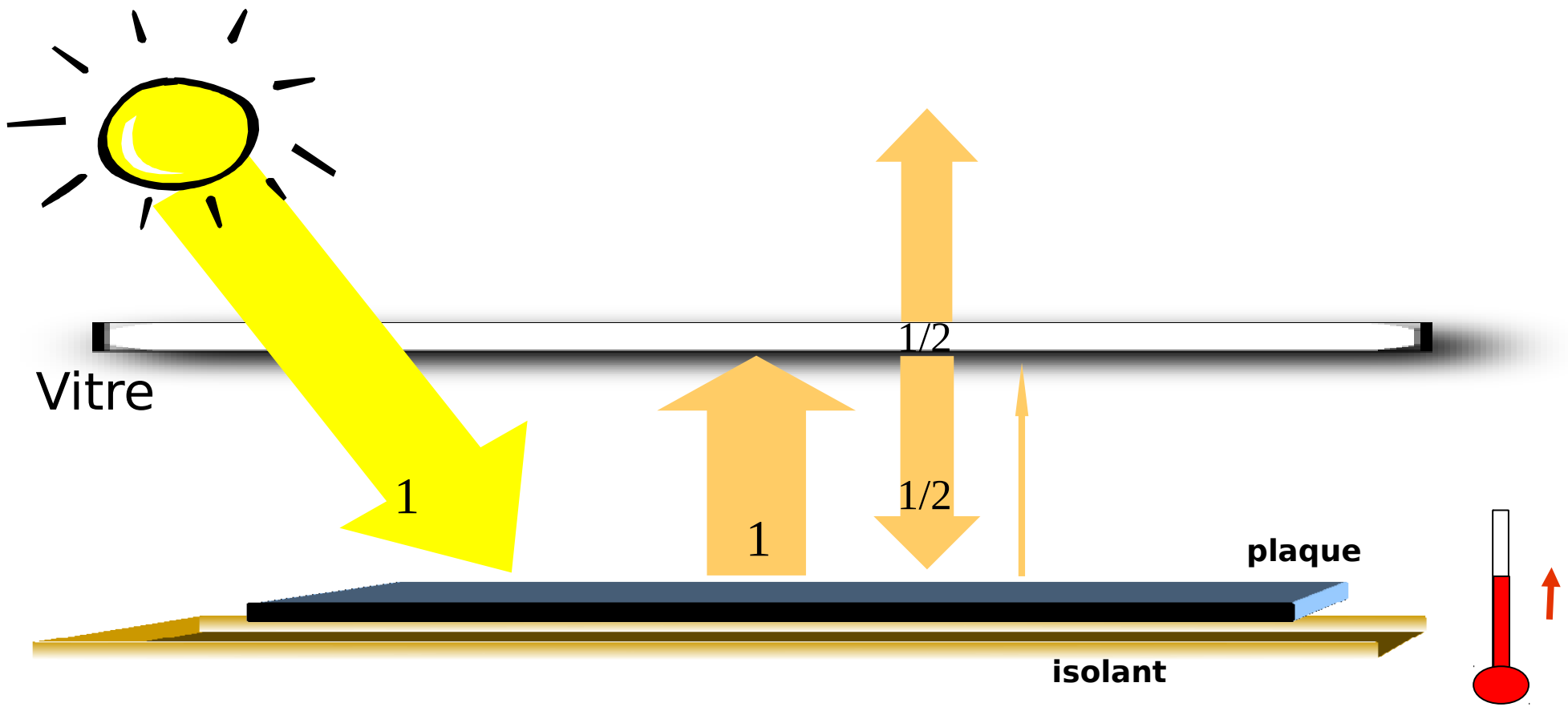
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

# 5) L'effet de serre



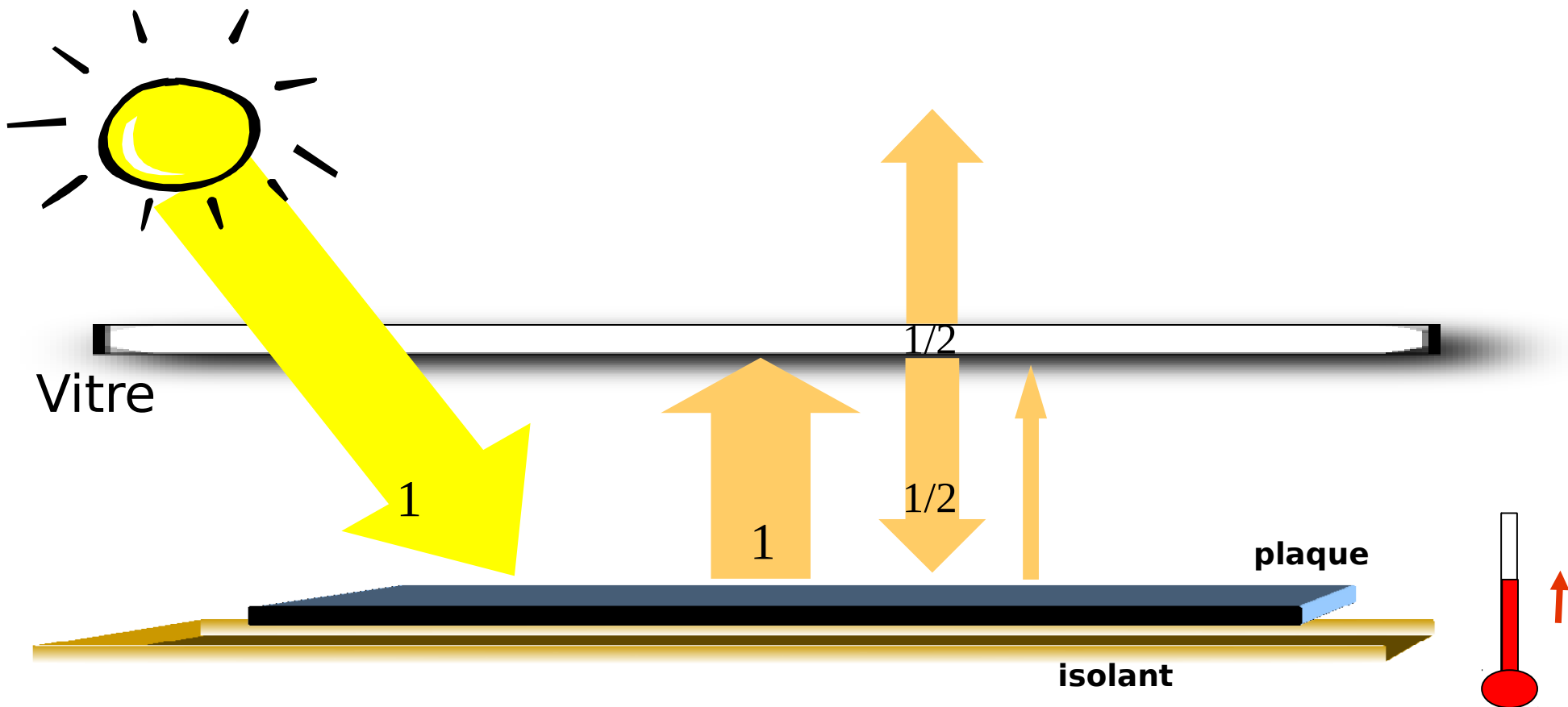
Le rayonnement infrarouge émis par la vitre vers le bas est absorbé par la plaque.

## 5) L'effet de serre



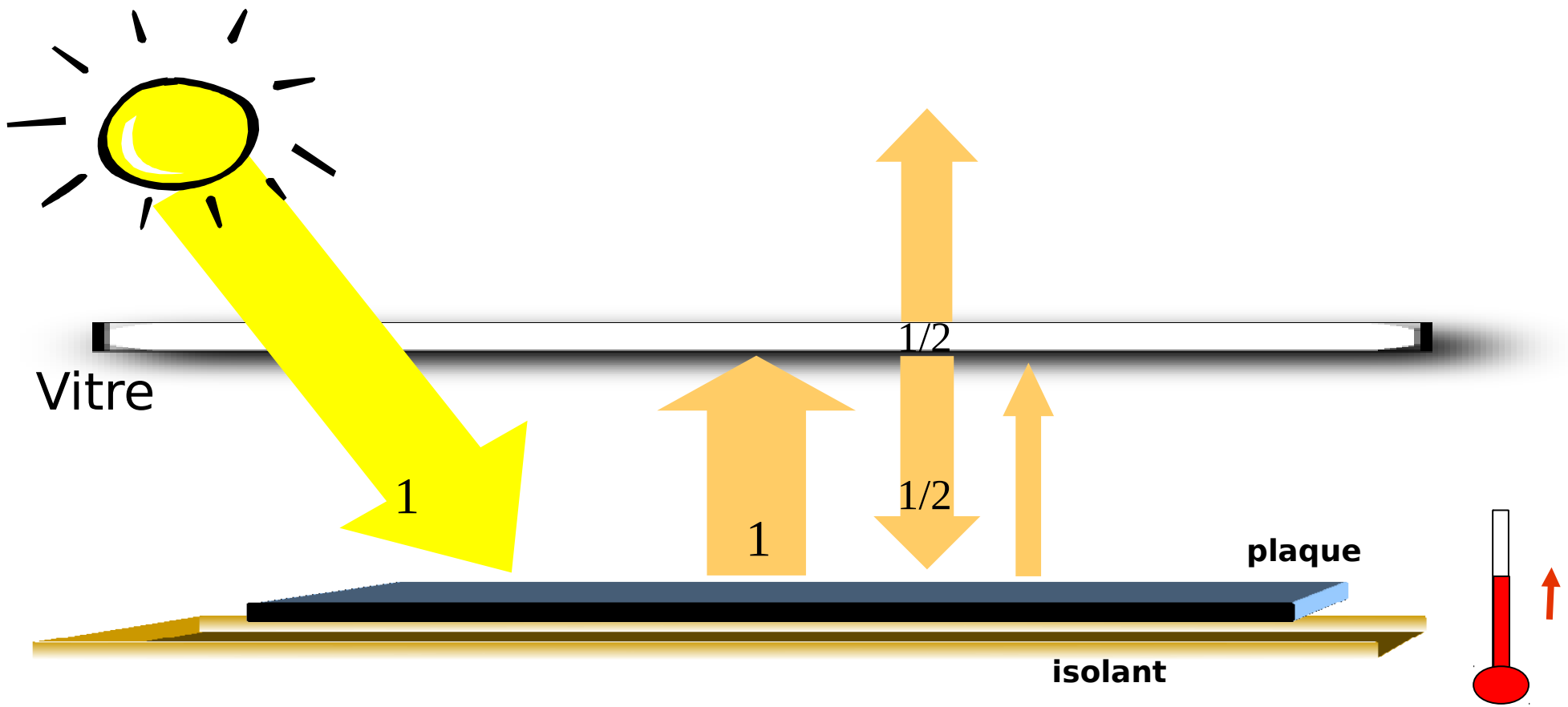
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



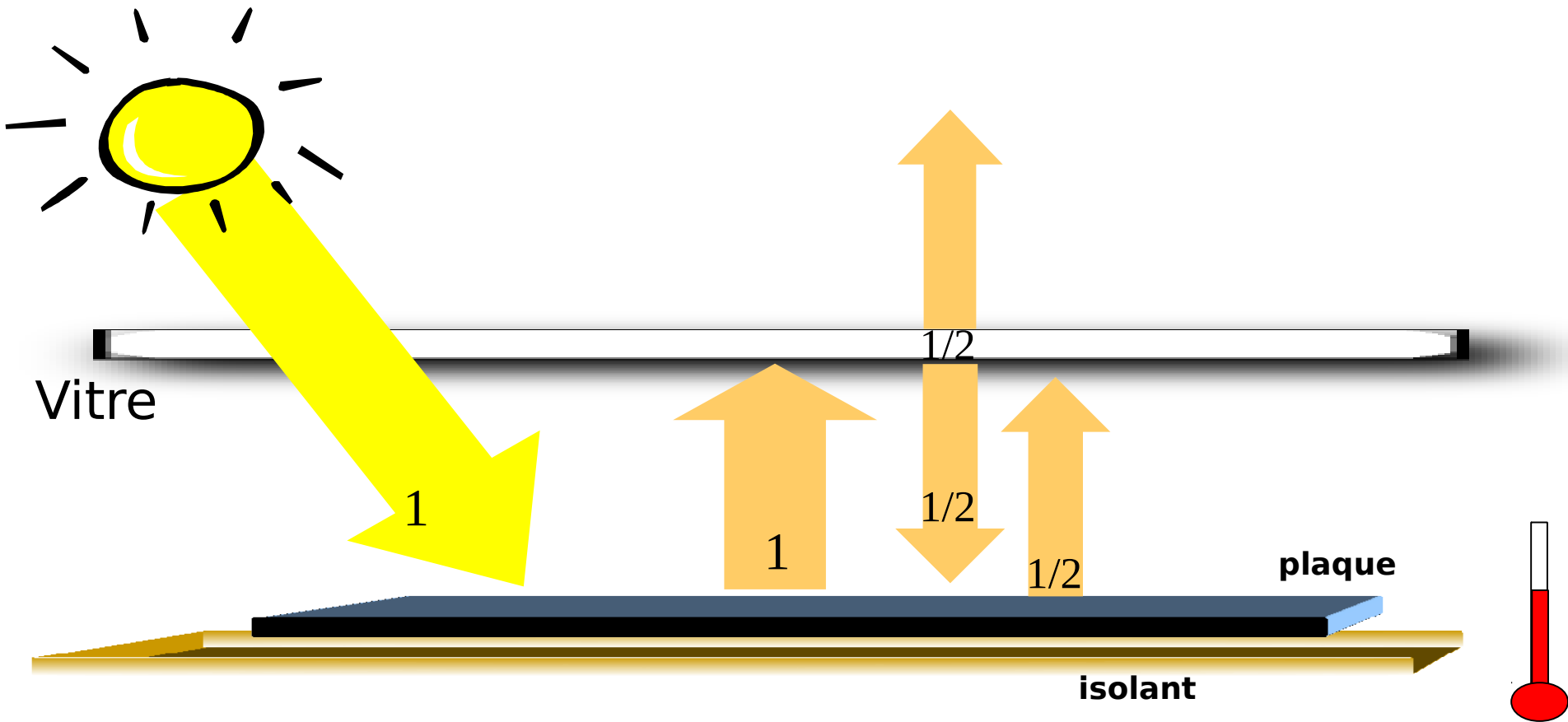
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



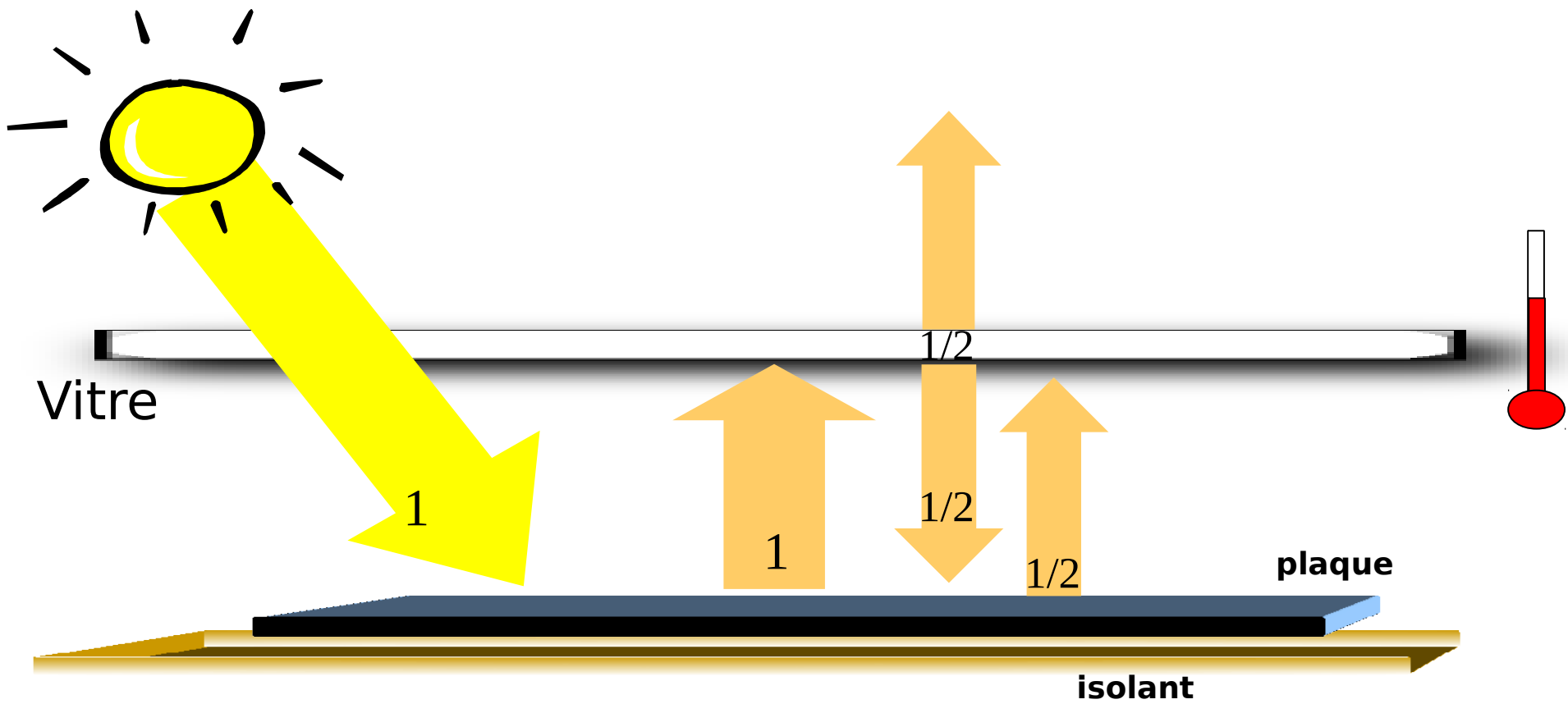
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

# 5) L'effet de serre



Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre.

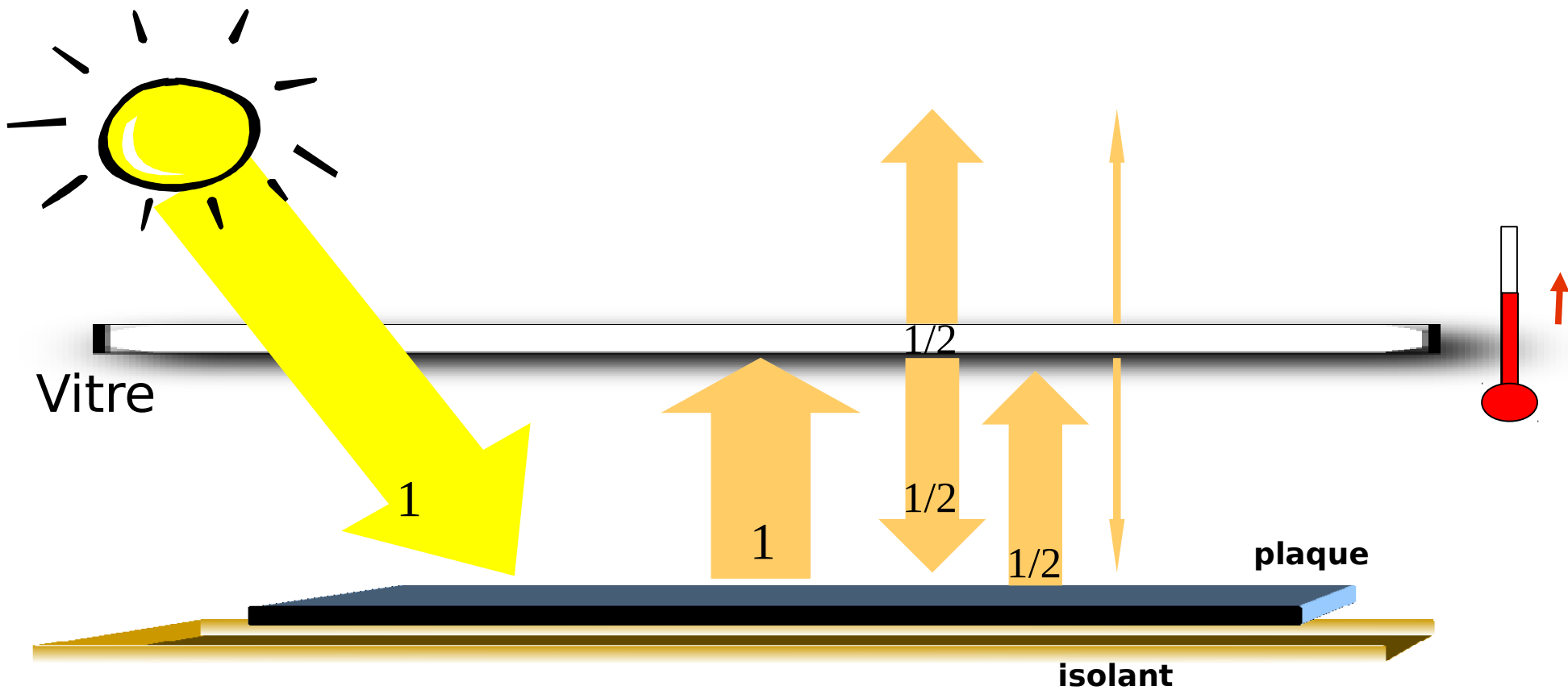
## 5) L'effet de serre



Ce rayonnement supplémentaire émis par la plaque est de nouveau absorbé par la vitre dont la température augmente encore.

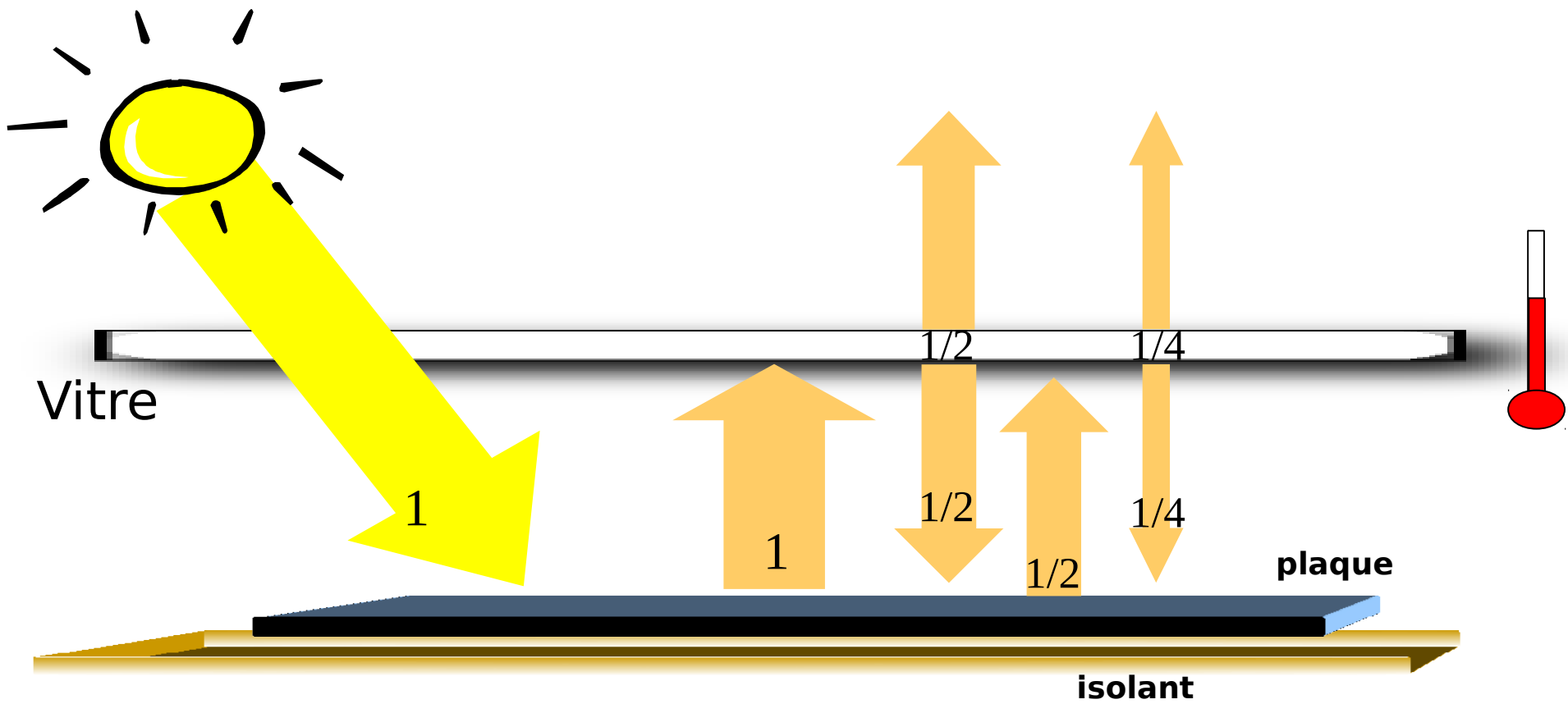


## 5) L'effet de serre



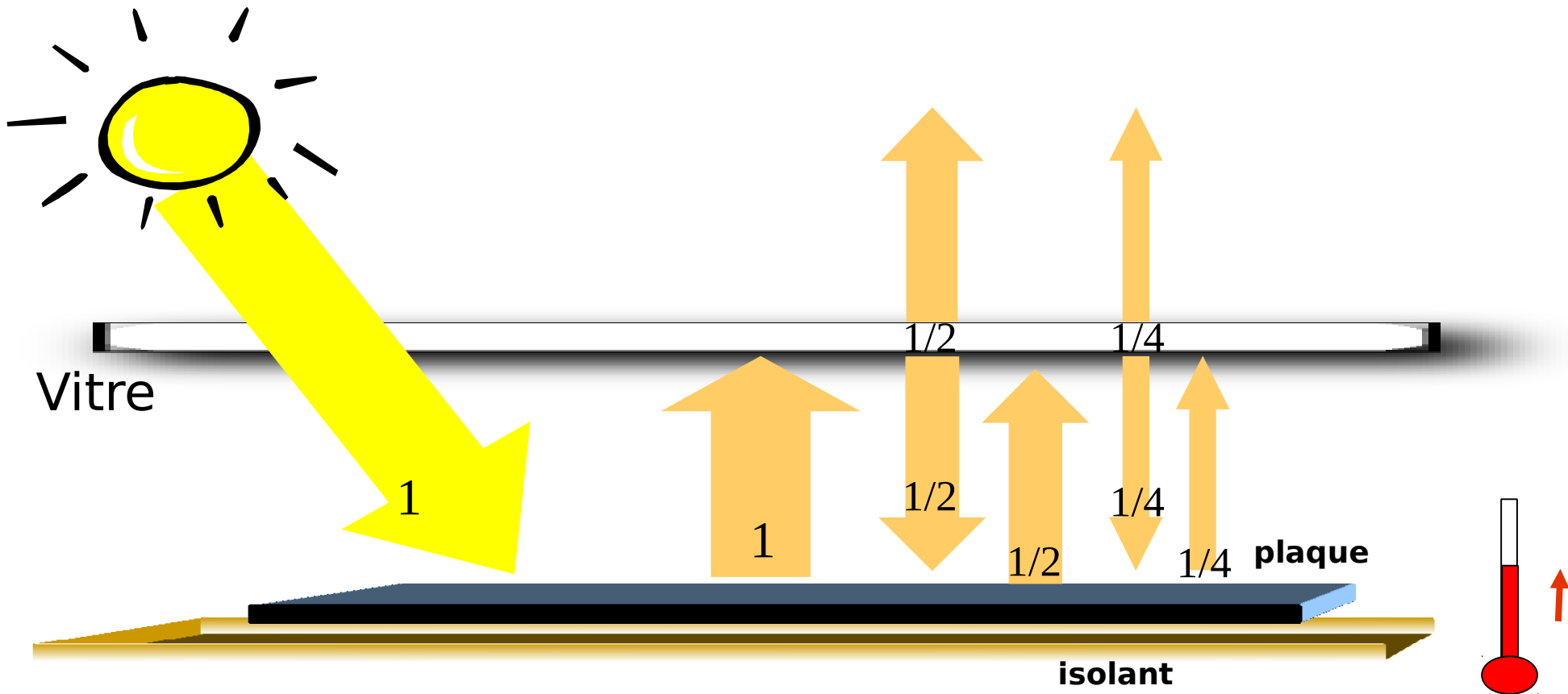
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge, moitié vers le haut, moitié vers le bas.

# 5) L'effet de serre



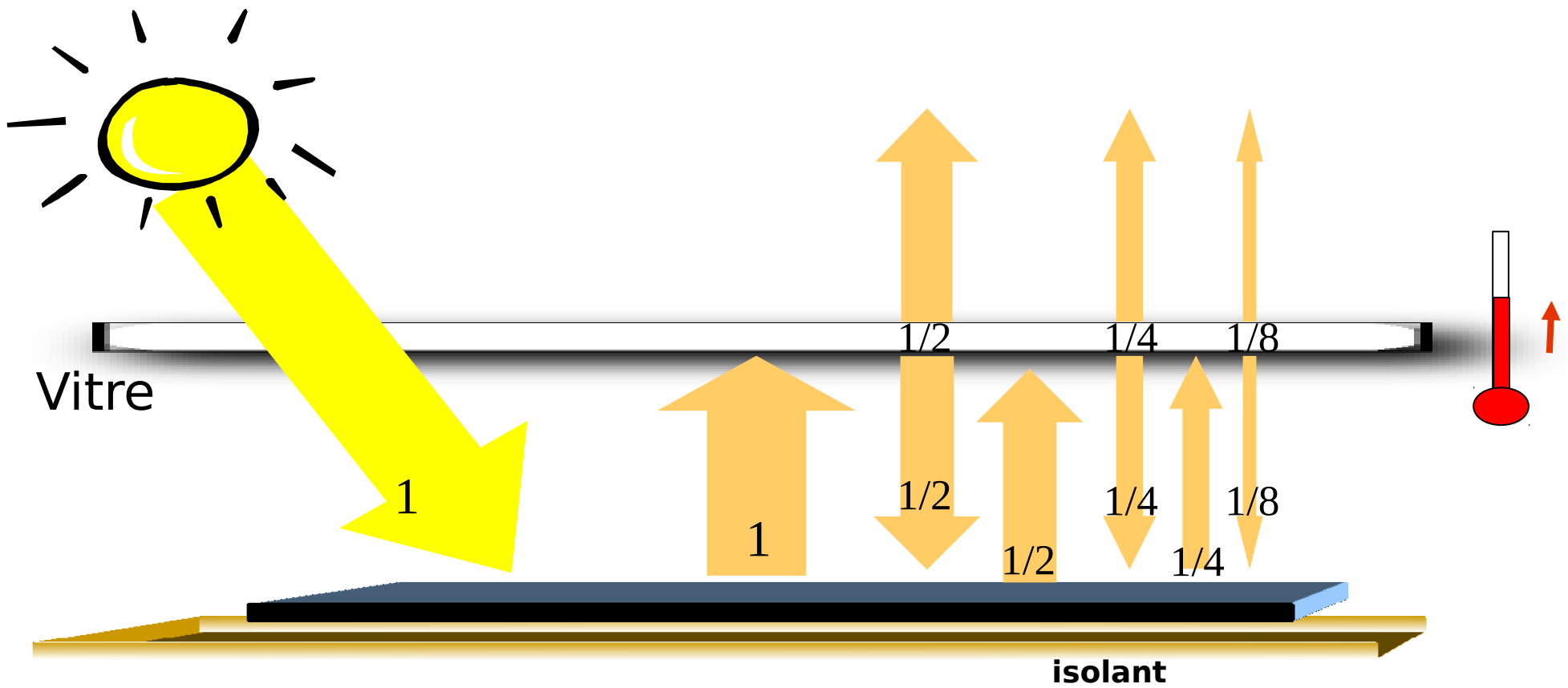
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



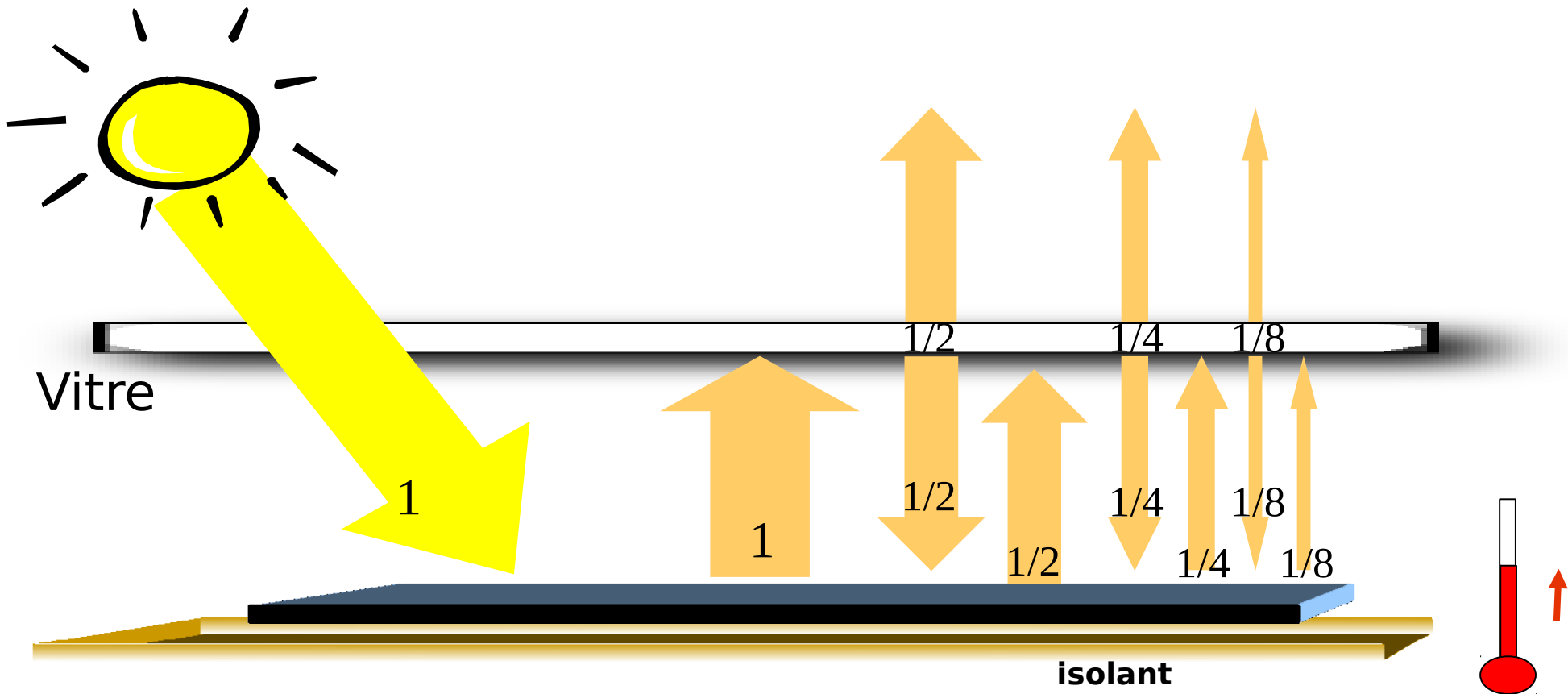
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



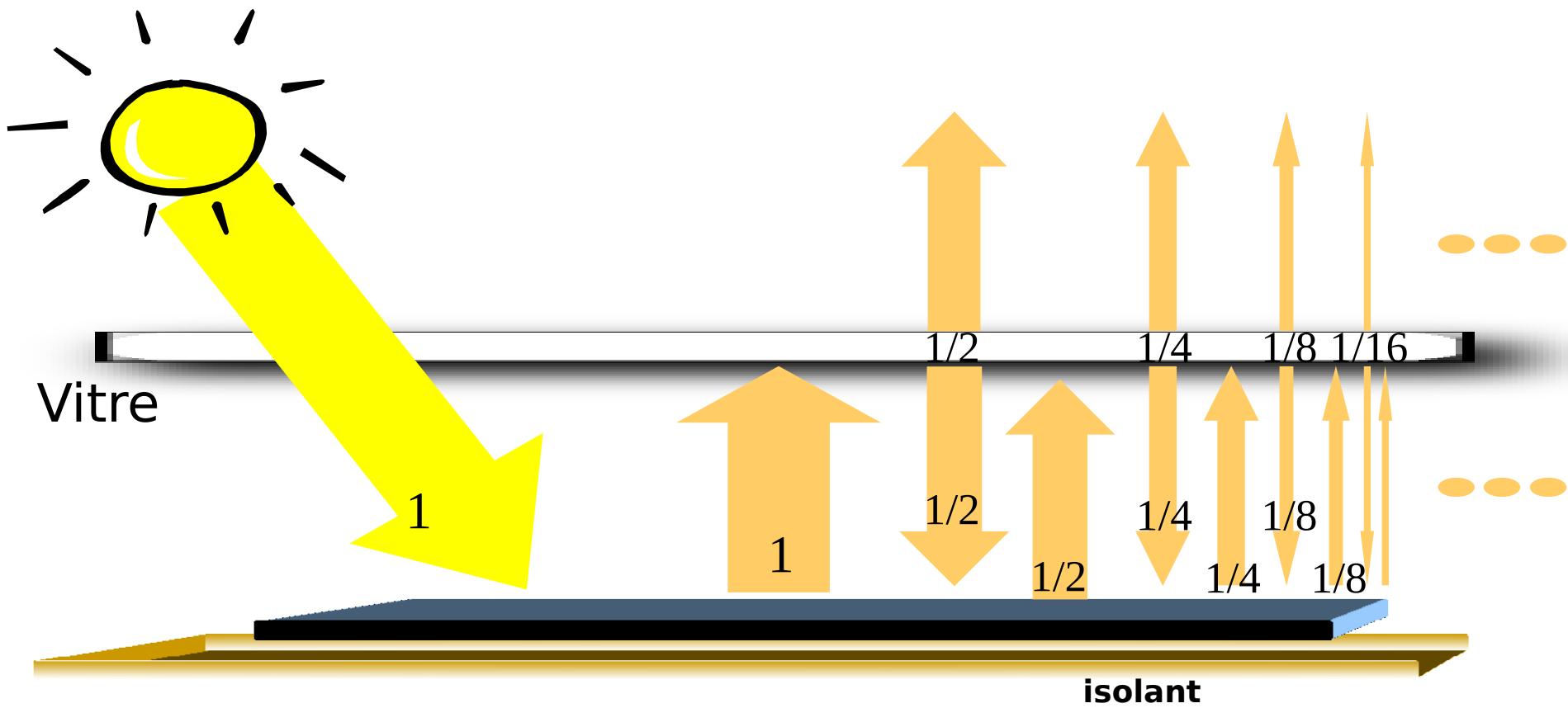
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



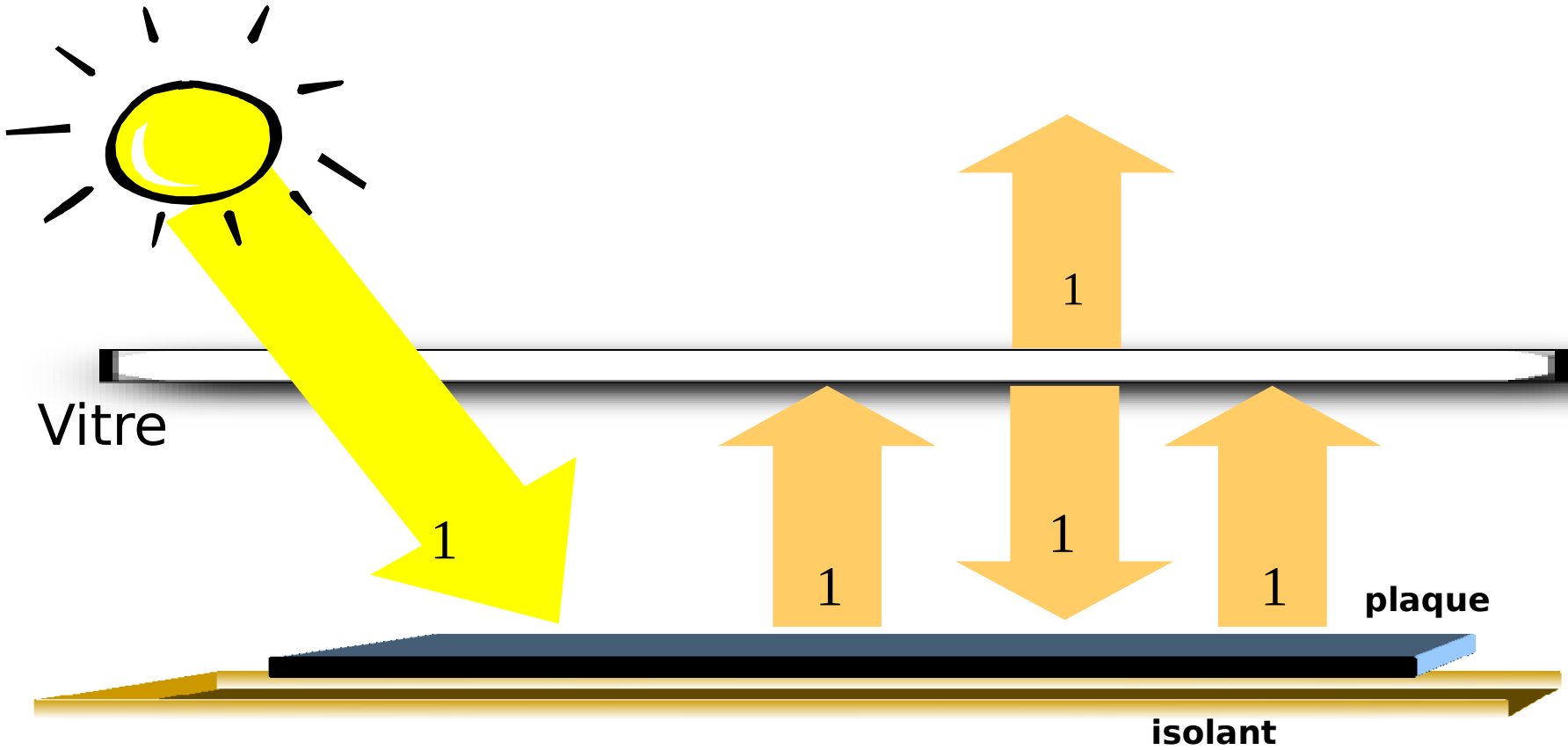
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

# 5) L'effet de serre



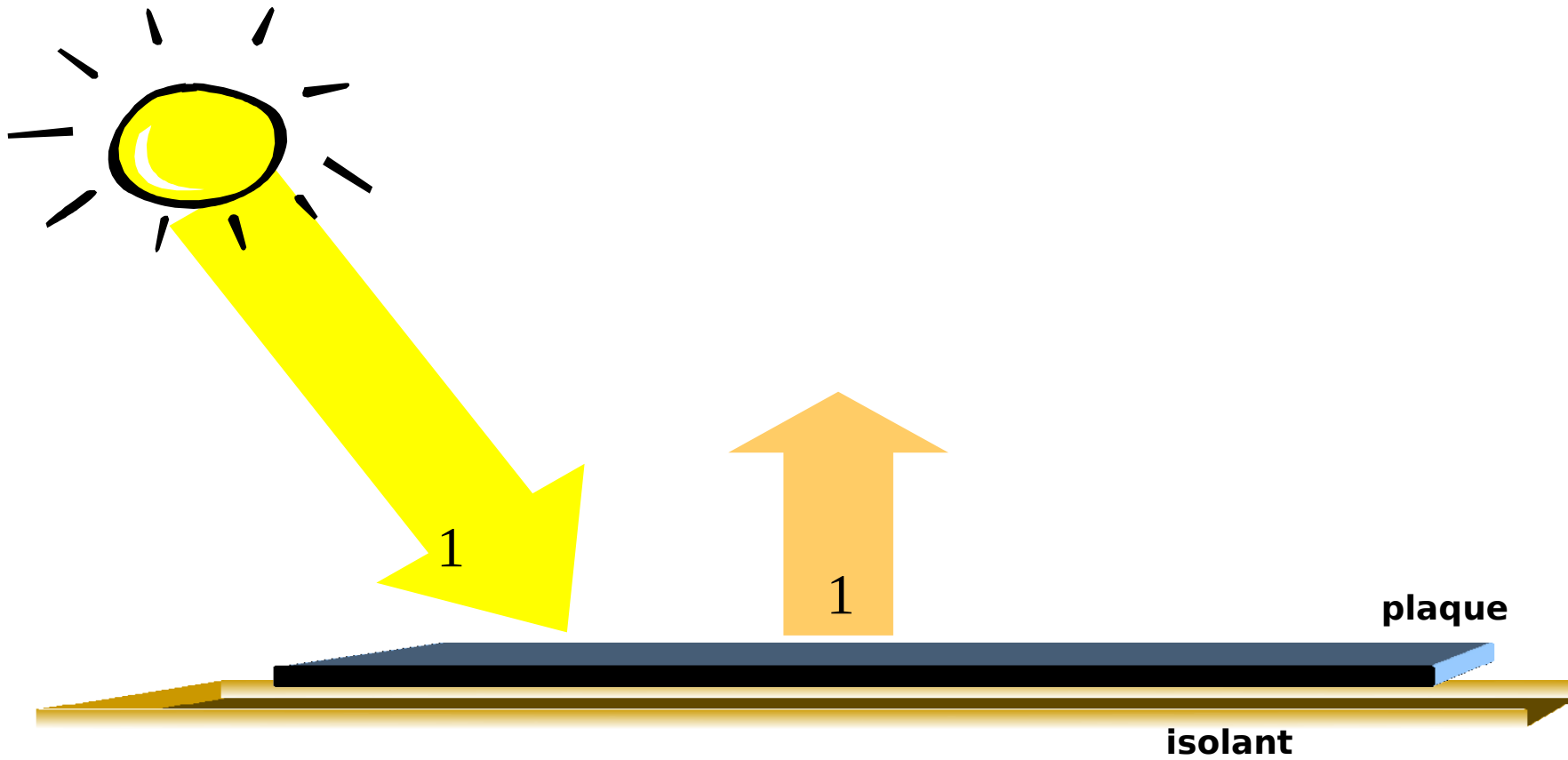
etc...

# 5) L'effet de serre



et si on fait la somme...

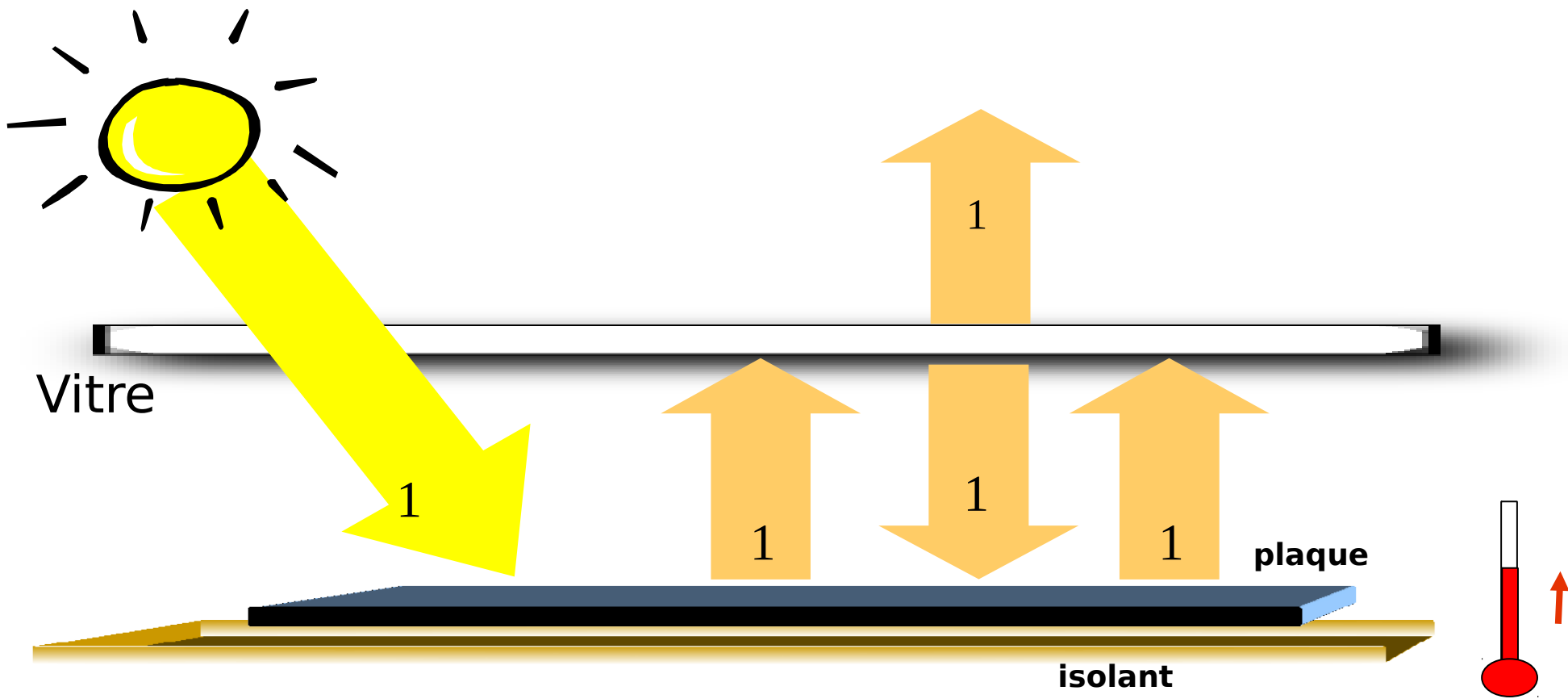
## 5) L'effet de serre



Si on résume le déroulement précédent, ...

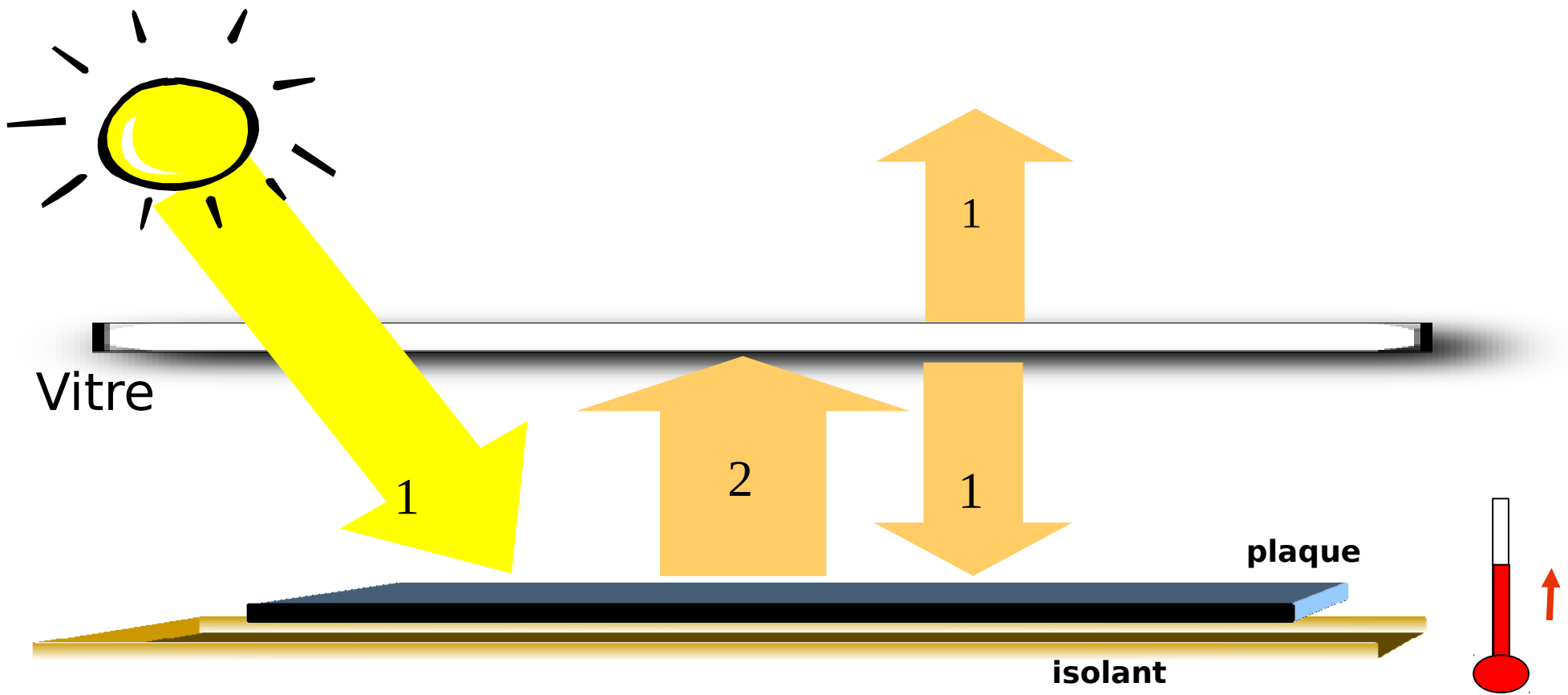


## 5) L'effet de serre



on retient que placer une vitre au dessus d'une plaque au soleil a pour effet de «piéger» le rayonnement infrarouge émis par la plaque, et donc d'augmenter sa température.

## 5) L'effet de serre



on retient que placer une vitre au dessus d'une plaque au soleil a pour effet de «piéger» le rayonnement infrarouge émis par la plaque, et donc d'augmenter sa température.

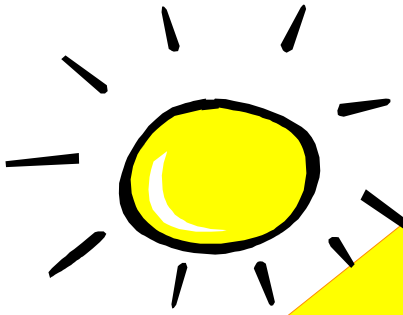
## 5) L'effet de serre

**Effet de serre:** accroissement de température liée à la présence d'un constituant (vitre, atmosphère...) qui laisse passer le rayonnement solaire mais absorbe le rayonnement infrarouge

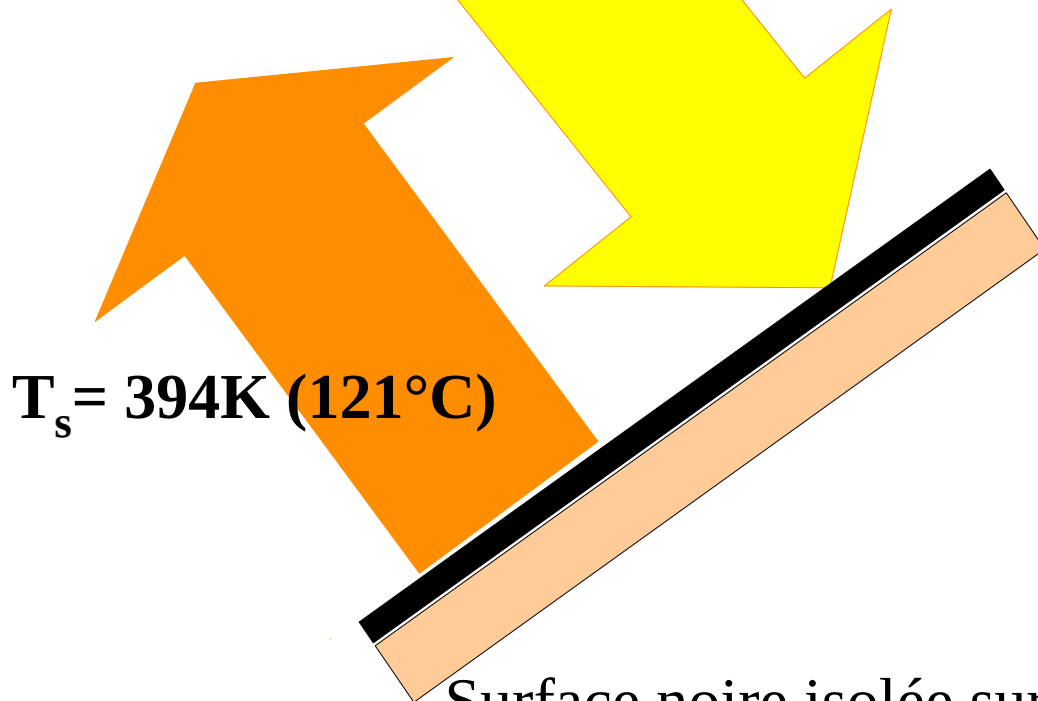
La vitre **absorbe** le rayonnement infrarouge, ne le réfléchit pas

Dans la réalité les phénomènes sont plus compliqués (mouvement d'air), néanmoins notre exemple reste tout à fait valable pour comprendre les mécanismes de l'effet de serre.

# Température d'équilibre d'une planète



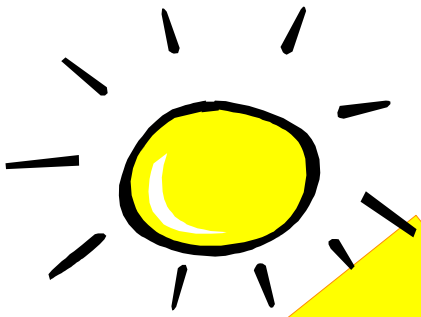
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$



$T_s = 394\text{K} (121^\circ\text{C})$

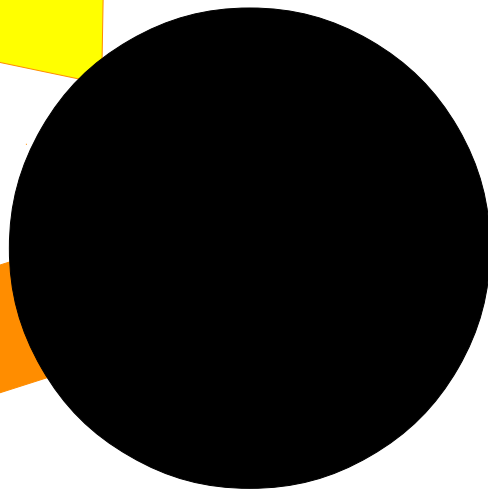
Surface noire isolée sur une face

# Température d'équilibre d'une planète



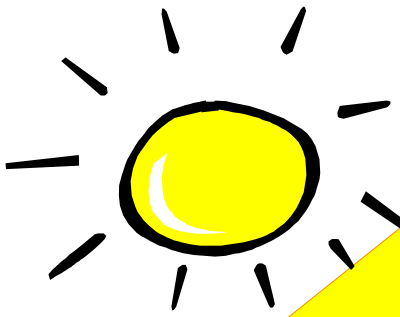
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

Flux solaire incident **moyen** sur la **sphère**:  $F_s = F_0/4 = 341 \text{ W.m}^{-2}$



$T_s = 278\text{K} (5^\circ\text{C})$

# Température d'équilibre d'une planète



Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

Flux solaire incident **moyen** sur la **sphère**:  $F_s = F_0/4 = 341 \text{ W.m}^{-2}$

**2/3 du flux est absorbé** :  $F_a = 240 \text{ W.m}^{-2}$

**1/3 du flux réfléchi**

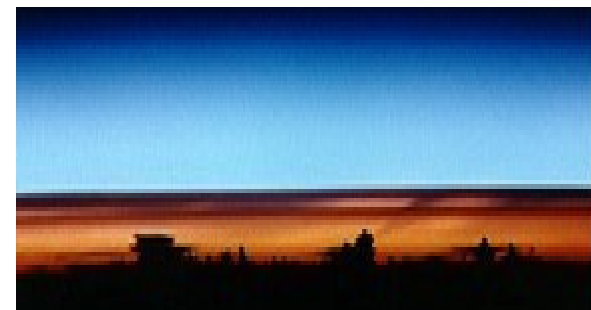
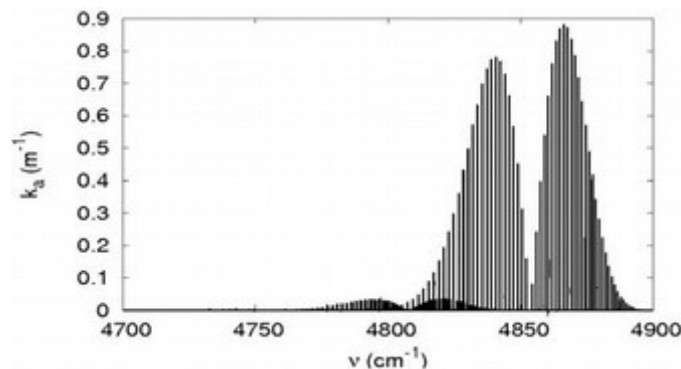


$T_s = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$

**La température** moyenne de la surface **de la Terre est de 15°C** environ.

L'effet de serre est la cause de la différence entre **-18°C** et **15°C**

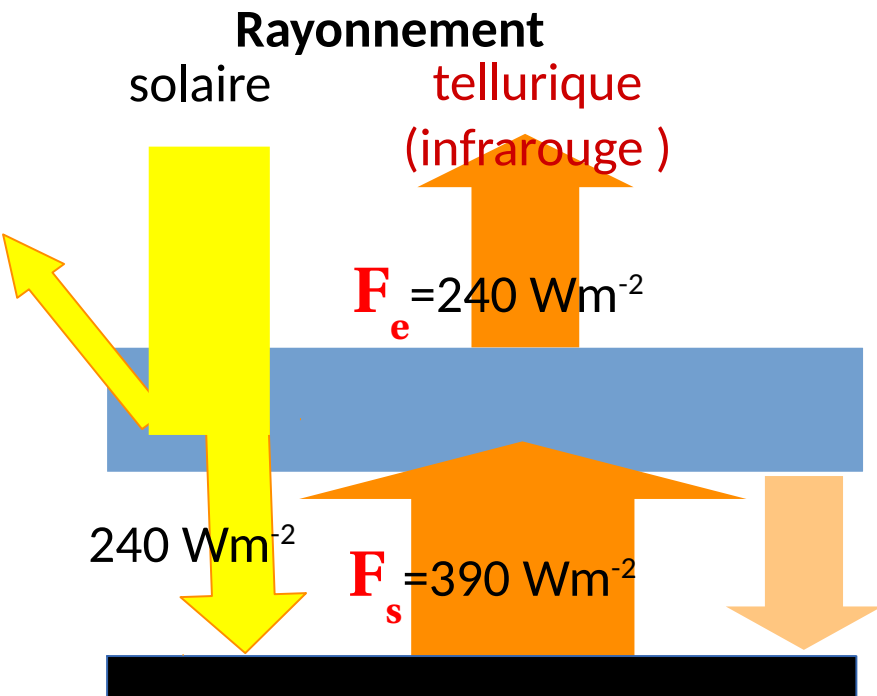
# Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives

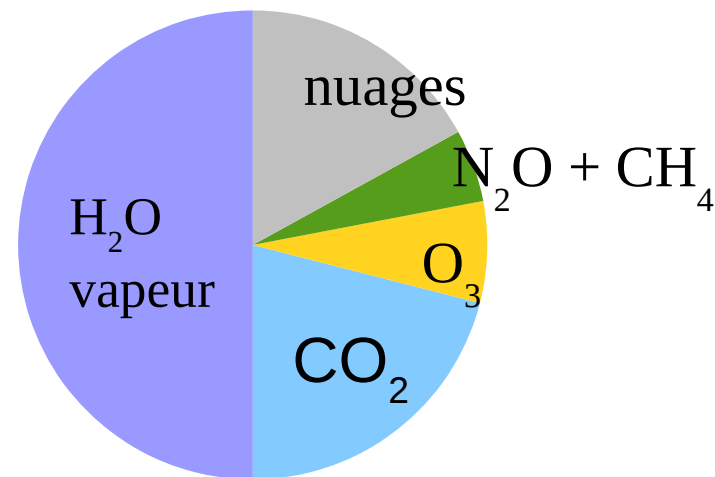
Profils atmosphériques

Calcul des flux radiatifs  $F$  et de l'effet de serre

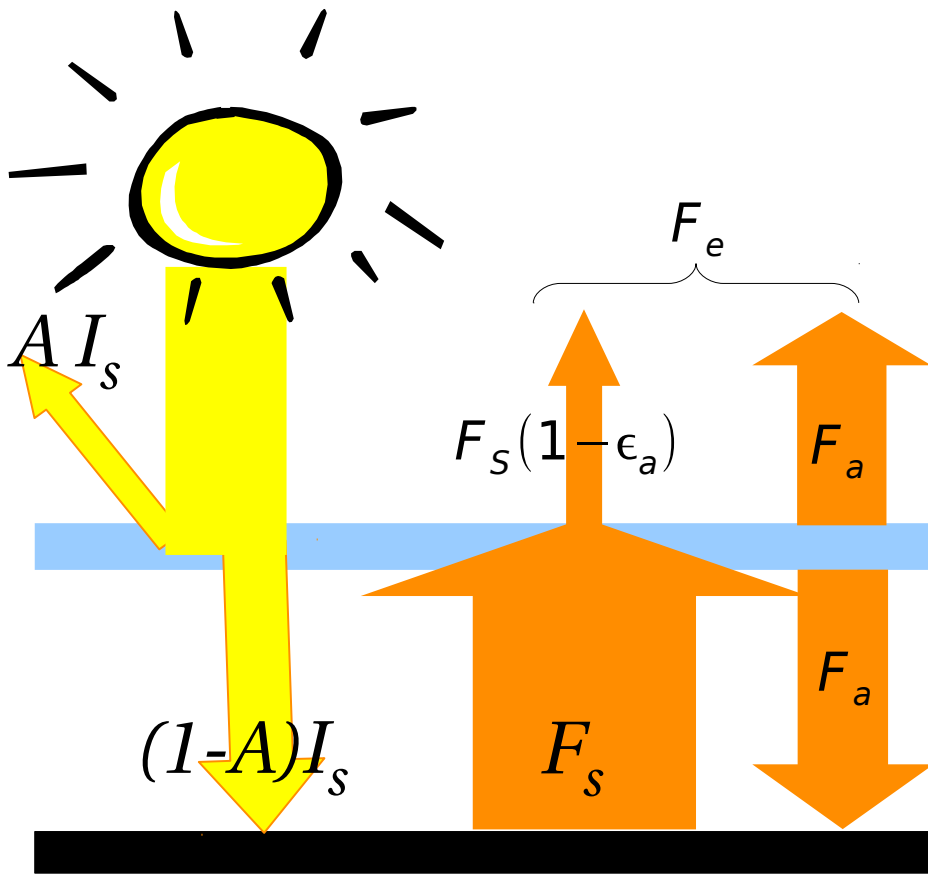
$$G = F_s - F_e$$


Effet de serre sur Terre : (W.m<sup>-2</sup>) (%)

Total	150	
Vapeur d'eau	75	50
CO <sub>2</sub>	32	21
ozone	10	7
N <sub>2</sub> O+CH <sub>4</sub>	8	5
Nuages	25	17



# Modèle de « serre » à 1 couche



**Couche isotherme** (vitre, atmosphère):

- Rayonnement solaire: transparent
- Rayonnement Infrarouge: émissivité=absorptivité= $\epsilon_a$

**Surface:** albédo  $A$ , émissivité = 1 (absorbe parfaitement le rayonnement infrarouge)

Équations:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_s = \sigma T_s^4 \quad (F_a = \epsilon_a \sigma T_a^4) \\ F_s = (1-A)I_s + F_a \\ F_a = F_s \epsilon_a / 2 \end{array} \right.$$

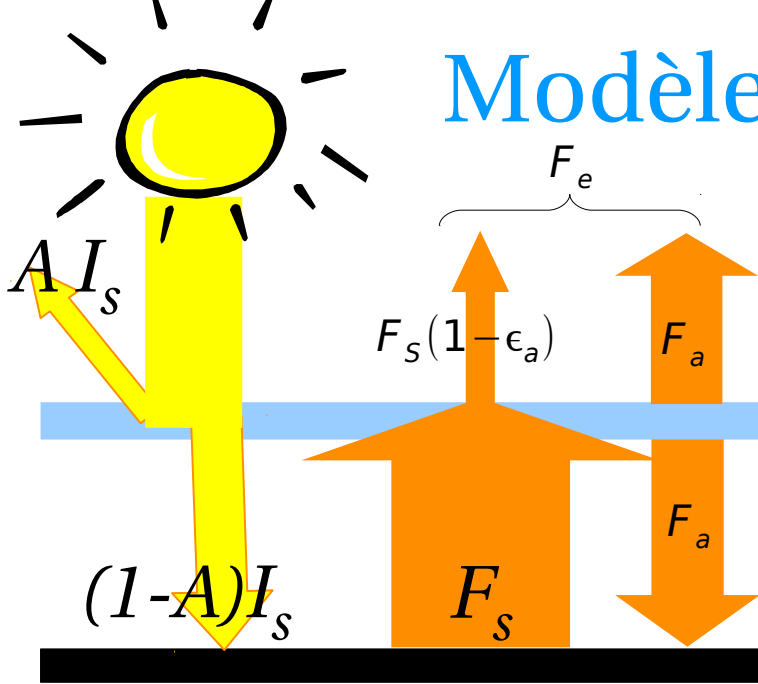
On encore:

$$\sigma T_s^4 = \frac{(1-A)I_s}{1-\epsilon_a/2}$$

➤ La température de surface  $T_s$  dépend du **rayonnement solaire  $I_s$** , de l'**albédo  $A$**  et de l'**absorptivité  $\epsilon_a$** =émissivité de l'atmosphère **dans l'infrarouge**



# Modèle de « serre » à 1 couche



Équations:

$$\begin{cases} F_s = \sigma T_s^4 & (F_a = \epsilon_a \sigma T_a^4) \\ F_s = (1-A)I_s + F_a \\ F_a = F_s \epsilon_a / 2 \end{cases}$$

On encore:

$$\sigma T_s^4 = \frac{(1-A)I_s}{1-\epsilon_a/2}$$

Un modèle très simplifié qui marche plus ou moins bien...

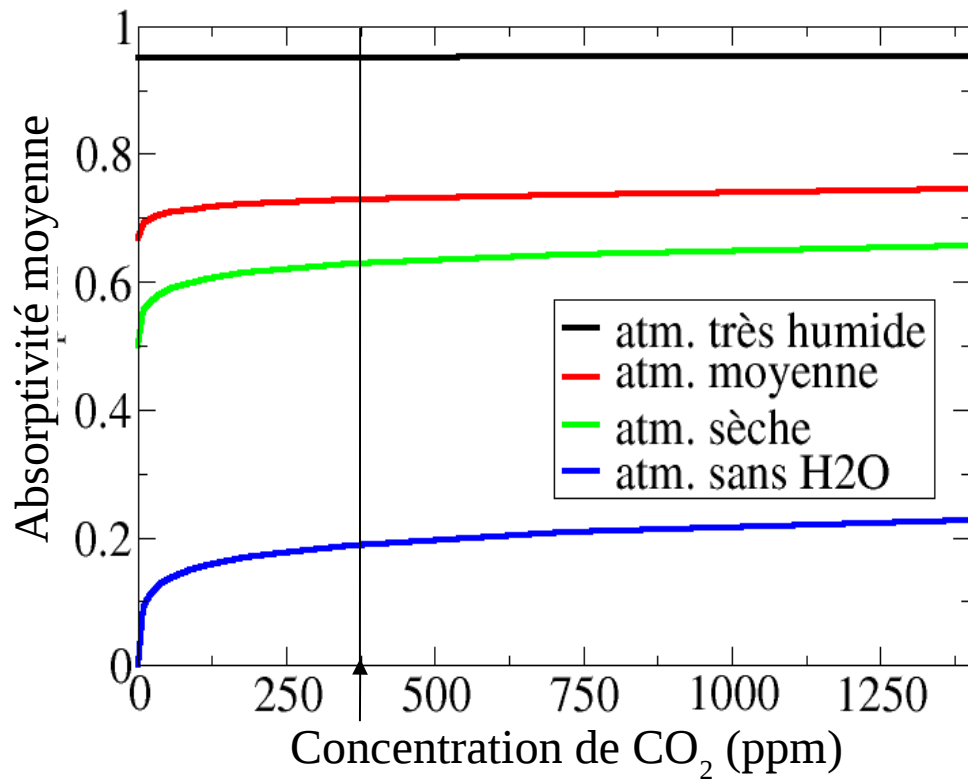
- Pour la Terre actuelle :  $F_s = 1361/4$  ;  $\epsilon_a = 0.8$  ;  $A = 0.3 \Rightarrow T_s = 289\text{K}$  ( $16^\circ\text{C}$ )
- Mais si on ajoute l'absorption du rayonnement solaire de 25 %:  $\Rightarrow T_s = 274\text{K}$  ( $1^\circ\text{C}$ )

Autre limitation importante :

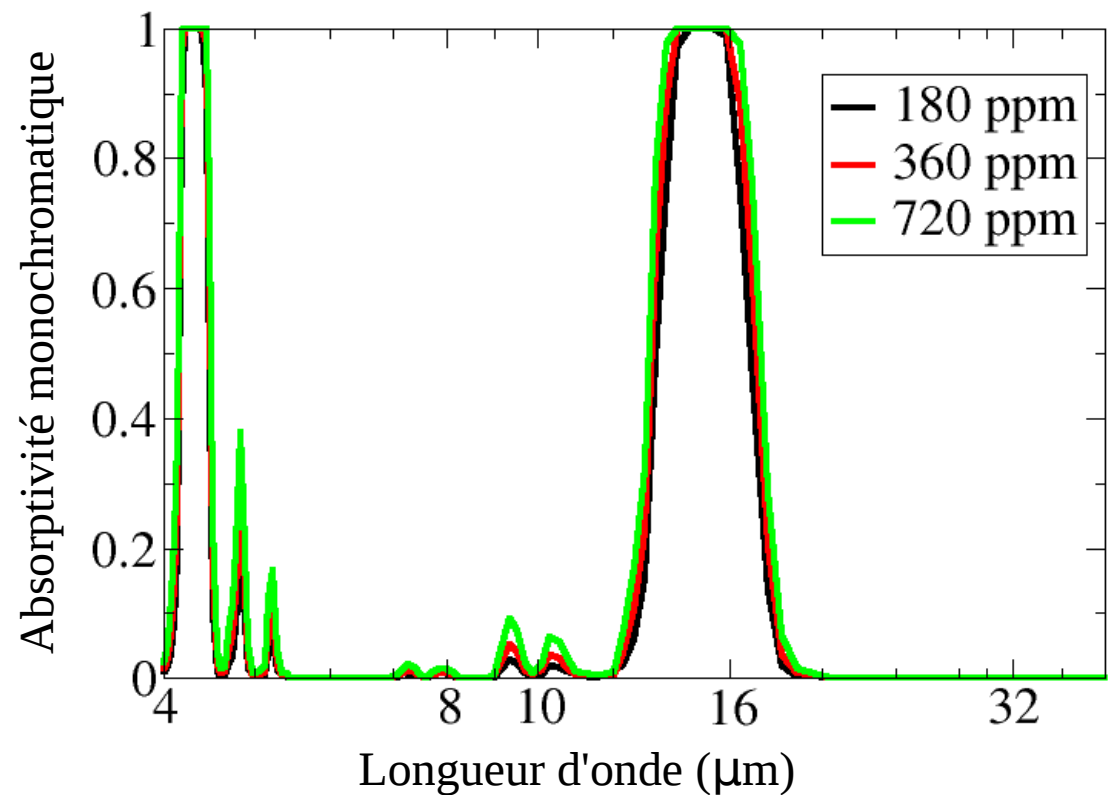
**L'effet de serre**  $G = F_s - F_e = (1-A)I_s \left( \frac{1}{1-\epsilon_a/2} - 1 \right)$  varie entre 0 quand  $\epsilon_a = 0$  et  $(1-A)I_s$  quand  $\epsilon_a = 1$ , **il est maximum quand  $\epsilon_a = 1$**  et ne permet pas d'expliquer l'accroissement de l'effet de serre dû à un accroissement de  $\text{CO}_2$

# Effet de saturation

**Absorptivité** de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du  $\text{CO}_2$ , pour différentes valeurs de  $\text{H}_2\text{O}$

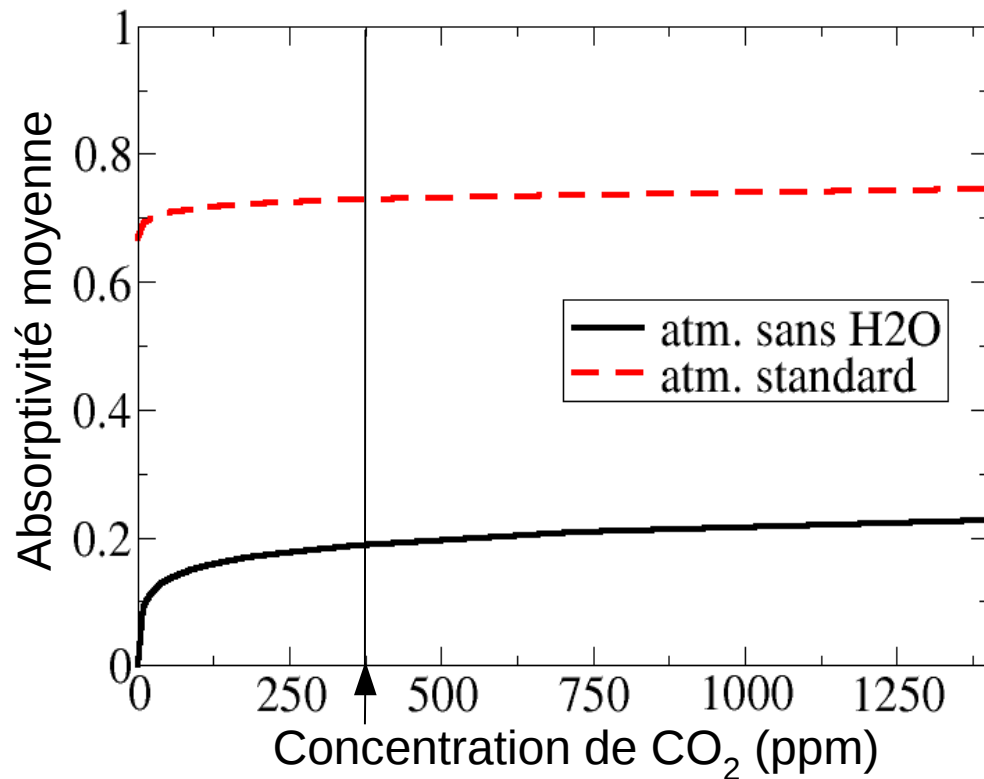


**Absorptivité monochromatique** de l'atmosphère due au seul  $\text{CO}_2$ , en fonction de la longueur d'onde, pour différente concentration de  $\text{CO}_2$

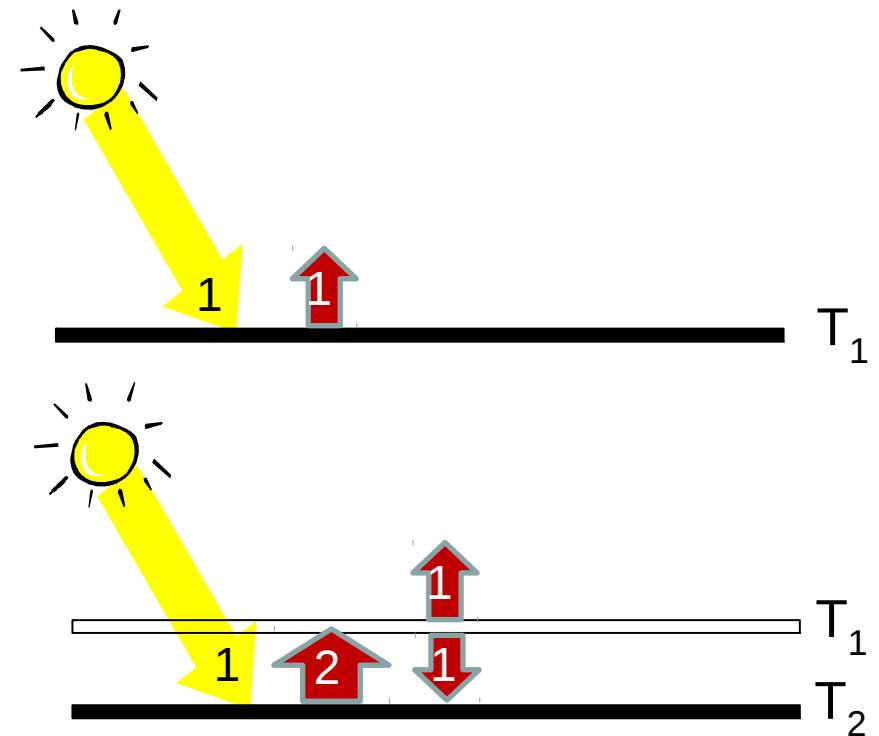


# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O



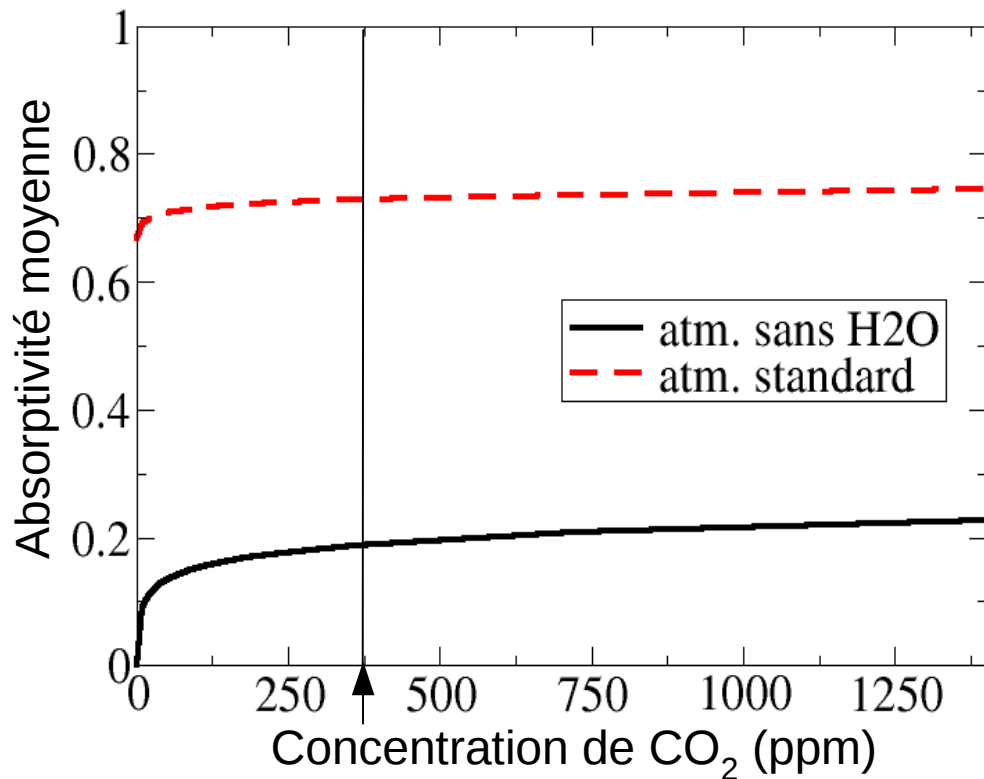
L'analogie de l'effet de serre



*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O

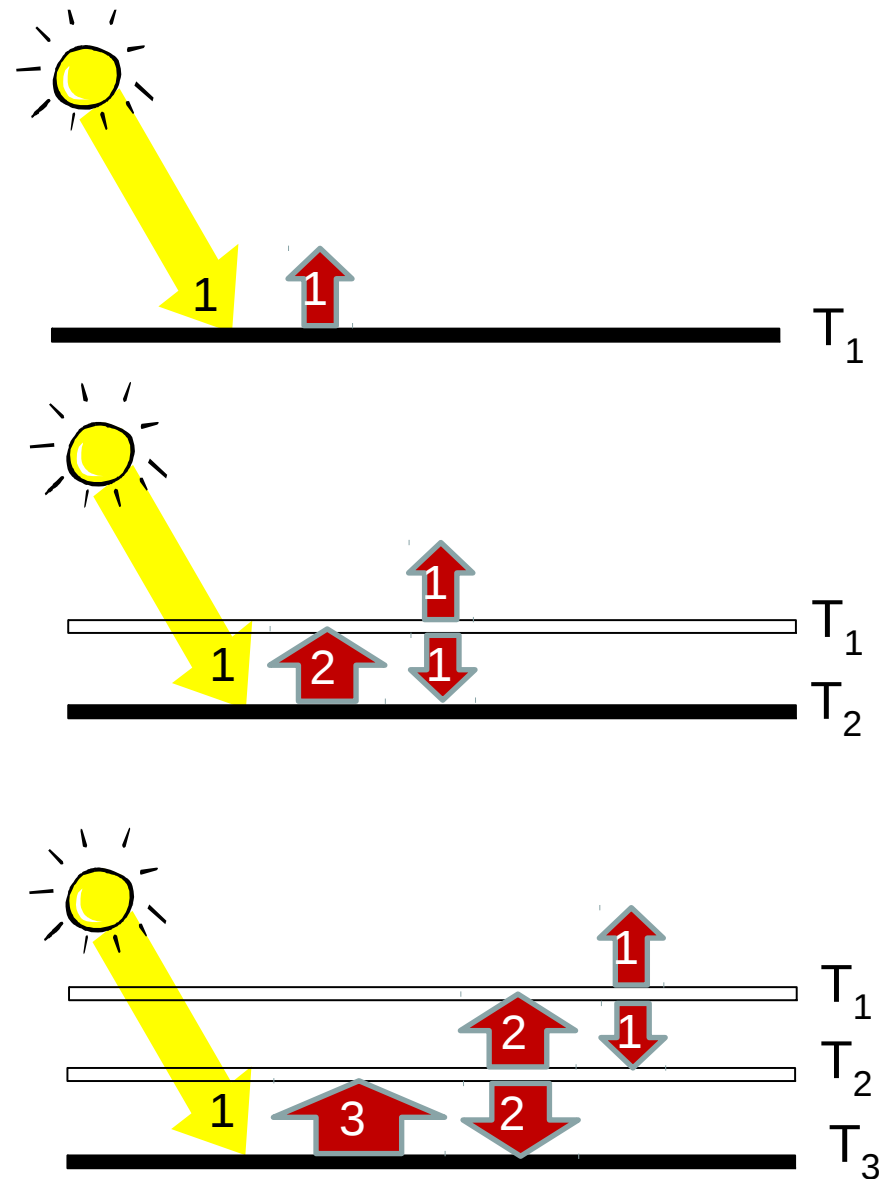


*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

**NON!**

(Dufresne Treiner 2012)

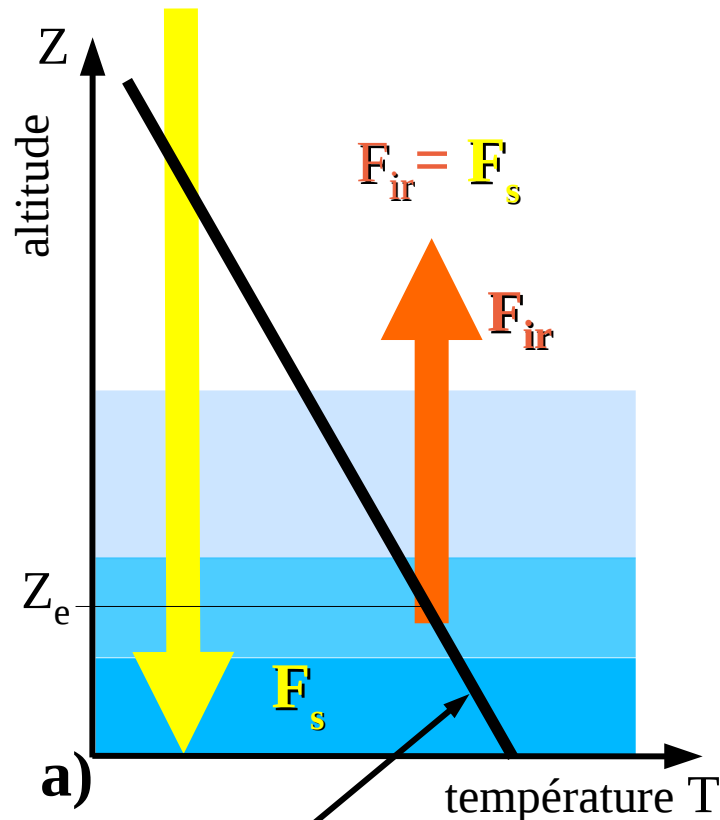
L'analogie de l'effet de serre



# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net  $F_s$

Rayonnement IR sortant  $F_{ir}$



$Z_e$ : altitude d'émission vers l'espace

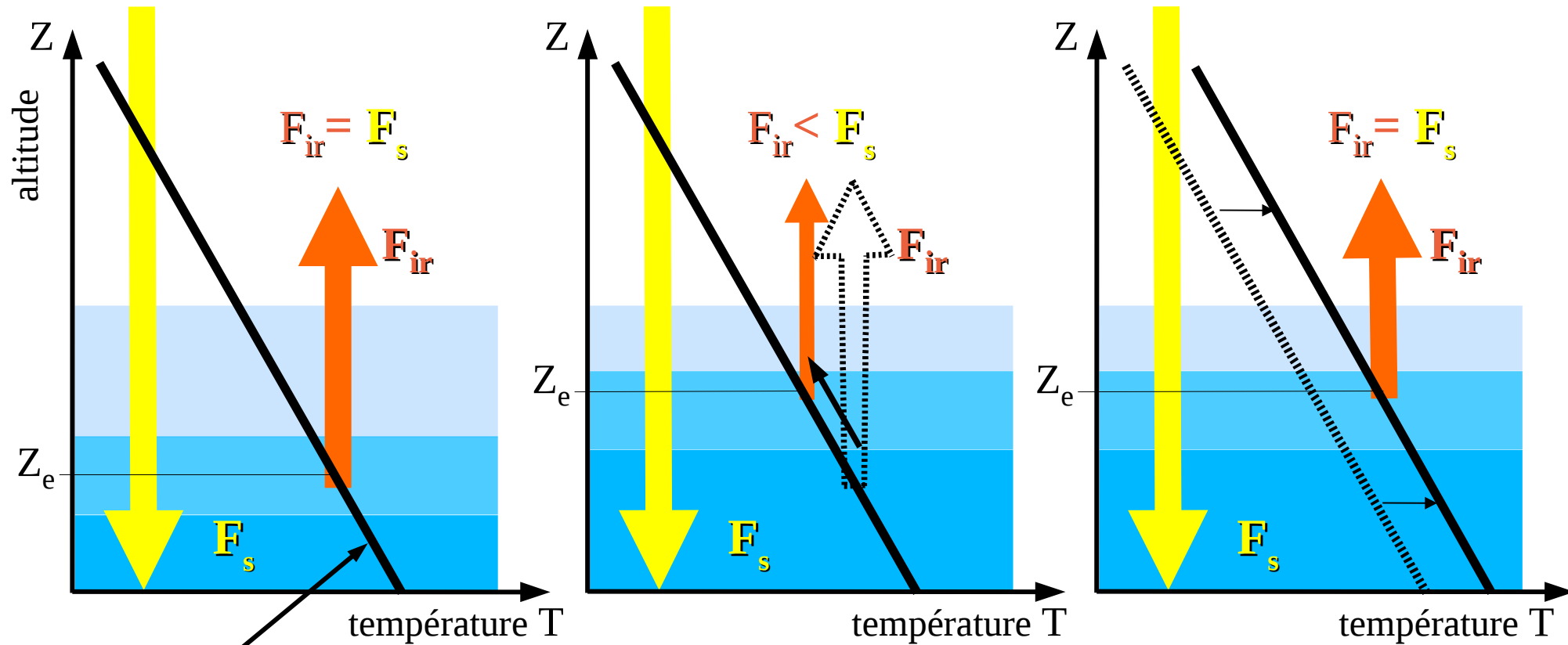
- Haute atmosphère: peu d'émission et peu d'absorption du rayonnement IR
- Moyenne atmosphère: les photons émis vers le haut atteignent l'espace
- Basse atmosphère: les photons émis vers le haut sont absorbés et n'atteignent pas l'espace

a)  
 $dT/dz$  fixé  
par convection

# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net  $F_s$

Rayonnement IR sortant  $F_{ir}$

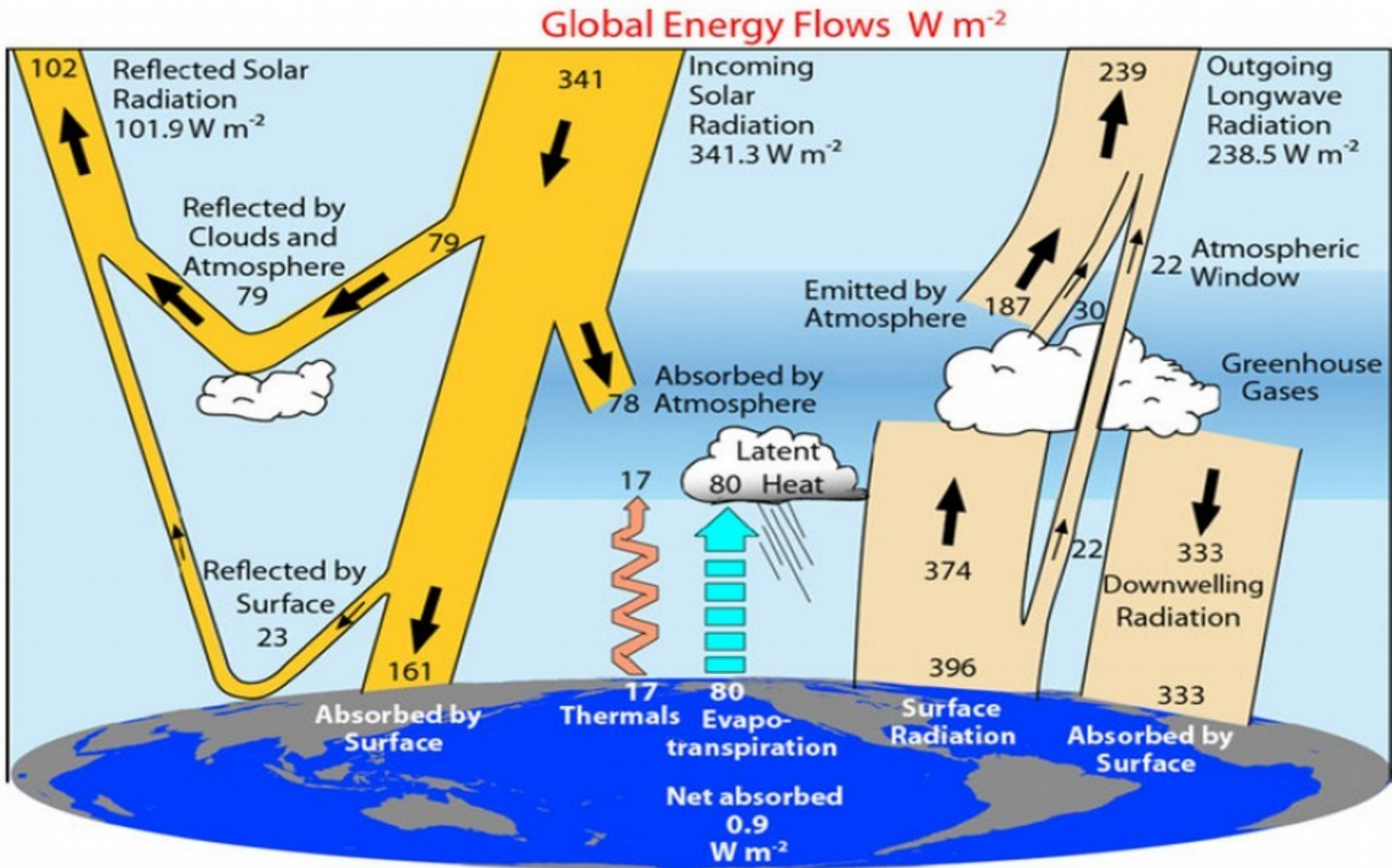


a)  $dT/dz$  fixé  
par convection

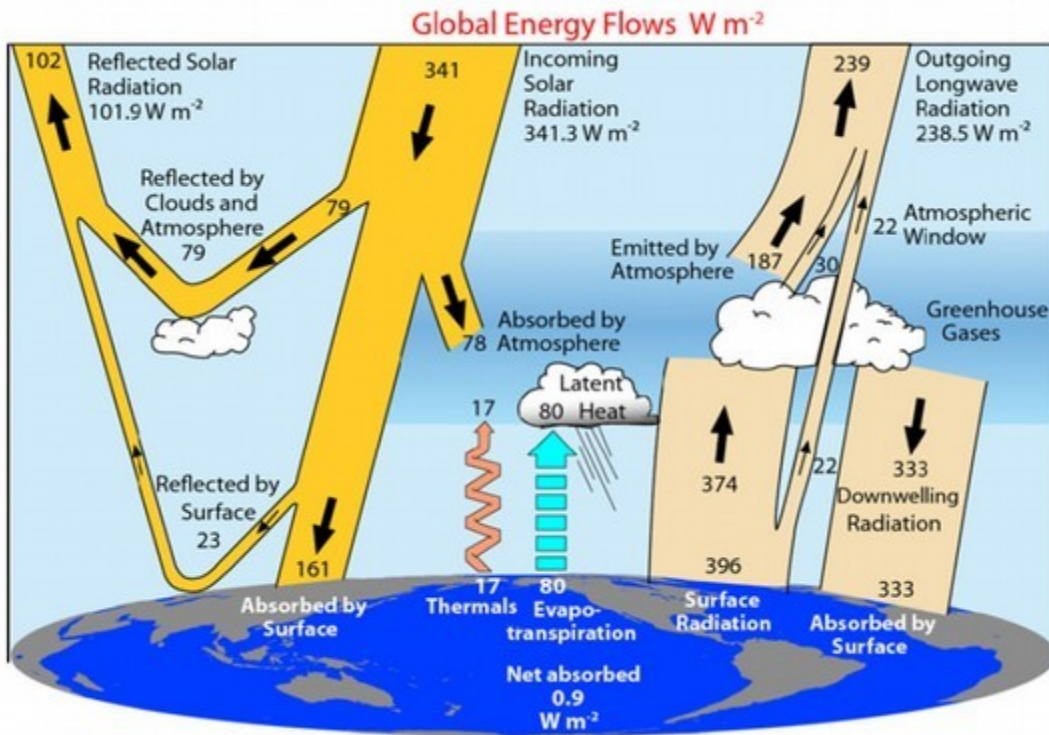
b) GES ( $CO_2$ ) augmente,  $Z_e$   
augmente,  $T_e$  diminue:  
rayonnement sortant plus  
faible.

c)  $T(z)$  augmente:  
retour à l'équilibre

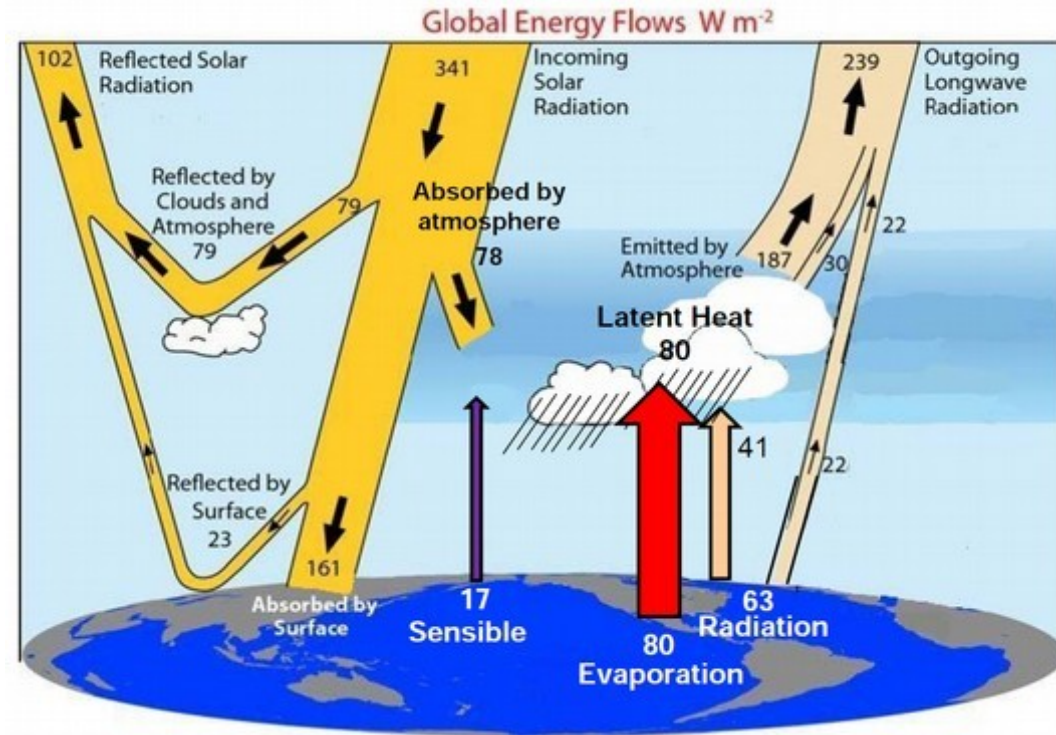
# Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



# Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



[Trenberth & Fasullo, 2012]



[adapté d'après Trenberth & Fasullo, 2012]

- Attention aux représentations (très courantes) donnant à penser que l'atmosphère réfléchit le rayonnement infrarouge



# Conclusion

## Effet de serre :

- L'effet de serre est un phénomène physique bien compris... mais mal nommé (phénomène très différent de celui dans les serres horticoles).
- C'est une interprétation des résultats obtenus en résolvant l'équation de transfert radiatif. Il y a plusieurs type de présentation de l'effet de serre, correspondant à différent niveaux d'interprétation
- Un changement de l'effet de serre entraîne une modification du bilan d'énergie de la Terre et donc de sa température
- Un accroissement de CO<sub>2</sub> ne modifie pas directement les flux en surface, mais augmente l'altitude d'émission, diminue le refroidissement de l'atmosphère ce qui finit par réchauffer la surface
- Les questions scientifiques ouvertes portent sur l'estimation précise de ce changement de température et sur ces conséquences, plus sur l'effet de serre lui-même

# Ressources

## Quelques ressources auxquelles j'ai contribué :

- Effet de serre et climat, J-L Dufresne, in « Graines de Sciences 8 », Edition Le Pommier », 2007 ou in « 29 notions clés pour savourer et faire savourer la science », P. Léna, Y. Quéré, B. Salviat, ed. Le Pommier , 2009.
- "L'effet de serre" dans On n'est pas que des cobayes ! , France 5 (27 novembre 2015) . <https://www.dailymotion.com/video/x3erl2m>
- Effet de serre : coup de chaud sur la planète dans "C'est pas sorcier", FR 3 (16 juin 2002), sur youtube

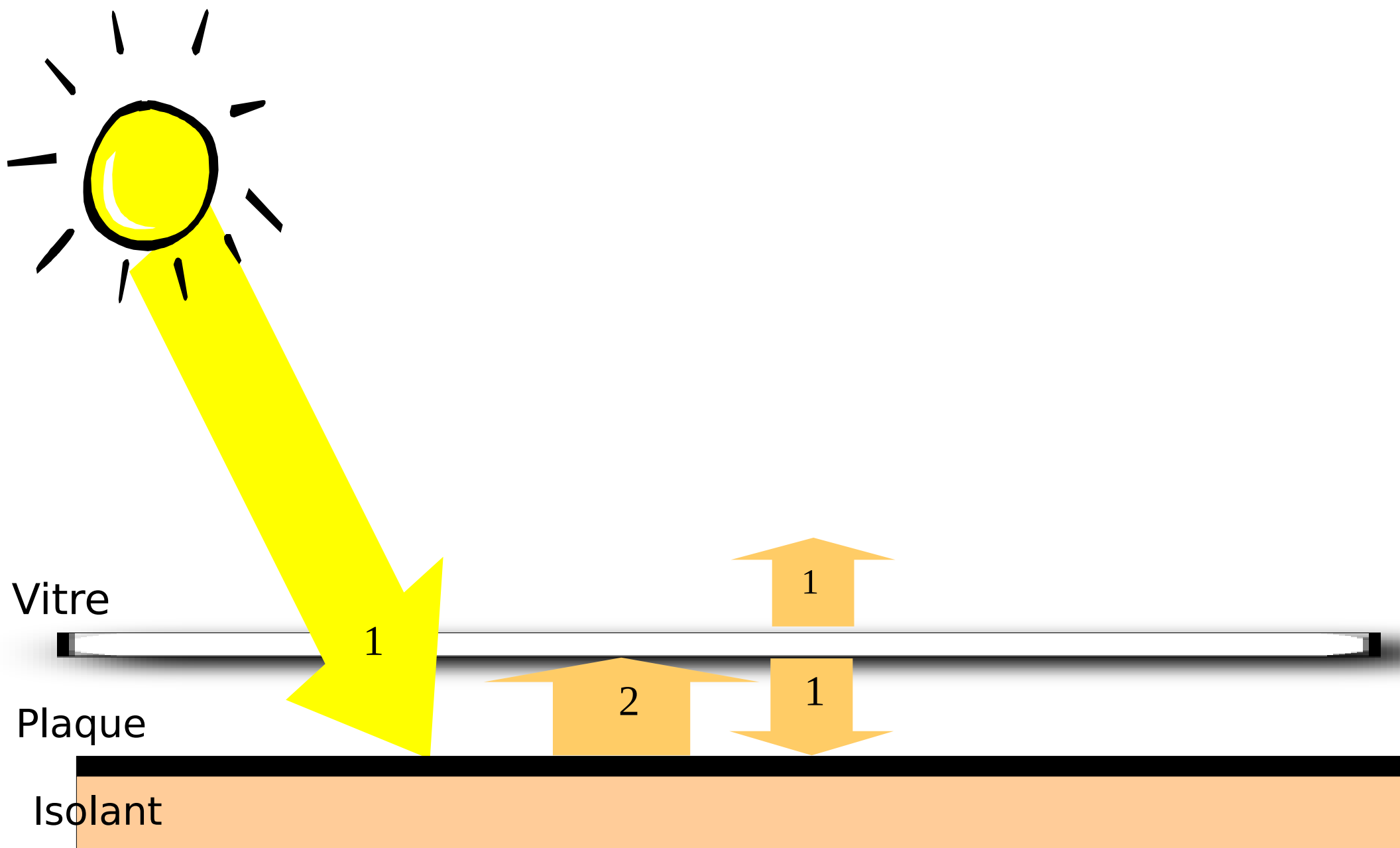
## Plus pointues :

- L'effet de serre atmosphérique: plus subtil qu'on ne le croit! Dufresne J.-L., J. Treiner, La météorologie, No. 72, pp. 31-41, février 2011. <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/39839>

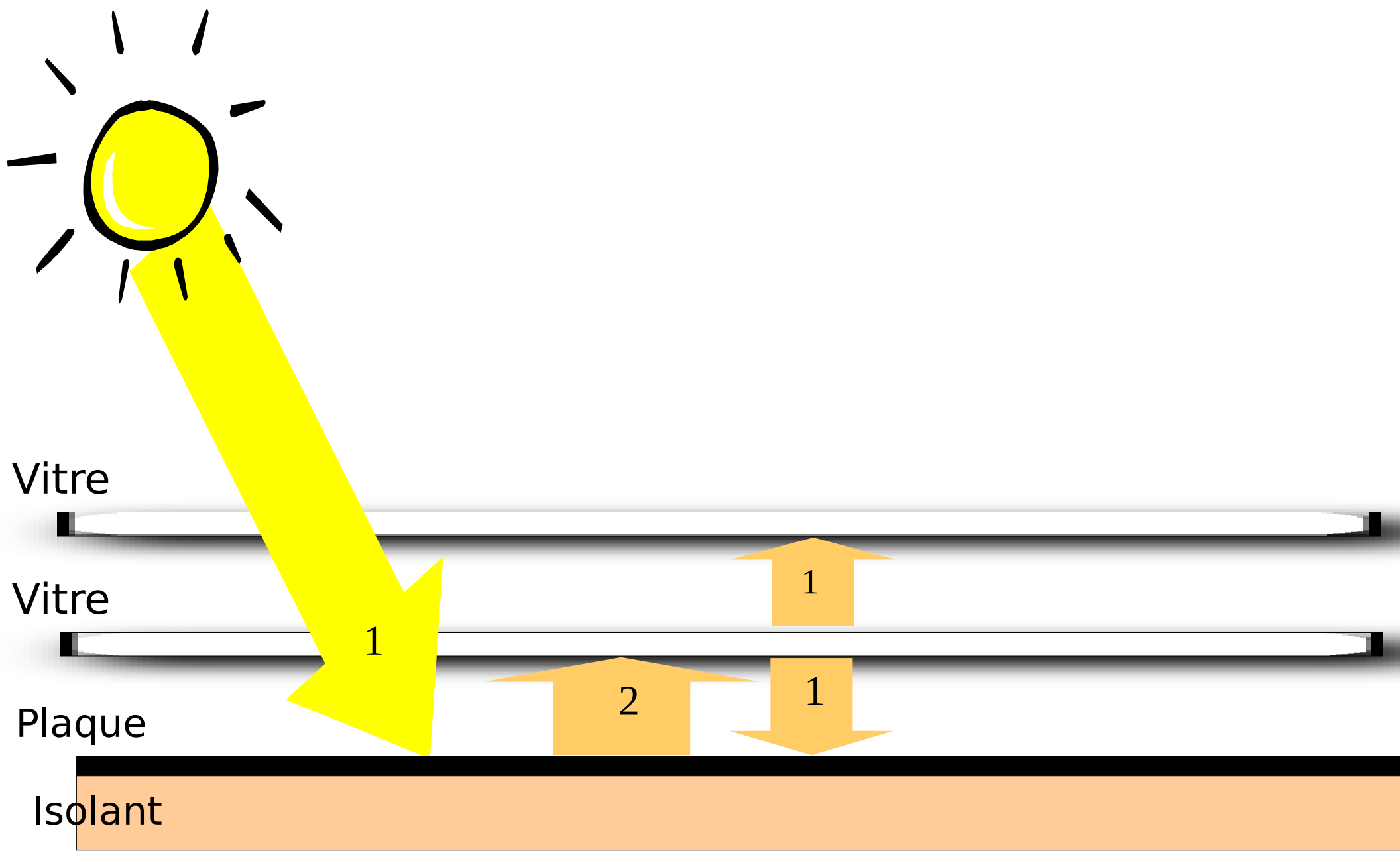


***Merci de votre attention***

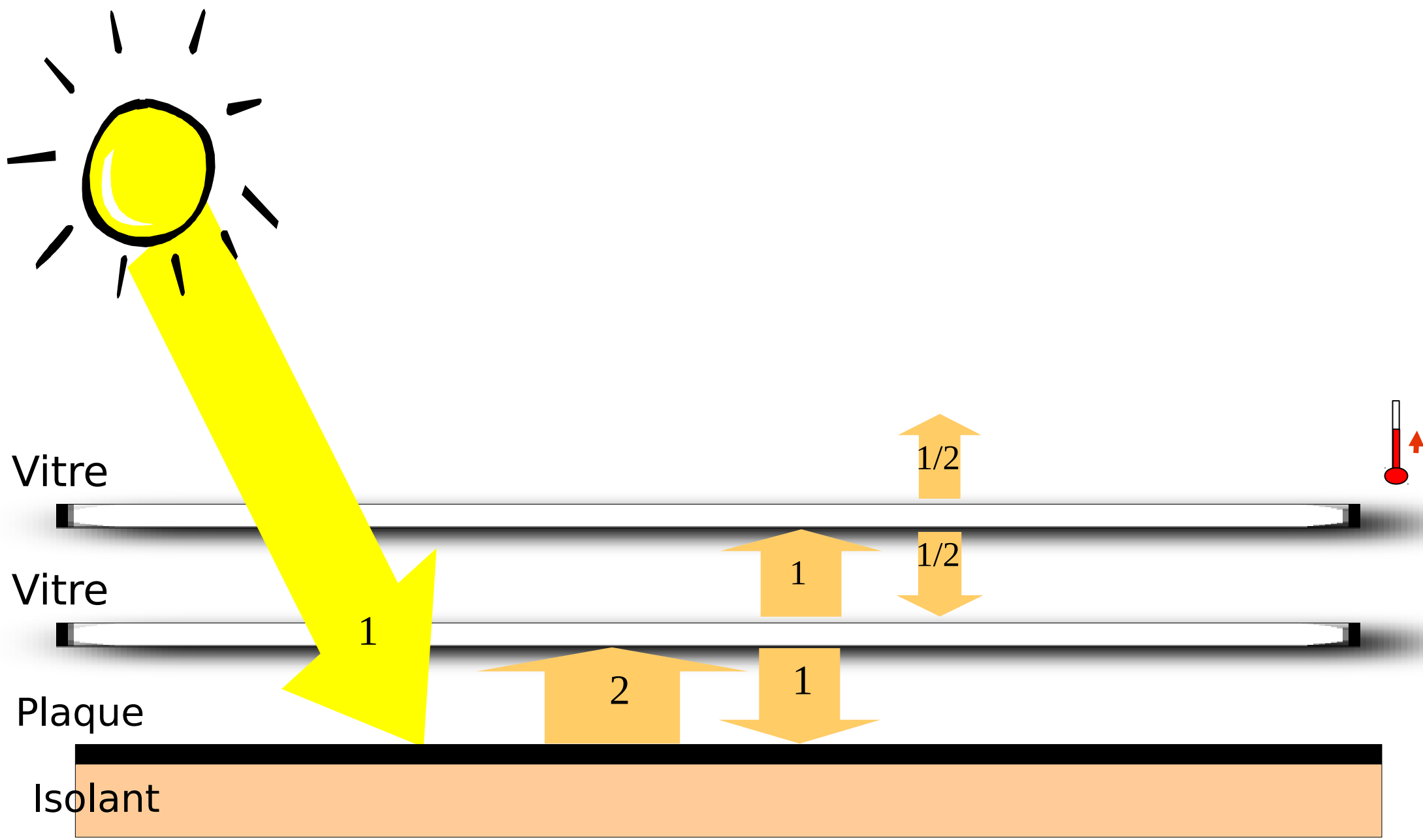
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



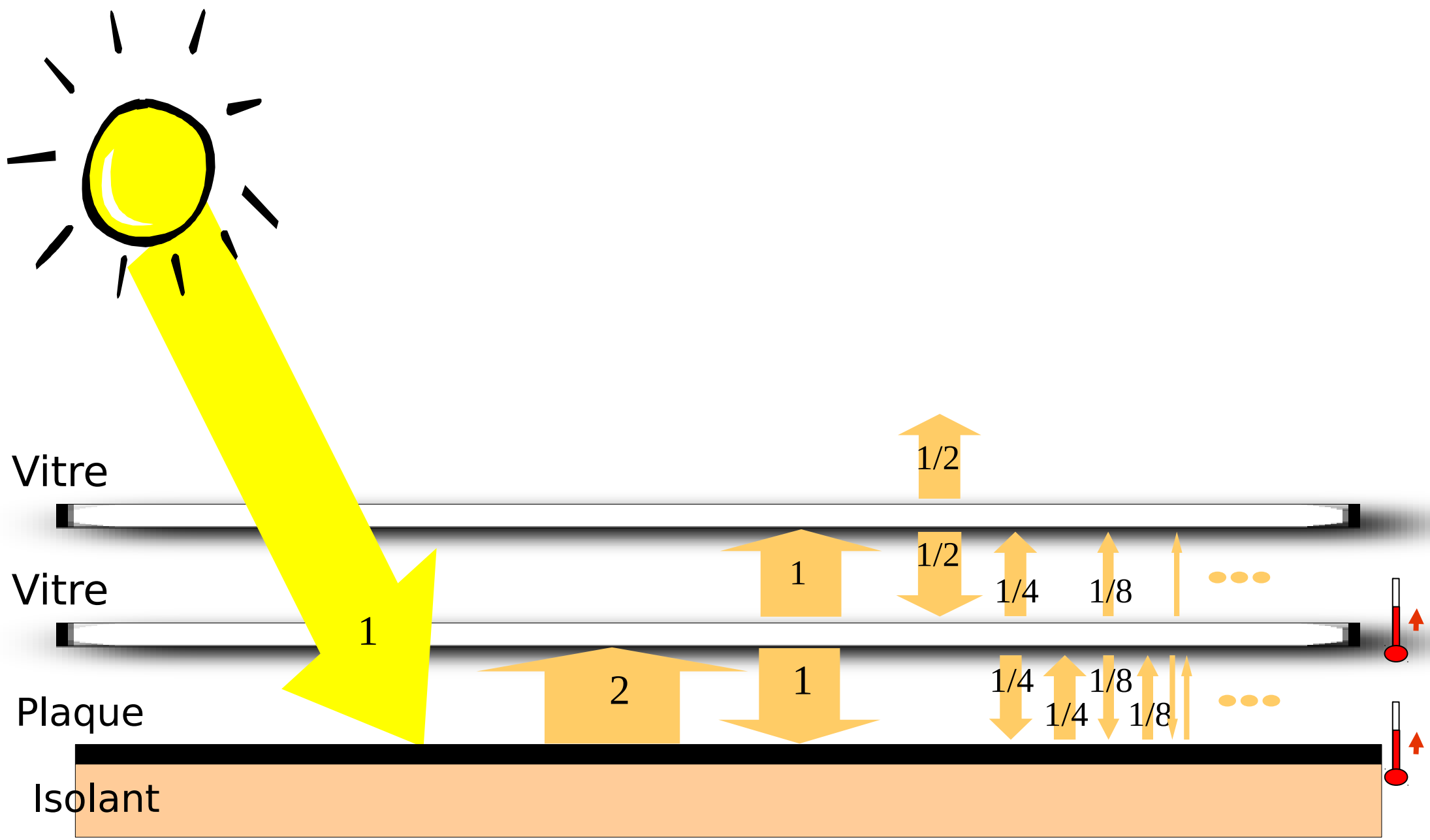
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



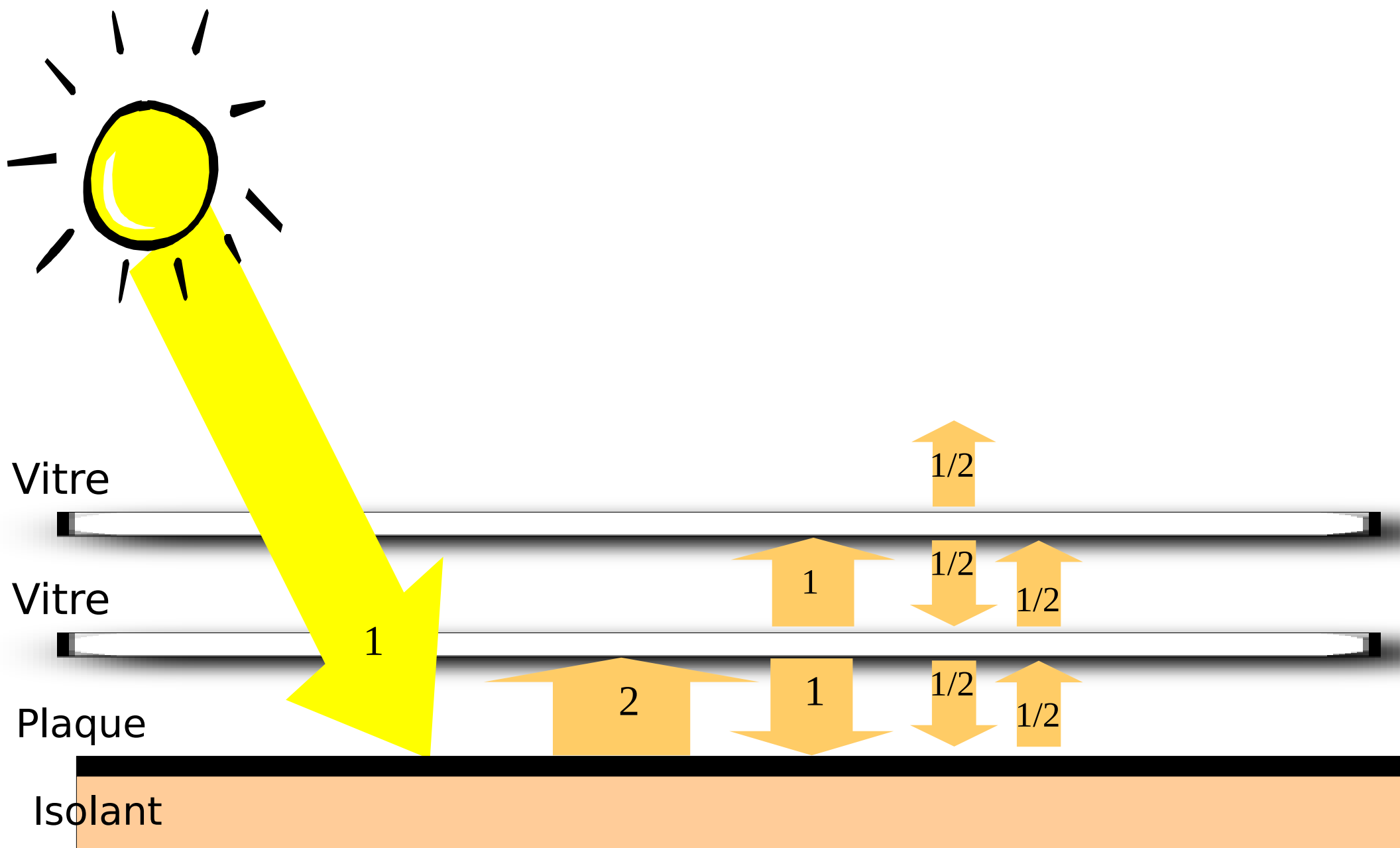
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?

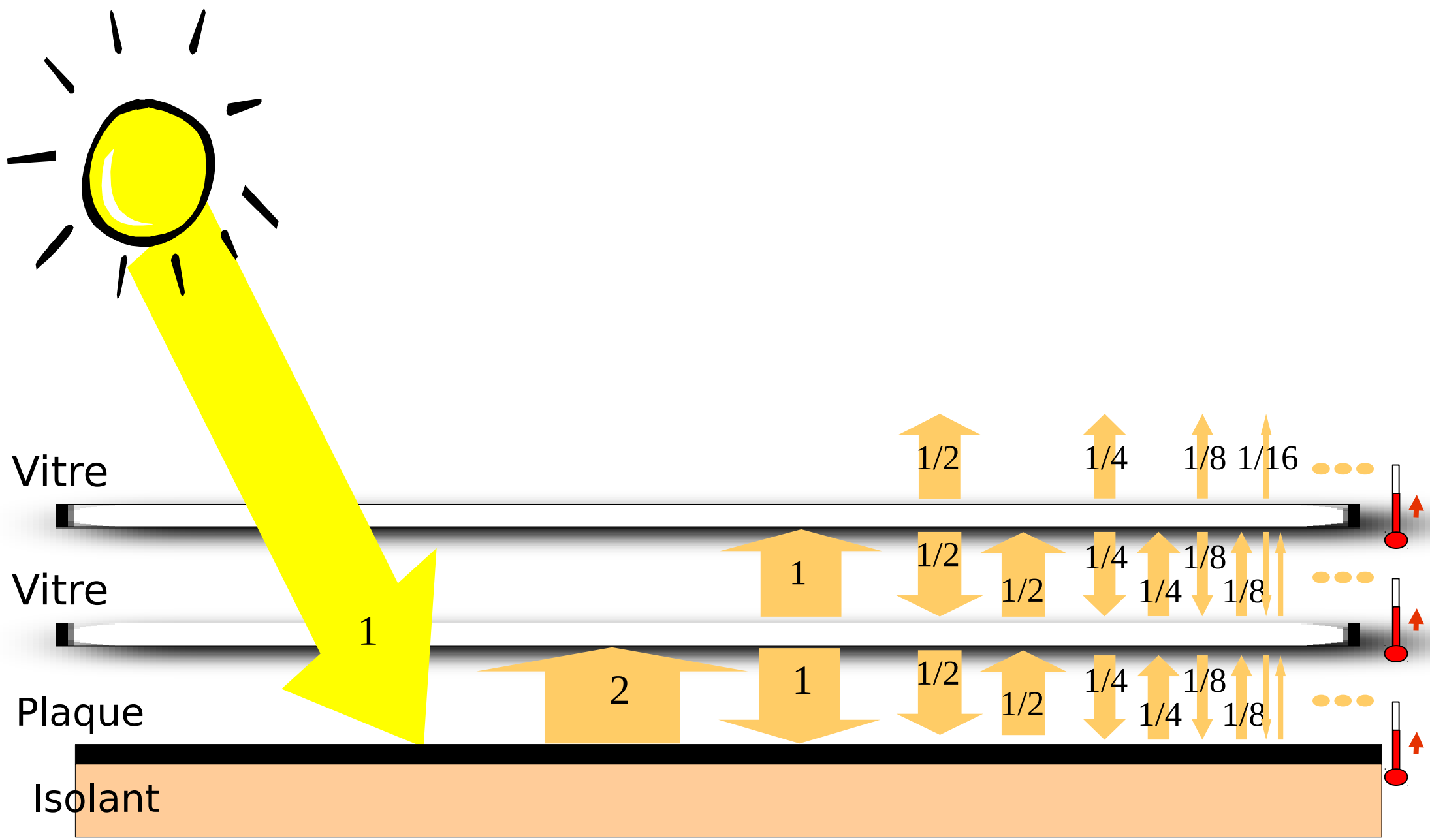


# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?

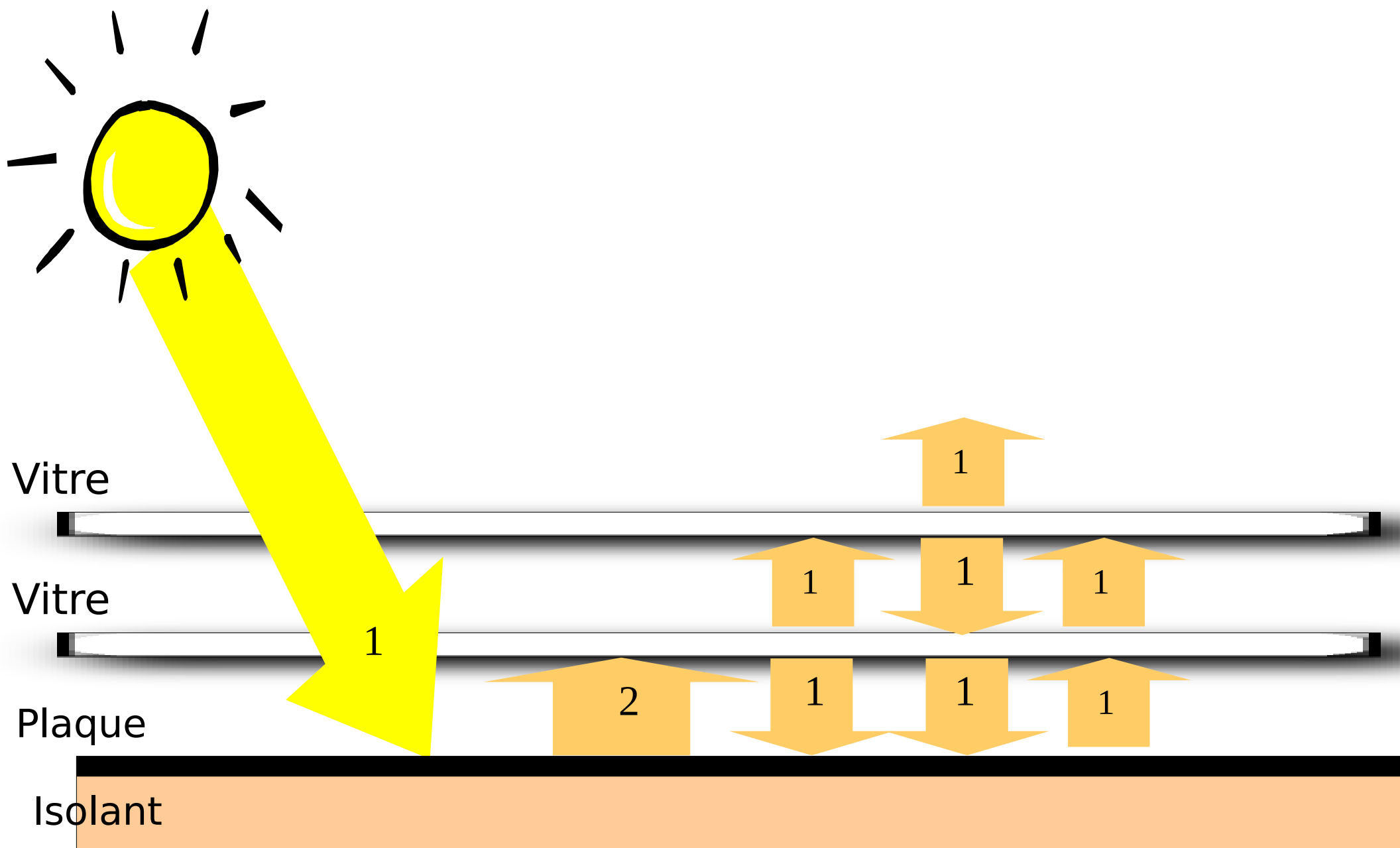




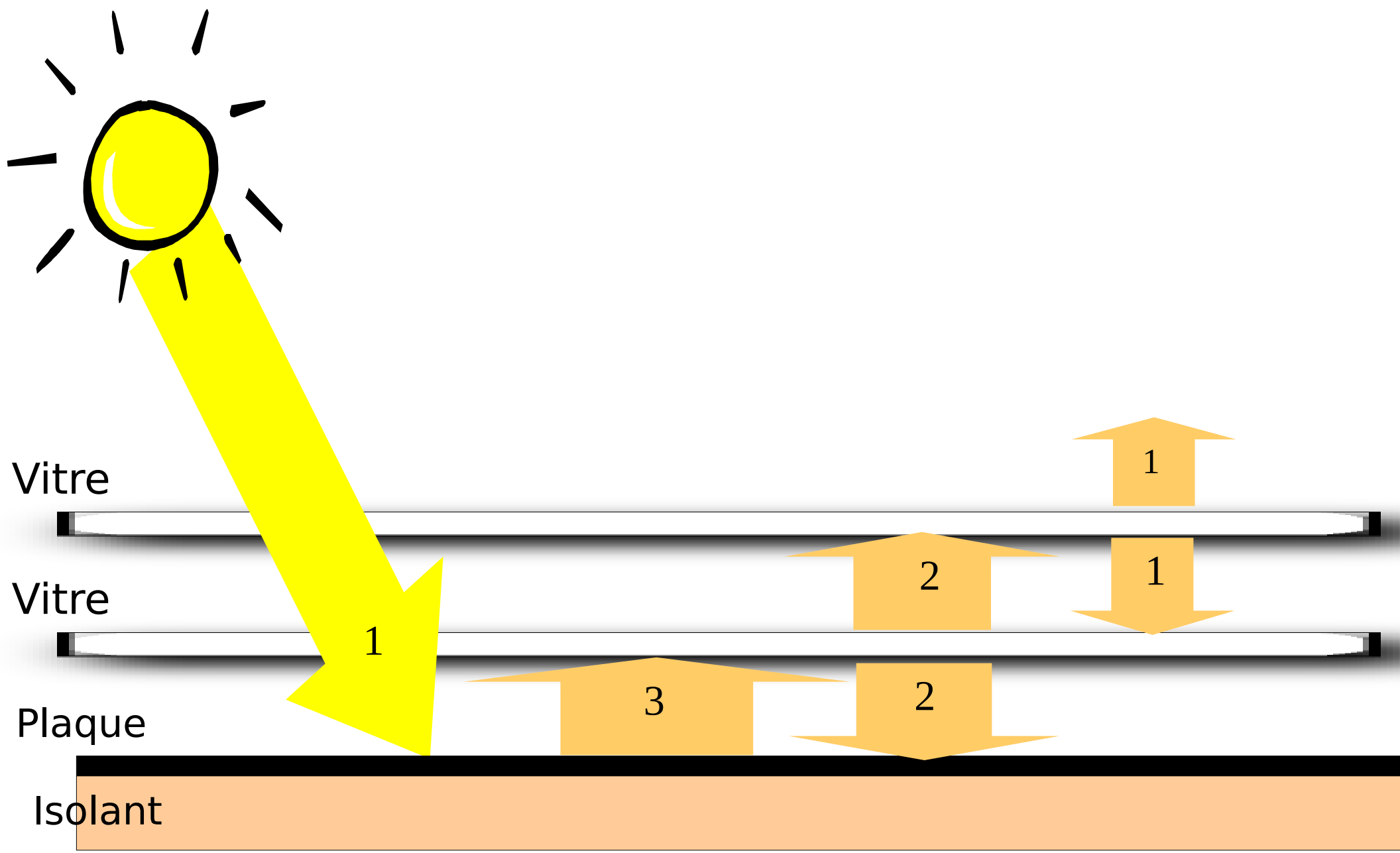
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?

