

Les mécanismes de l'effet de serre

Jean-Louis Dufresne

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

dufresne@lmd.jussieu.fr
www.lmd.jussieu.fr/~jldufres

Température d'équilibre d'une planète

1) L'émission de rayonnement

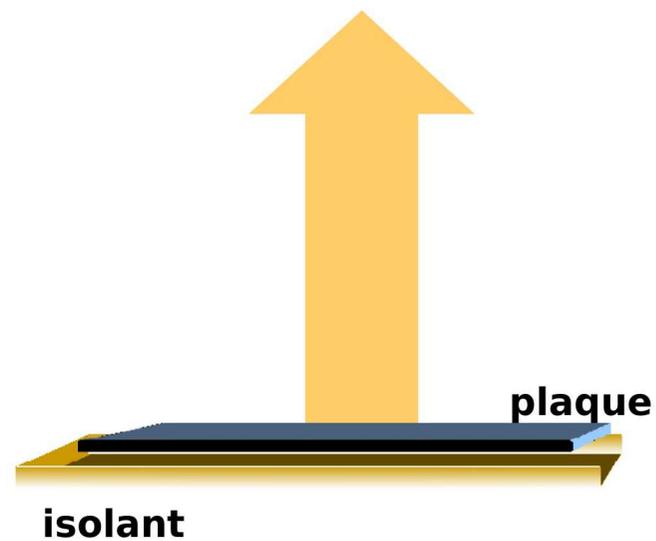
2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

3) L'équilibre énergétique

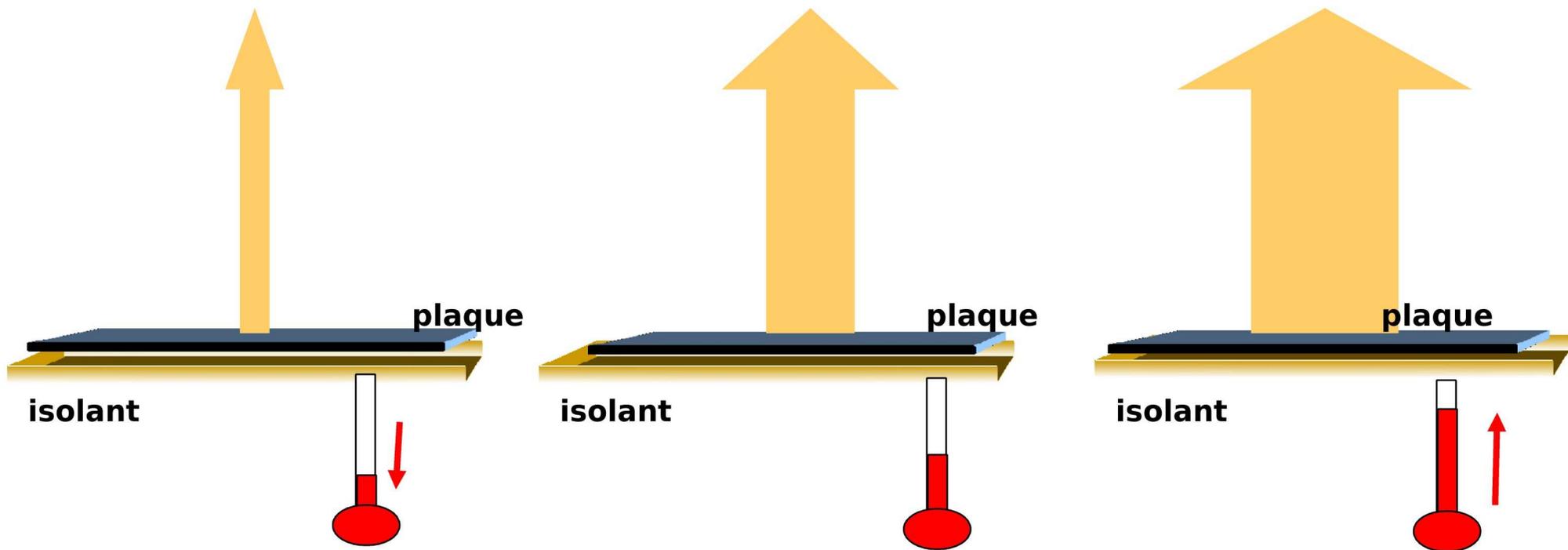
4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil

5) L'effet de serre

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

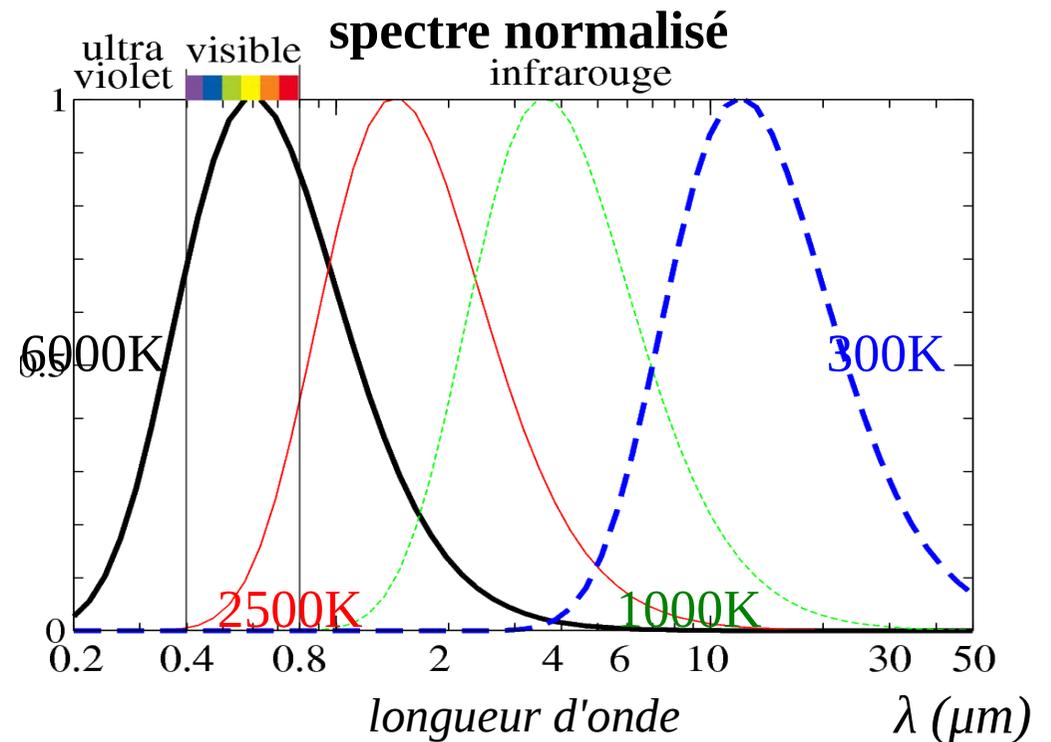
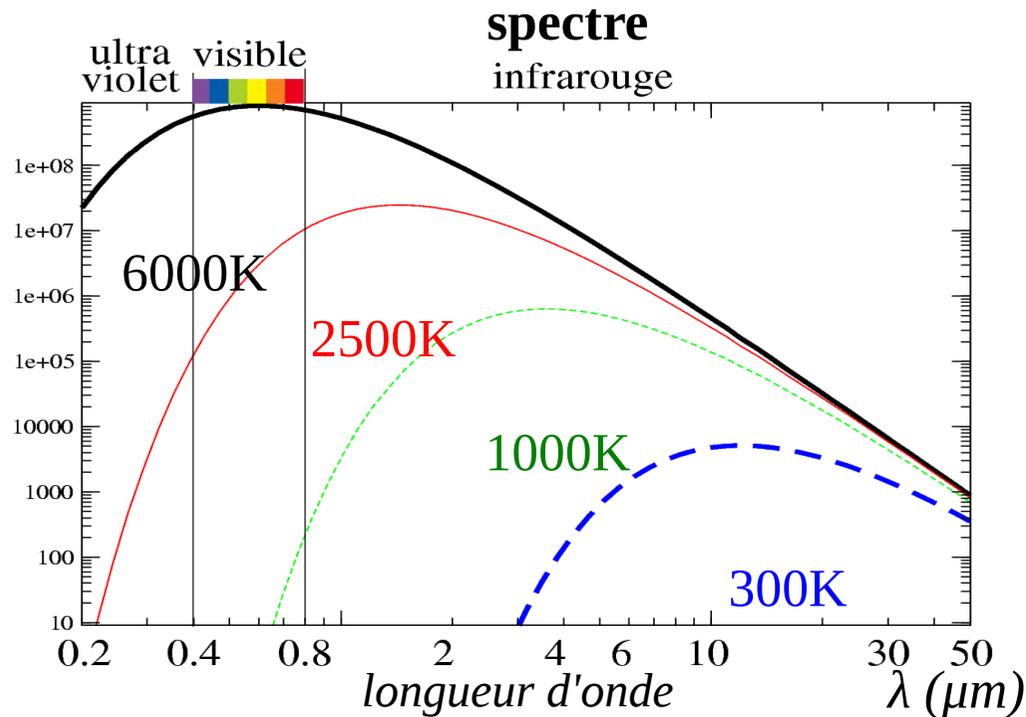


a) Tout corps (ici une plaque posée sur un isolant thermique) émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie



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

2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

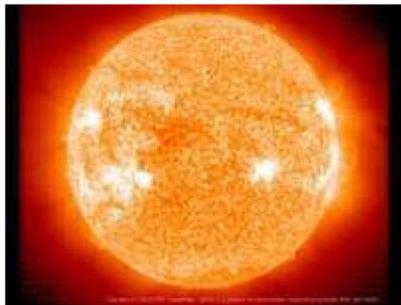


a) Si la température de l'objet est inférieure à 700°C , notre œil ne voit pas le rayonnement émis par l'objet :

C'est le rayonnement infrarouge

b) Si la température de l'objet est très élevée (supérieure à environ 700°C), notre œil voit une partie du rayonnement émis par cet objet :

C'est le rayonnement visible



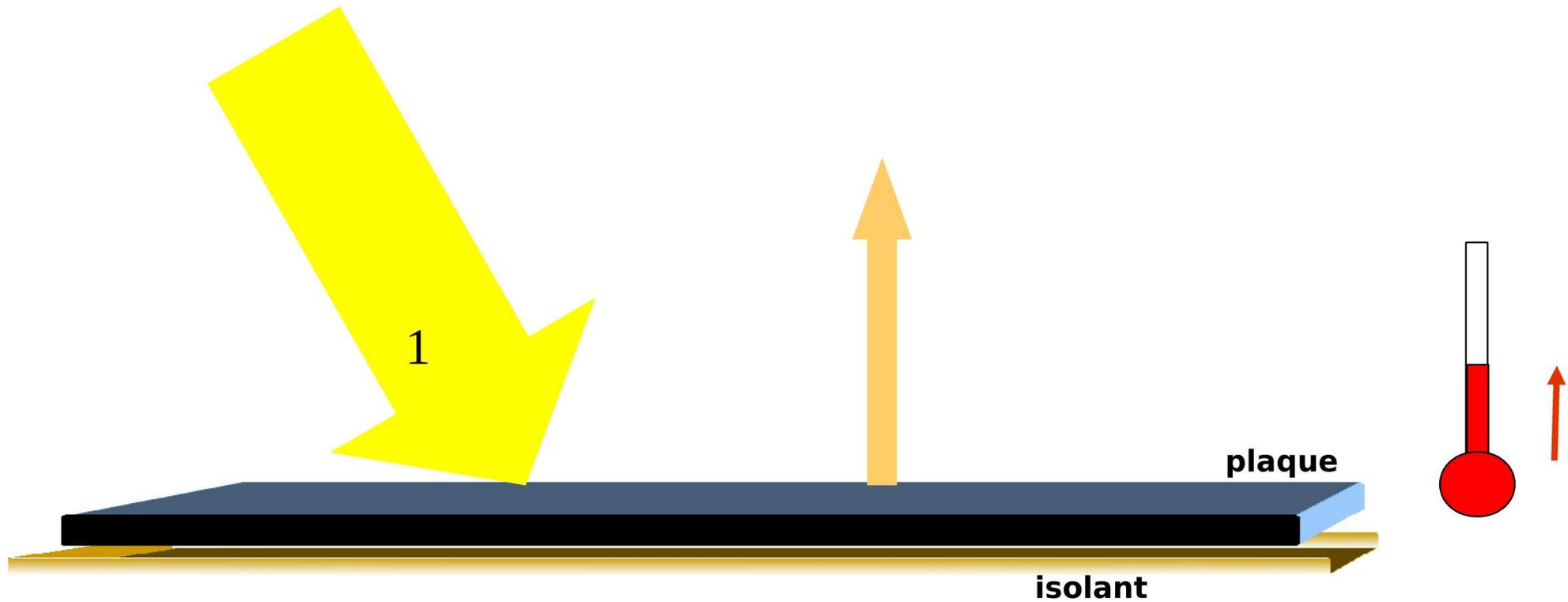
Soleil : $T=6000\text{ K}$



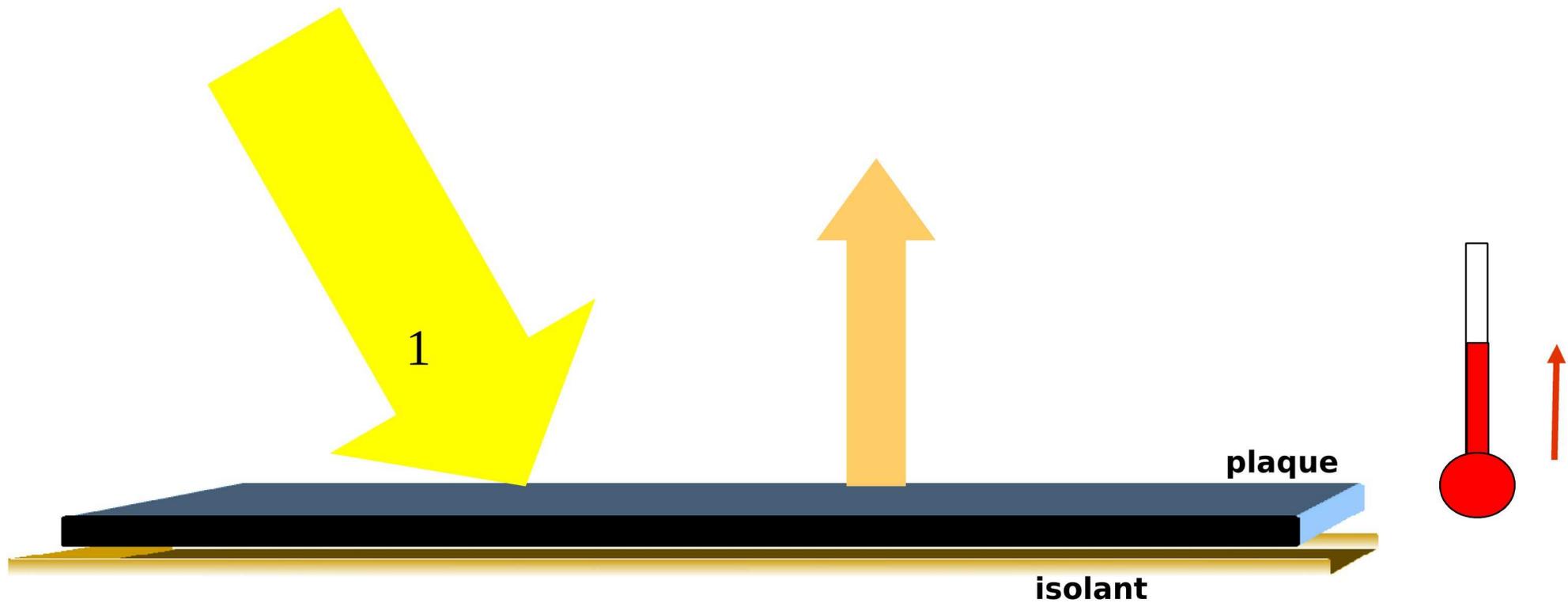
Lampe à filament de tungsten : $T \approx 2700\text{-}3100\text{ K}$



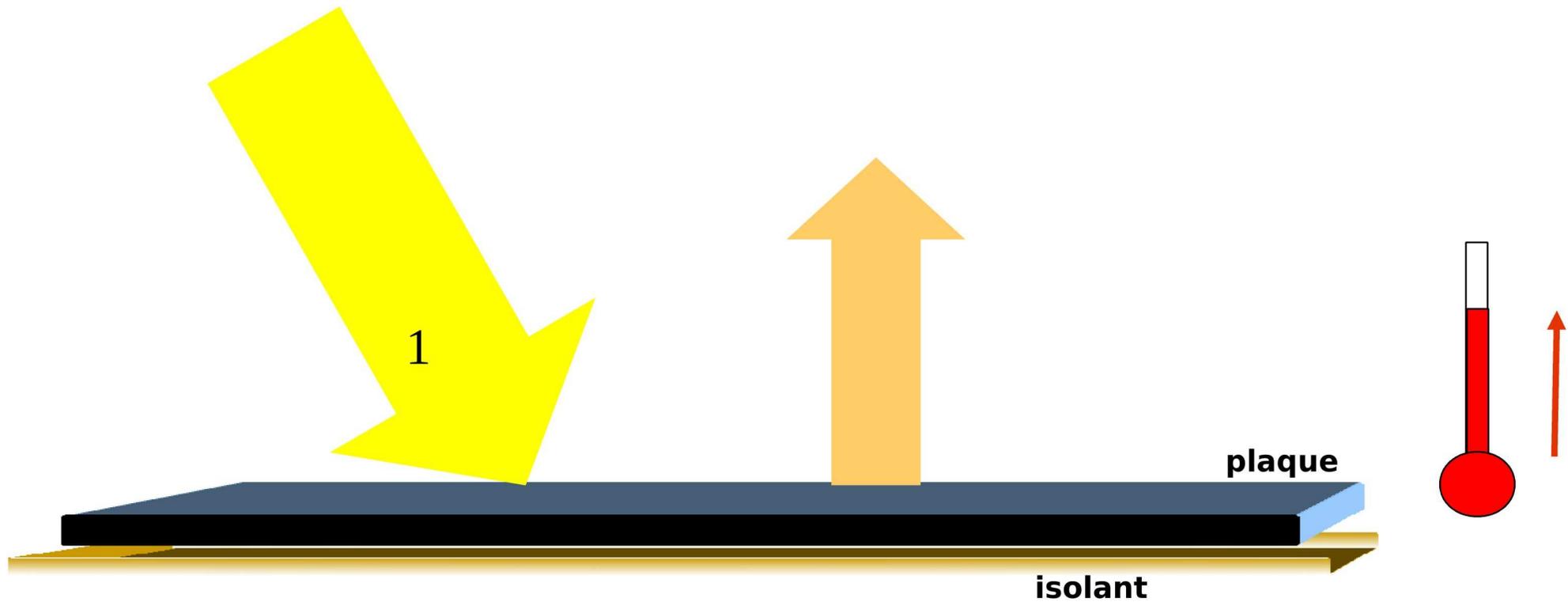
Lave de volcan : $T \approx 1000\text{ K}$



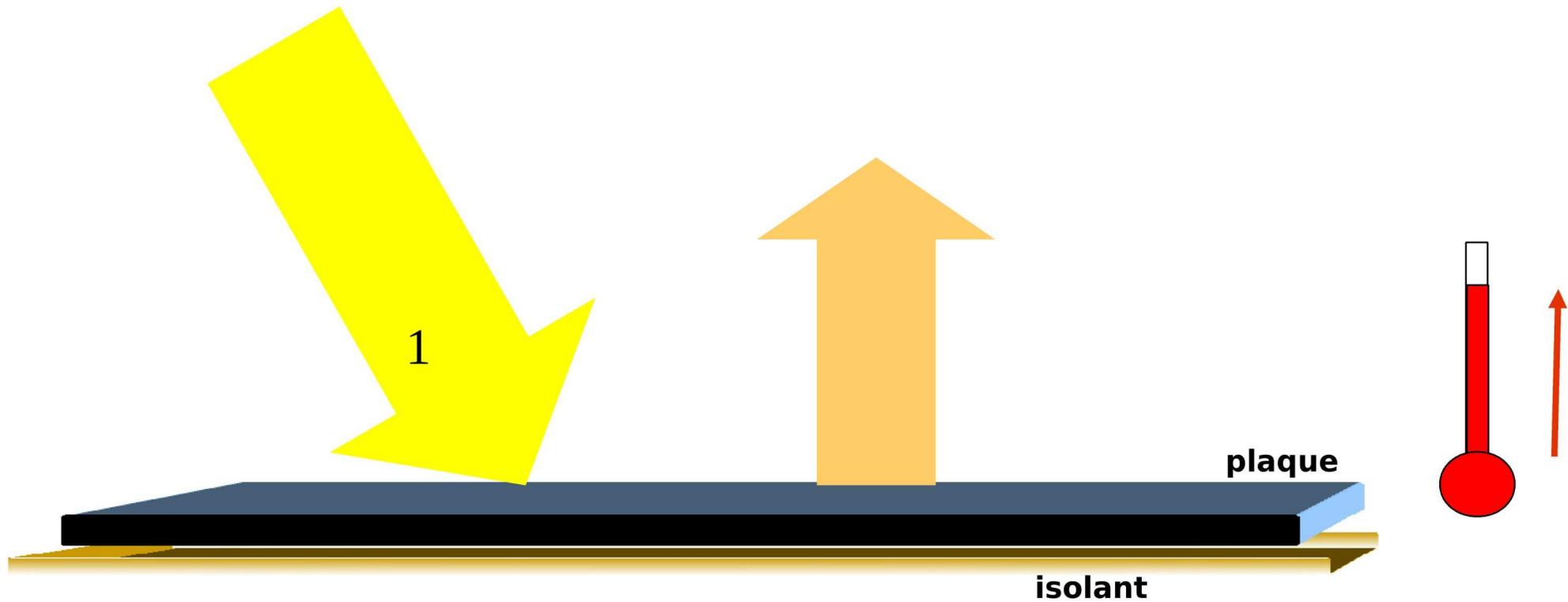
- Si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.



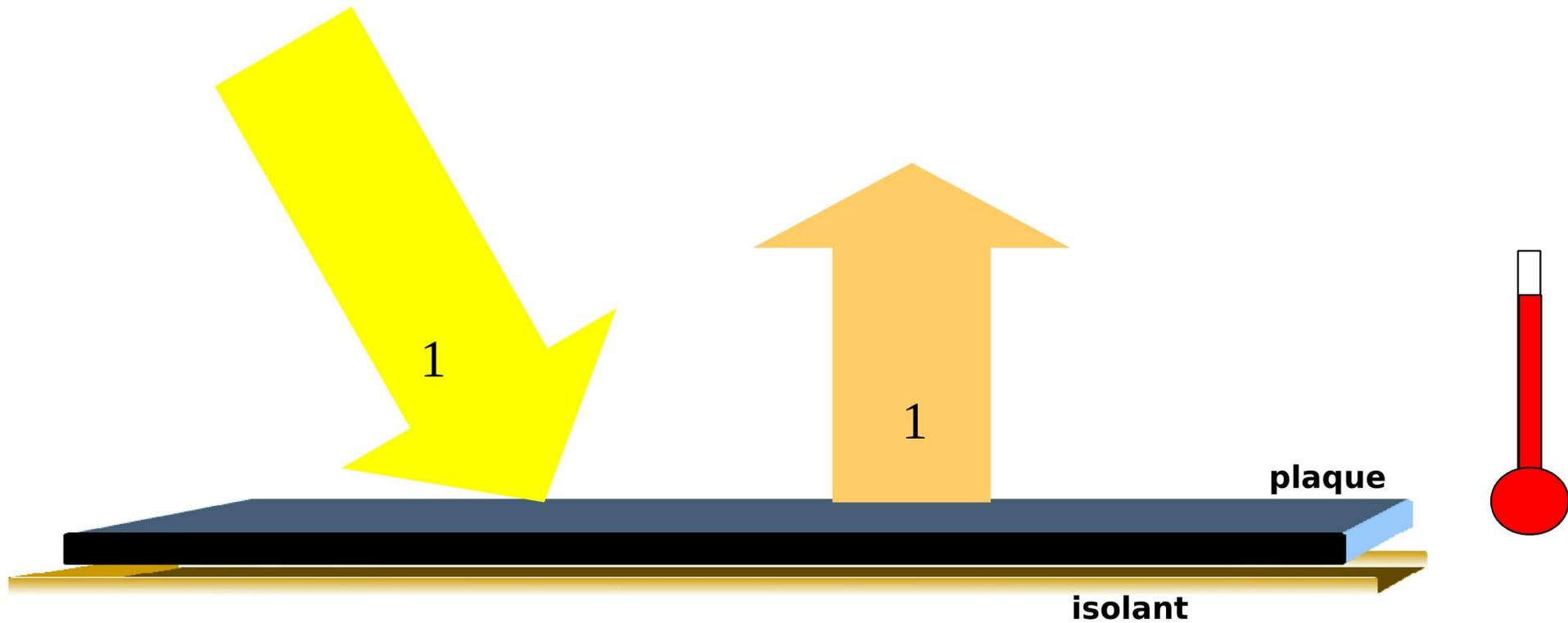
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



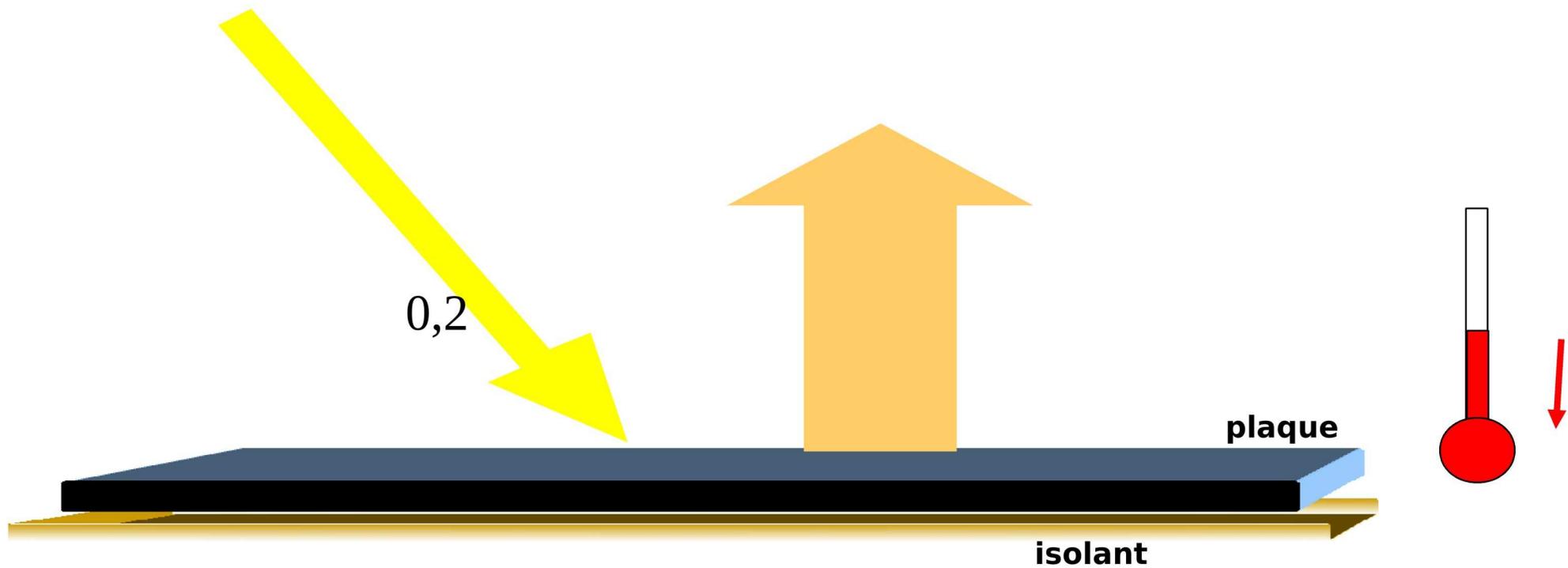
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



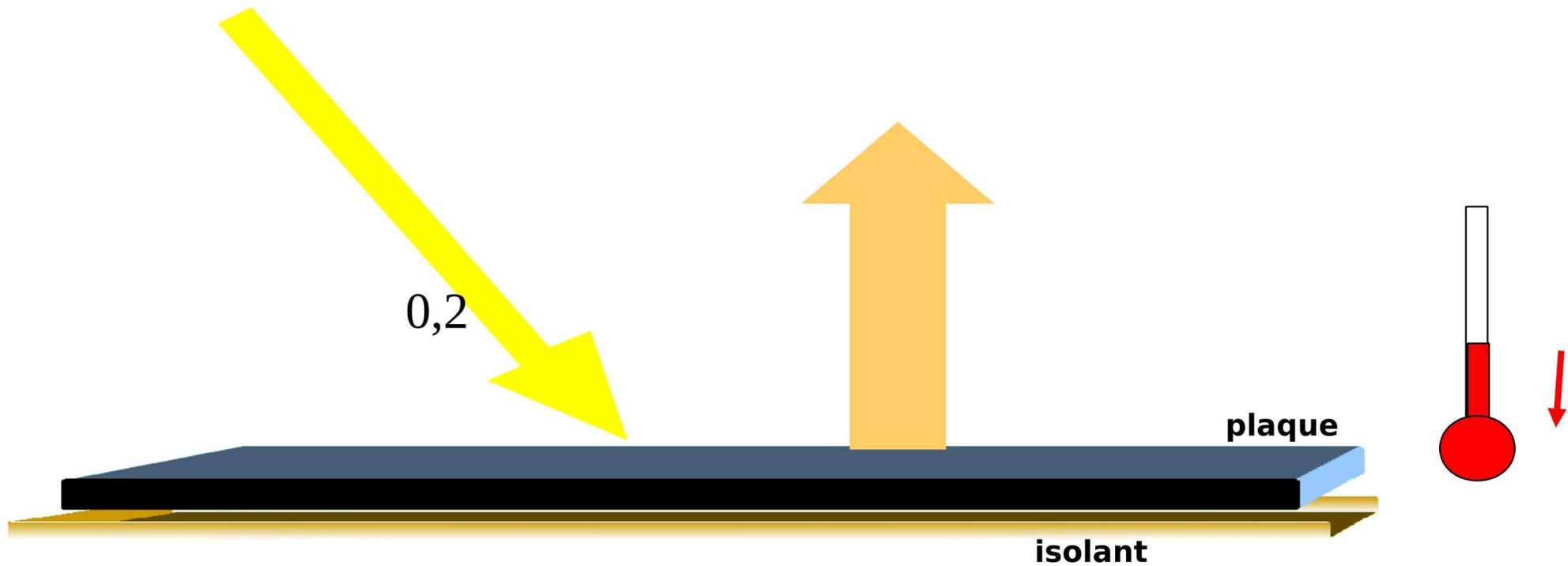
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



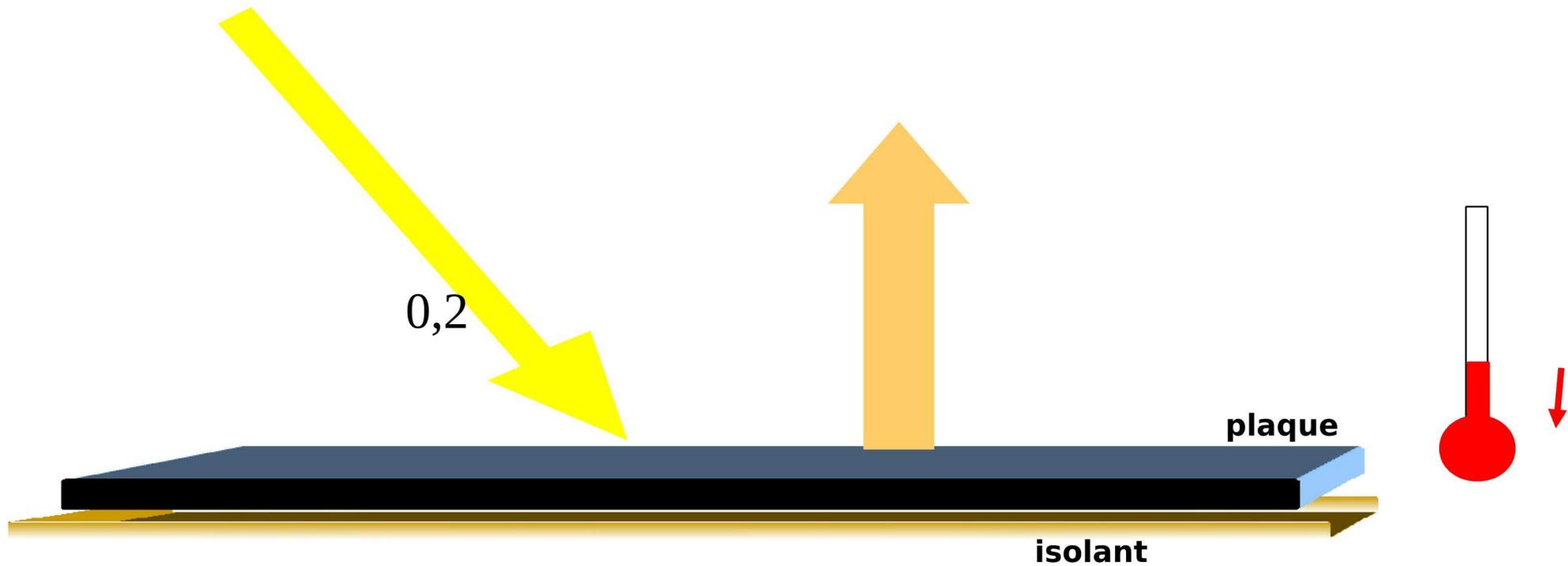
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.



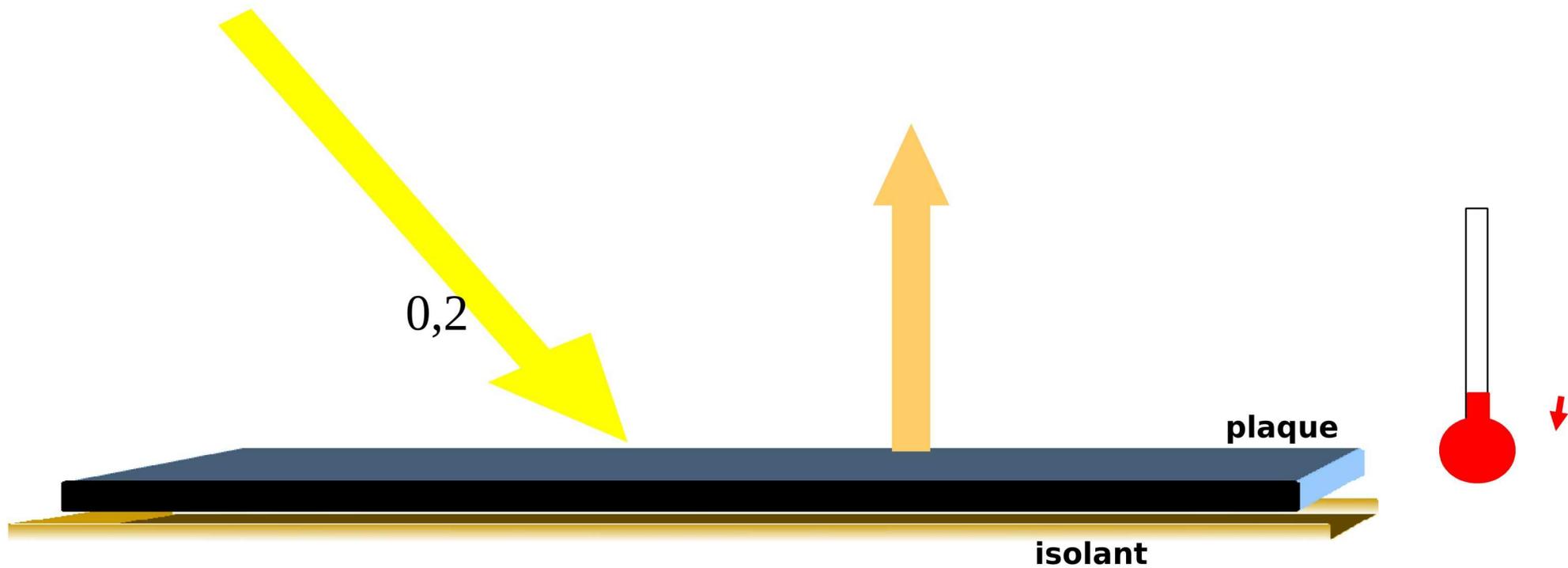
- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.



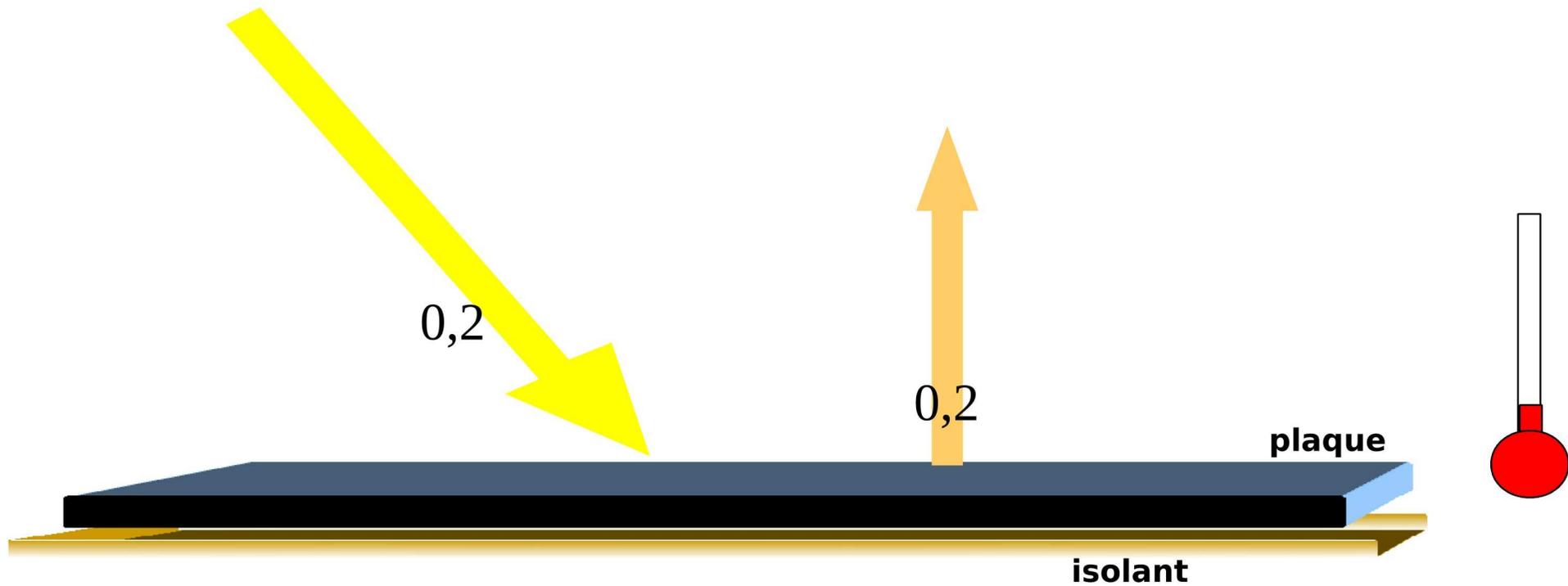
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.



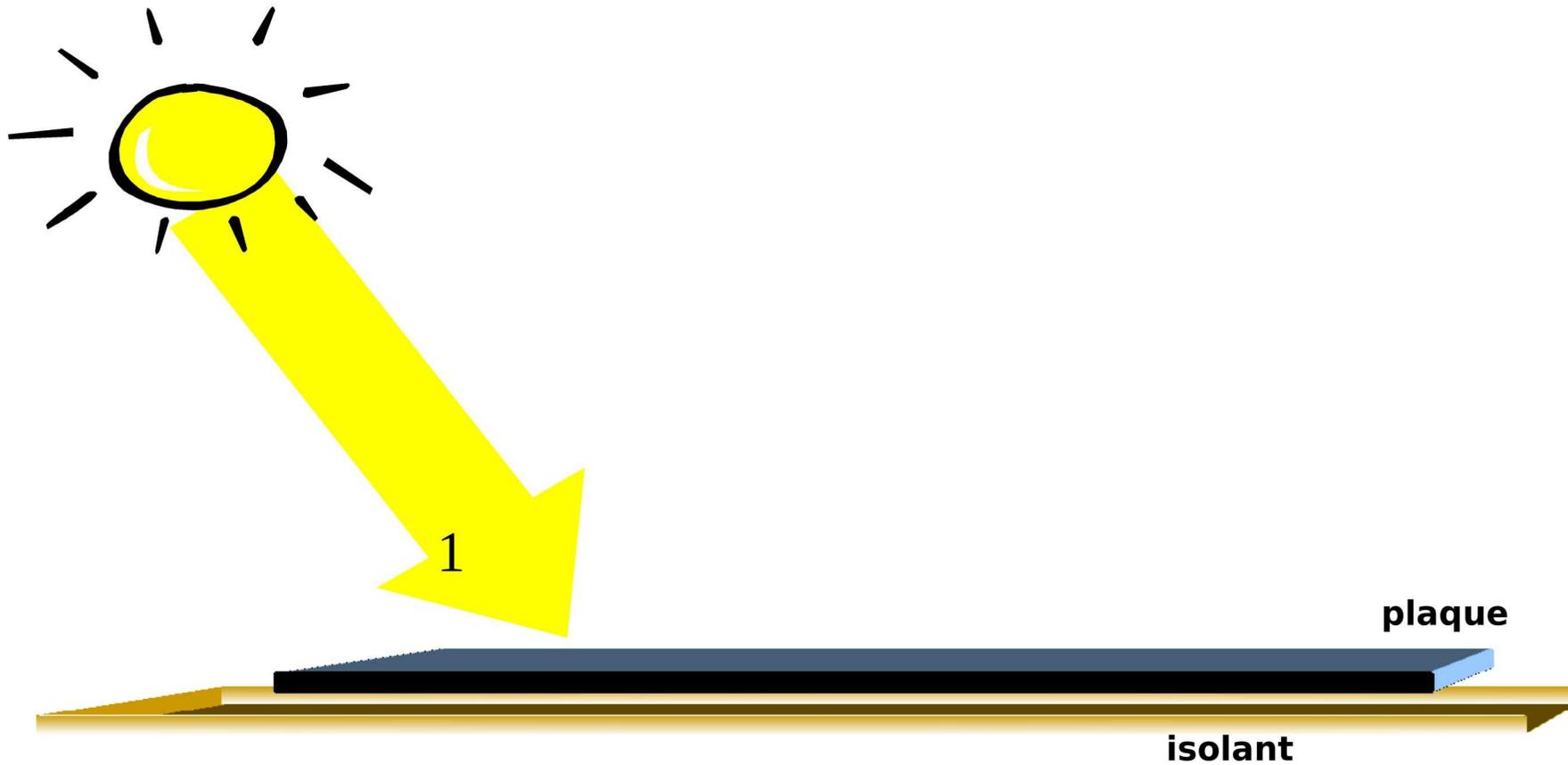
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.



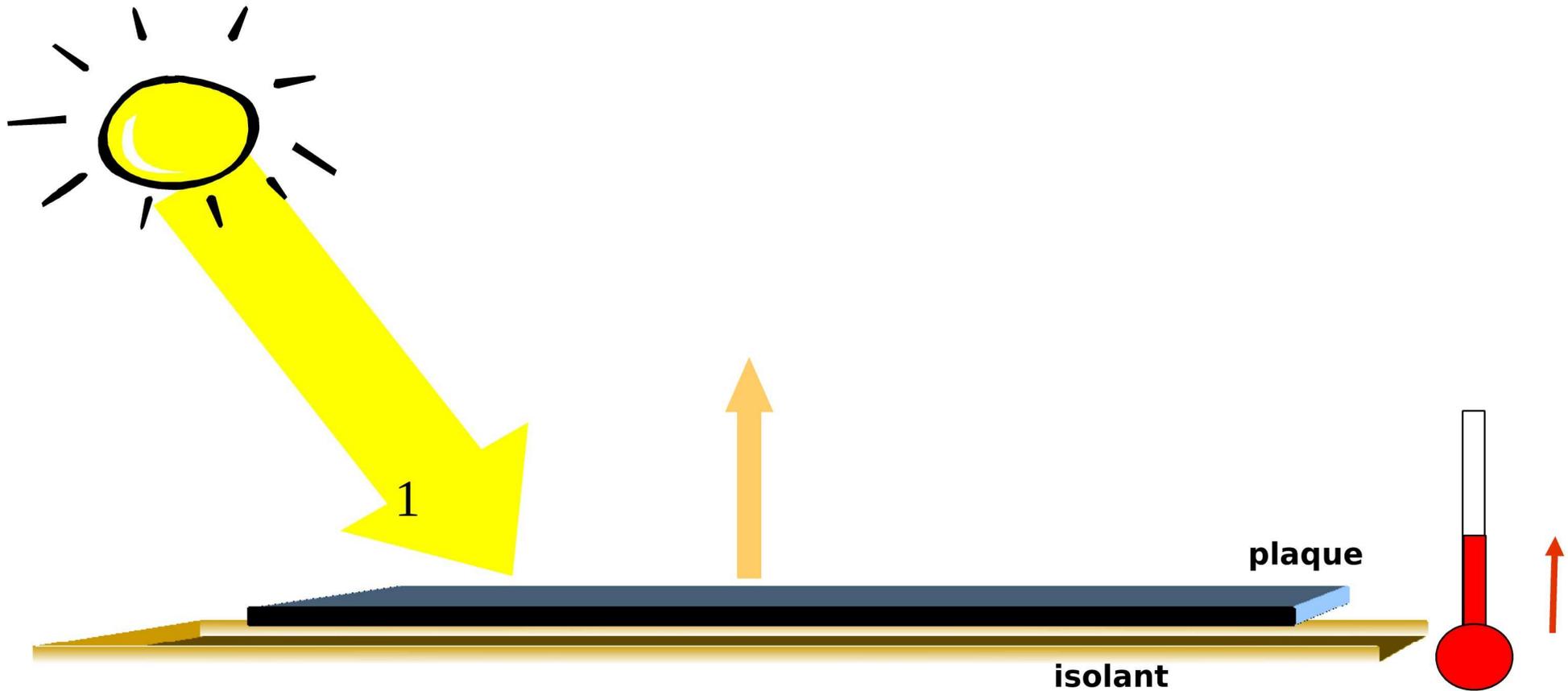
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.



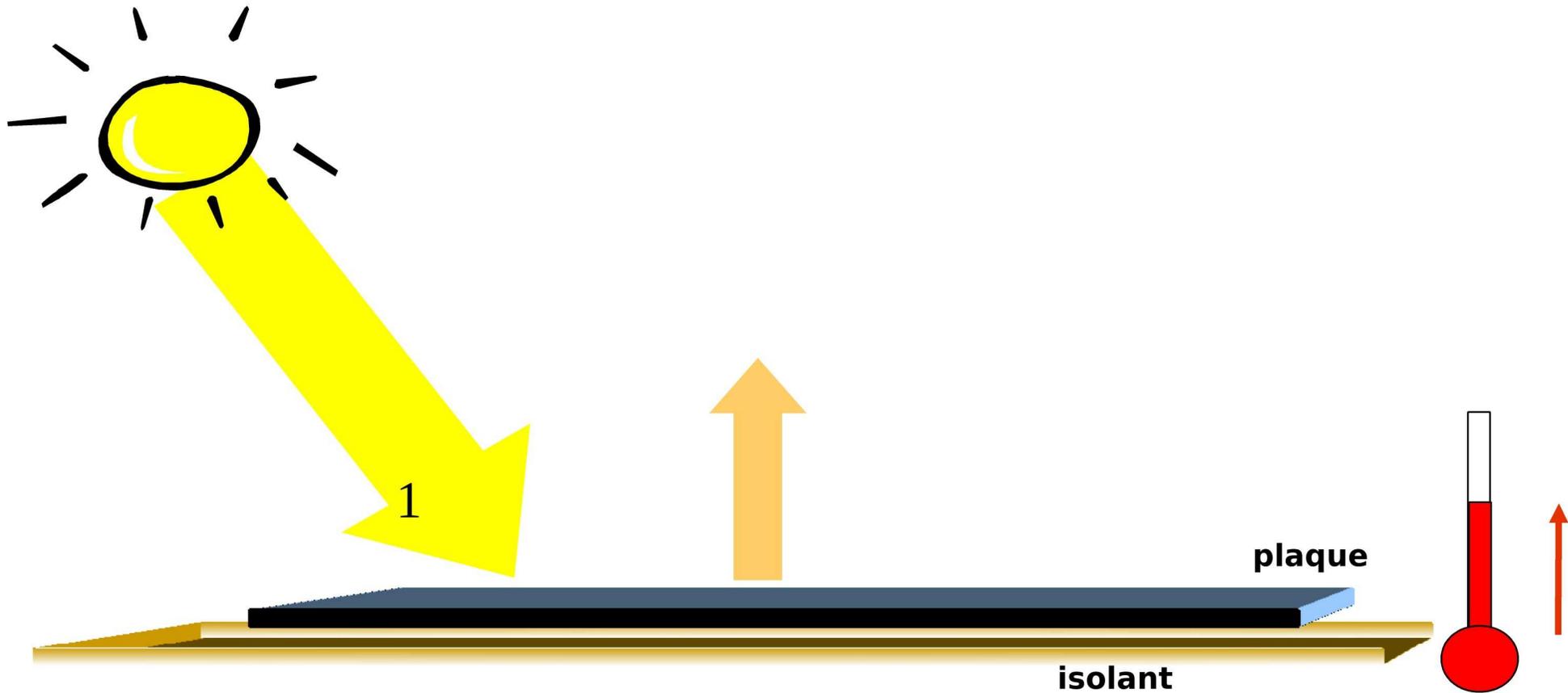
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.



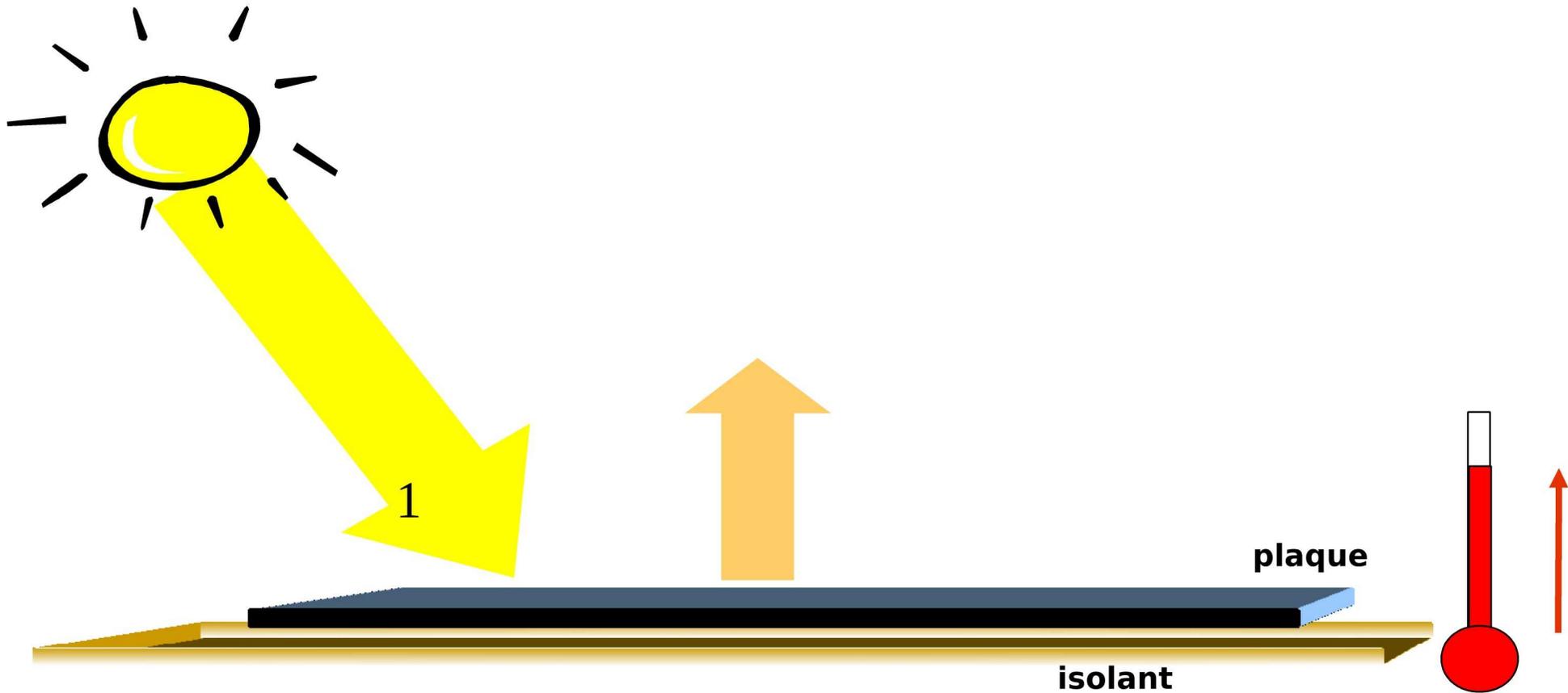
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.



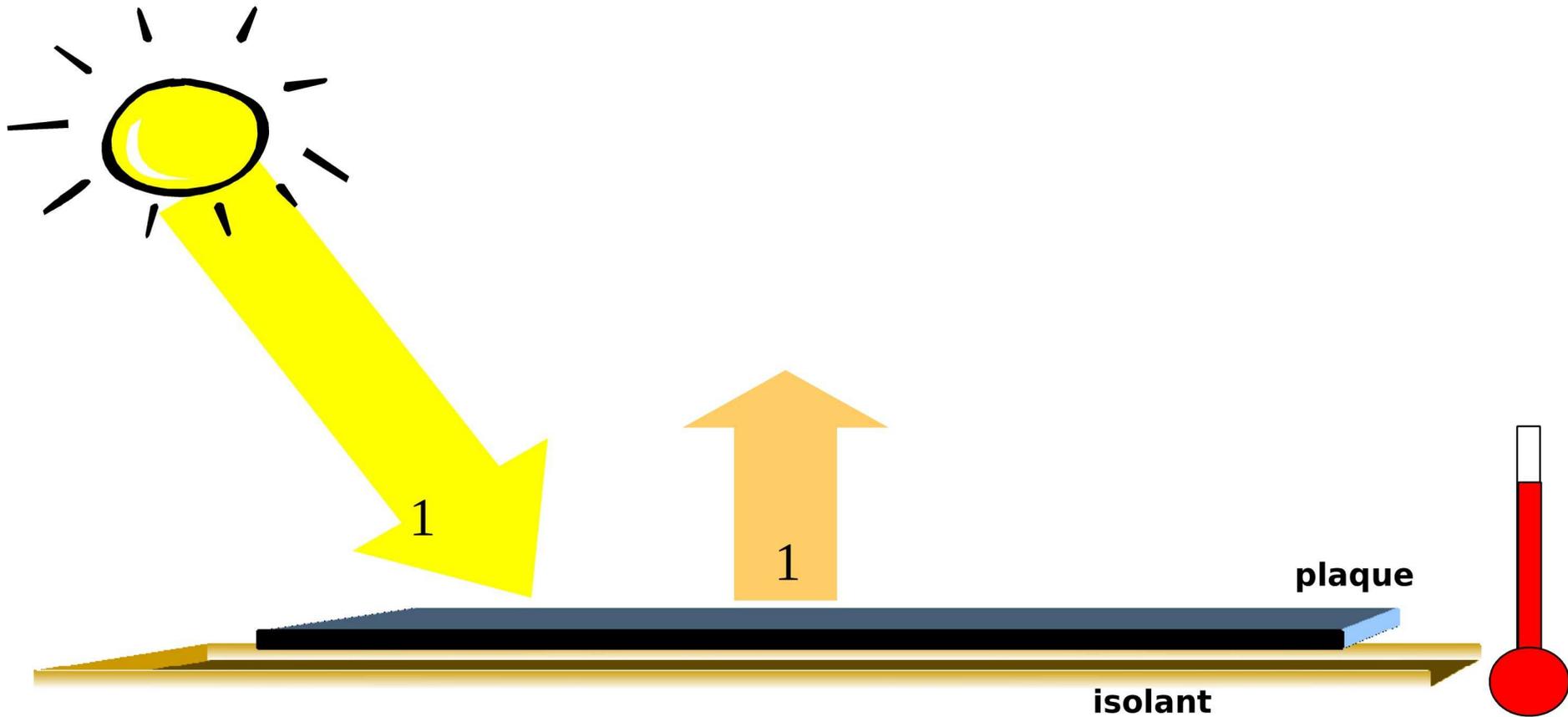
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



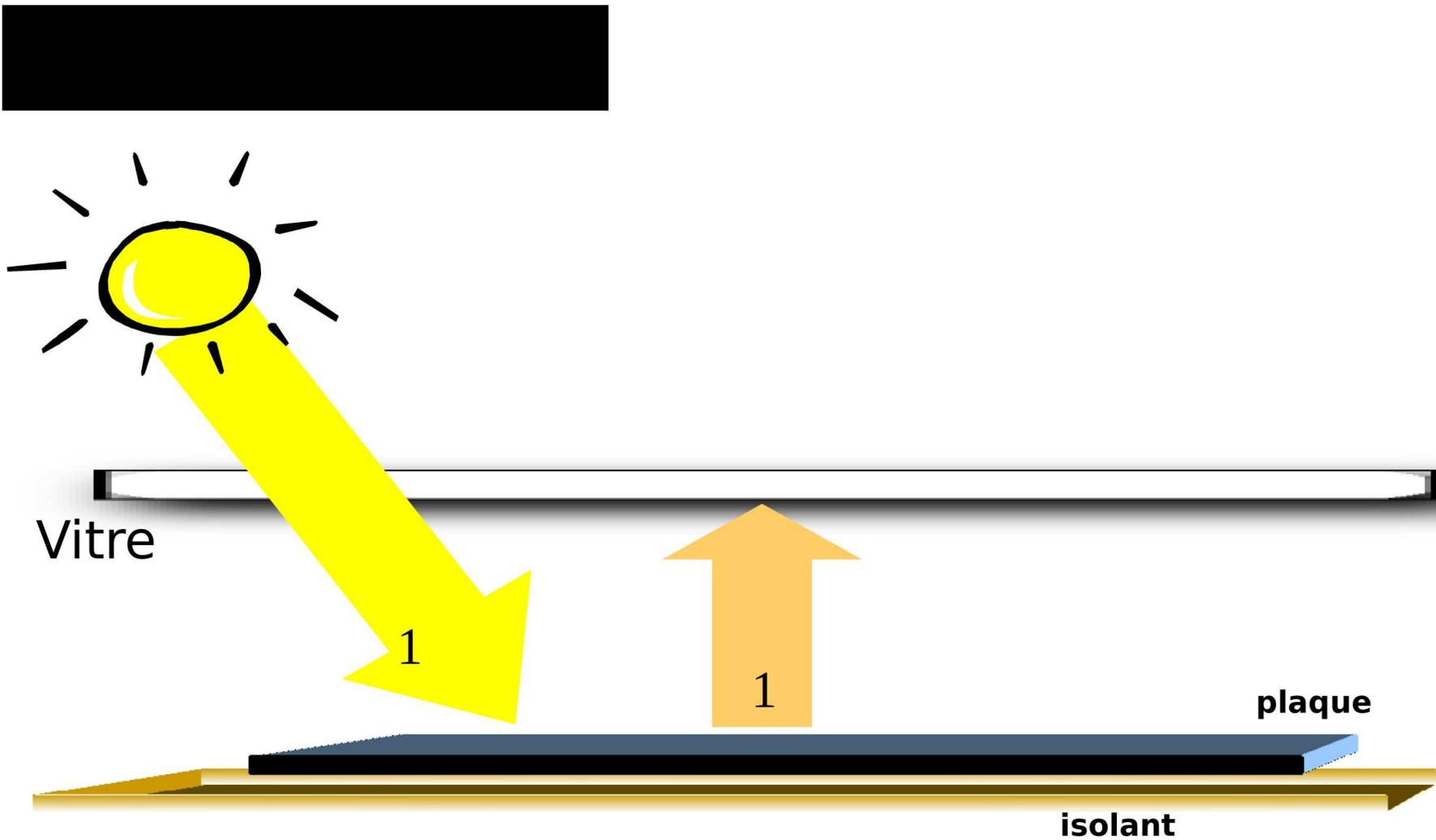
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



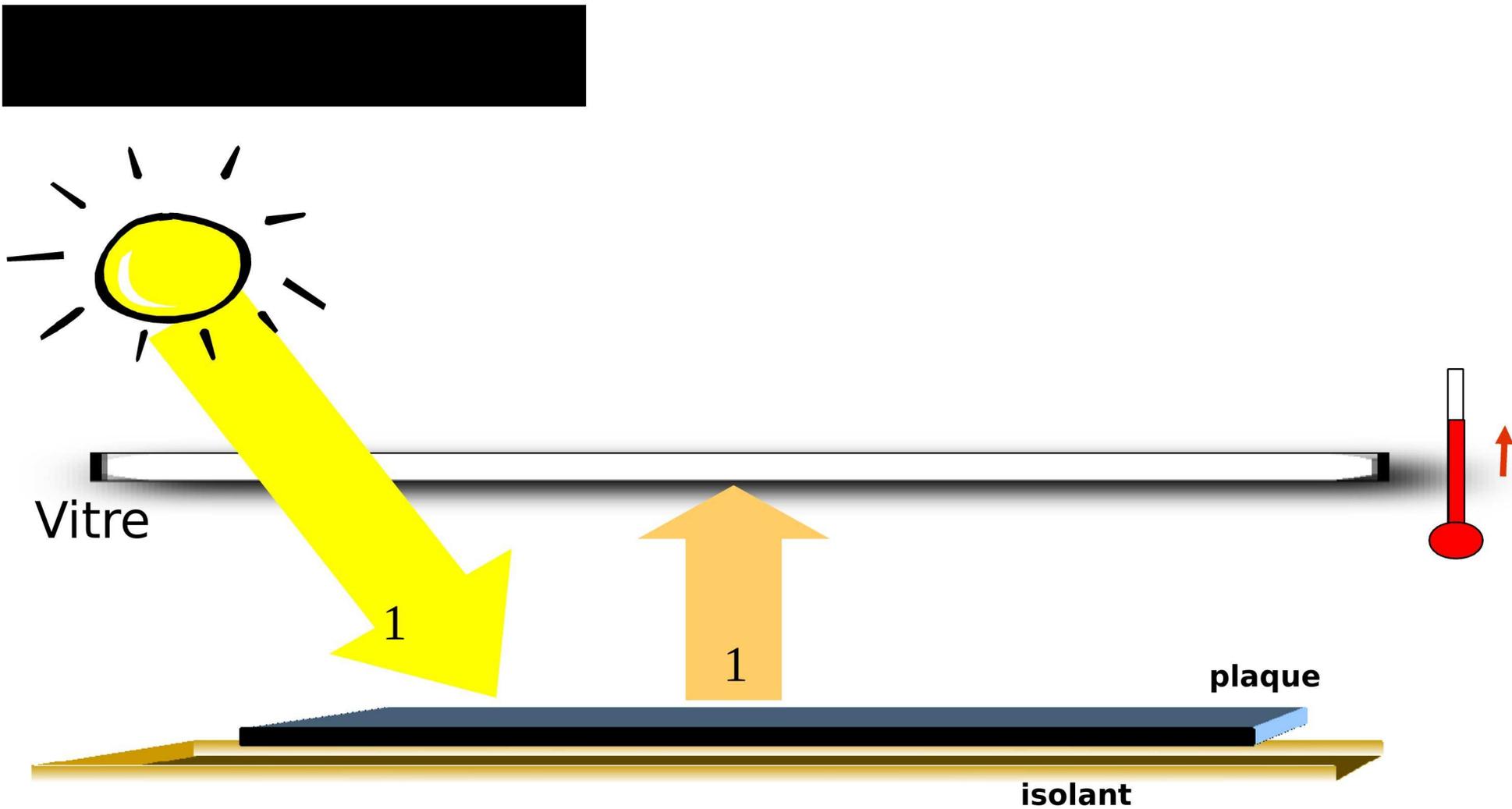
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.



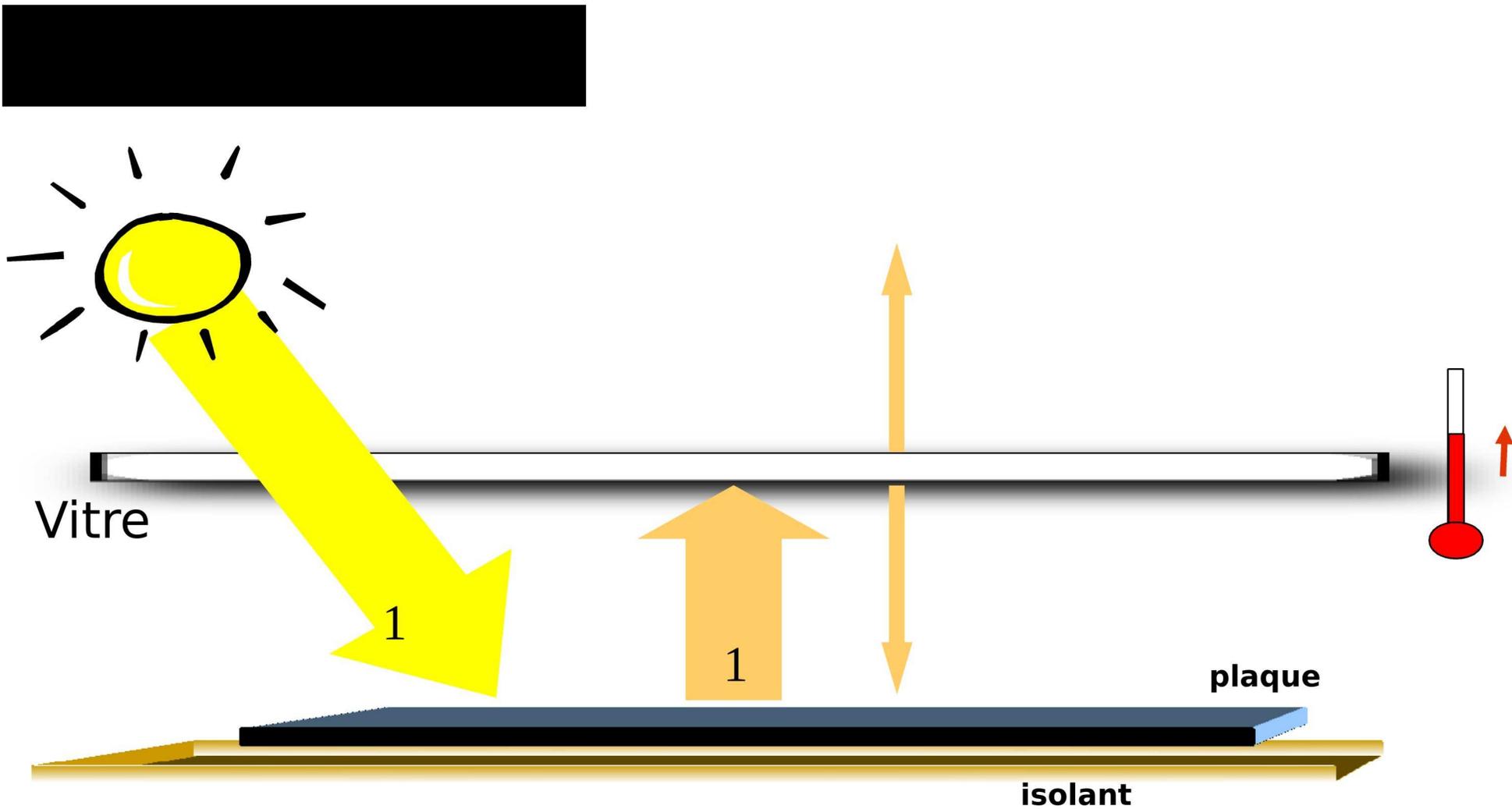
c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.



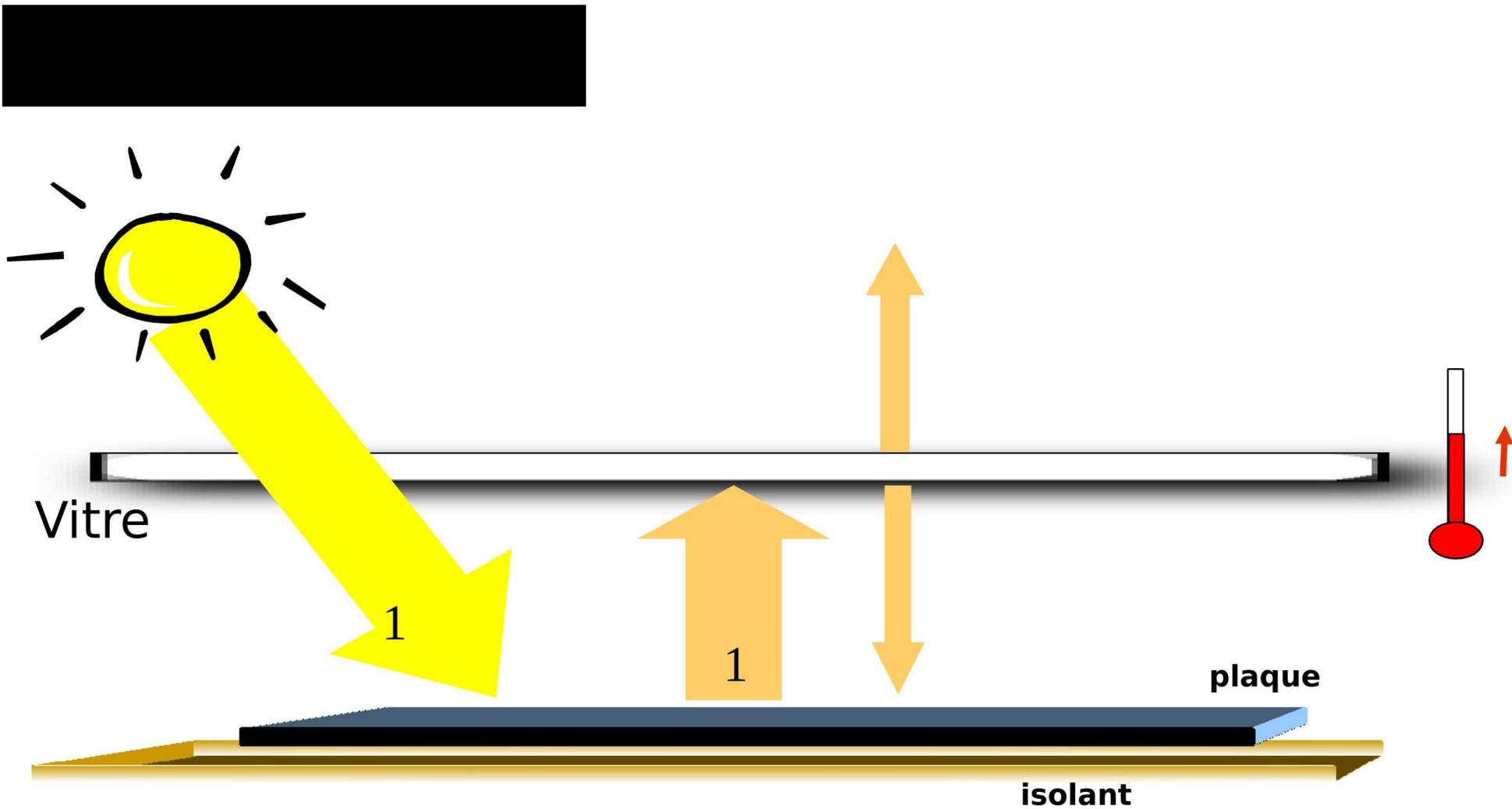
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.



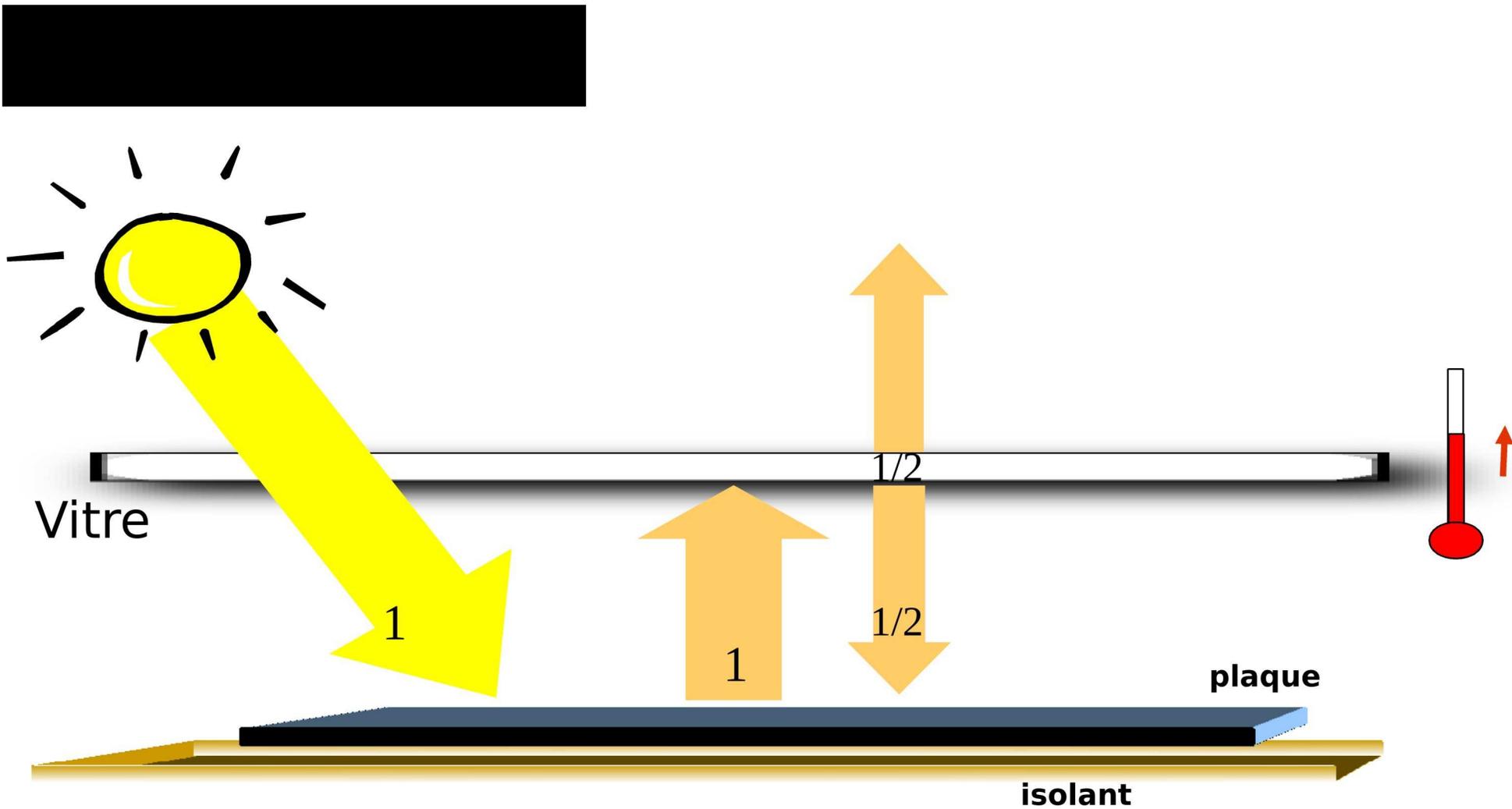
L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.



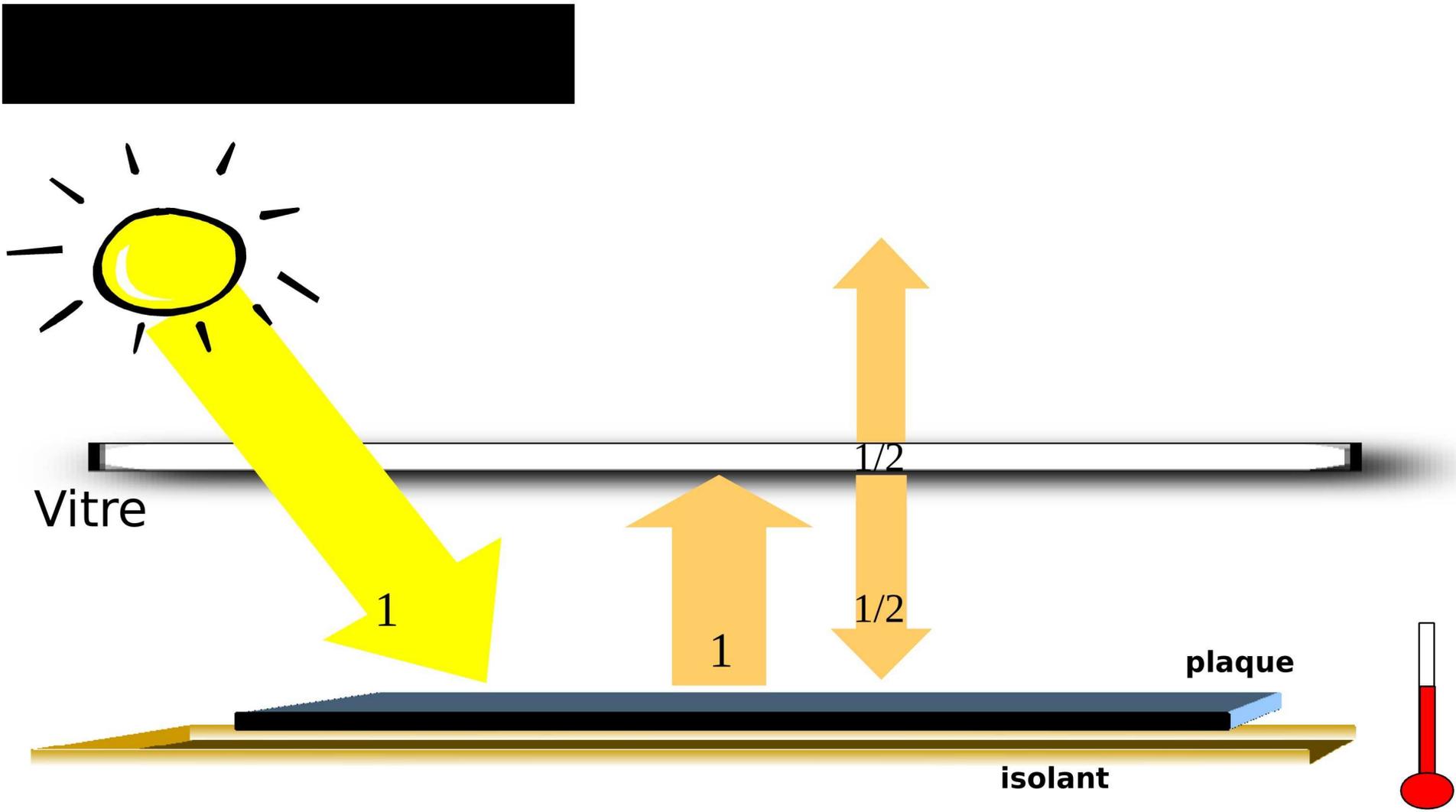
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.



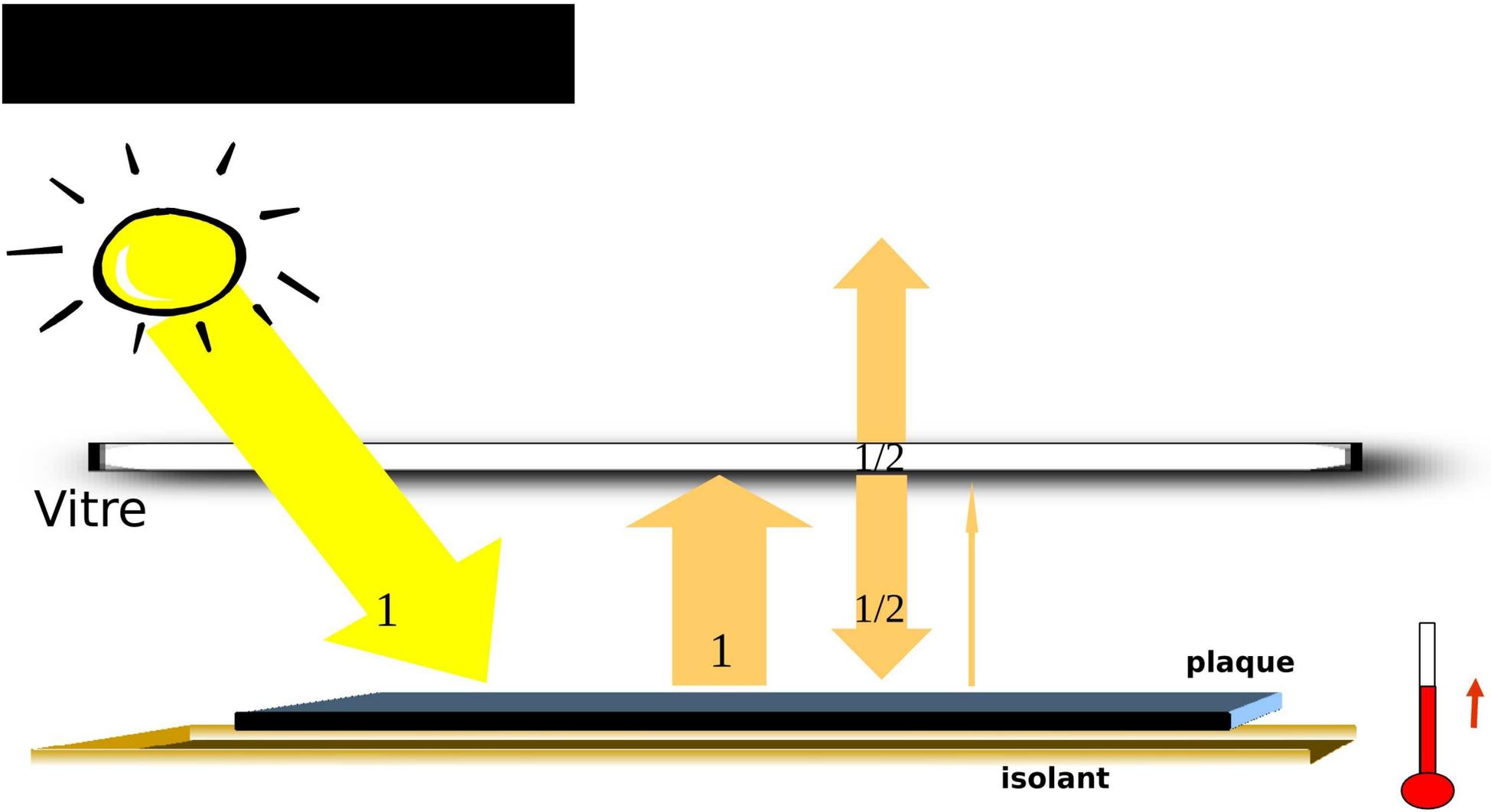
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.



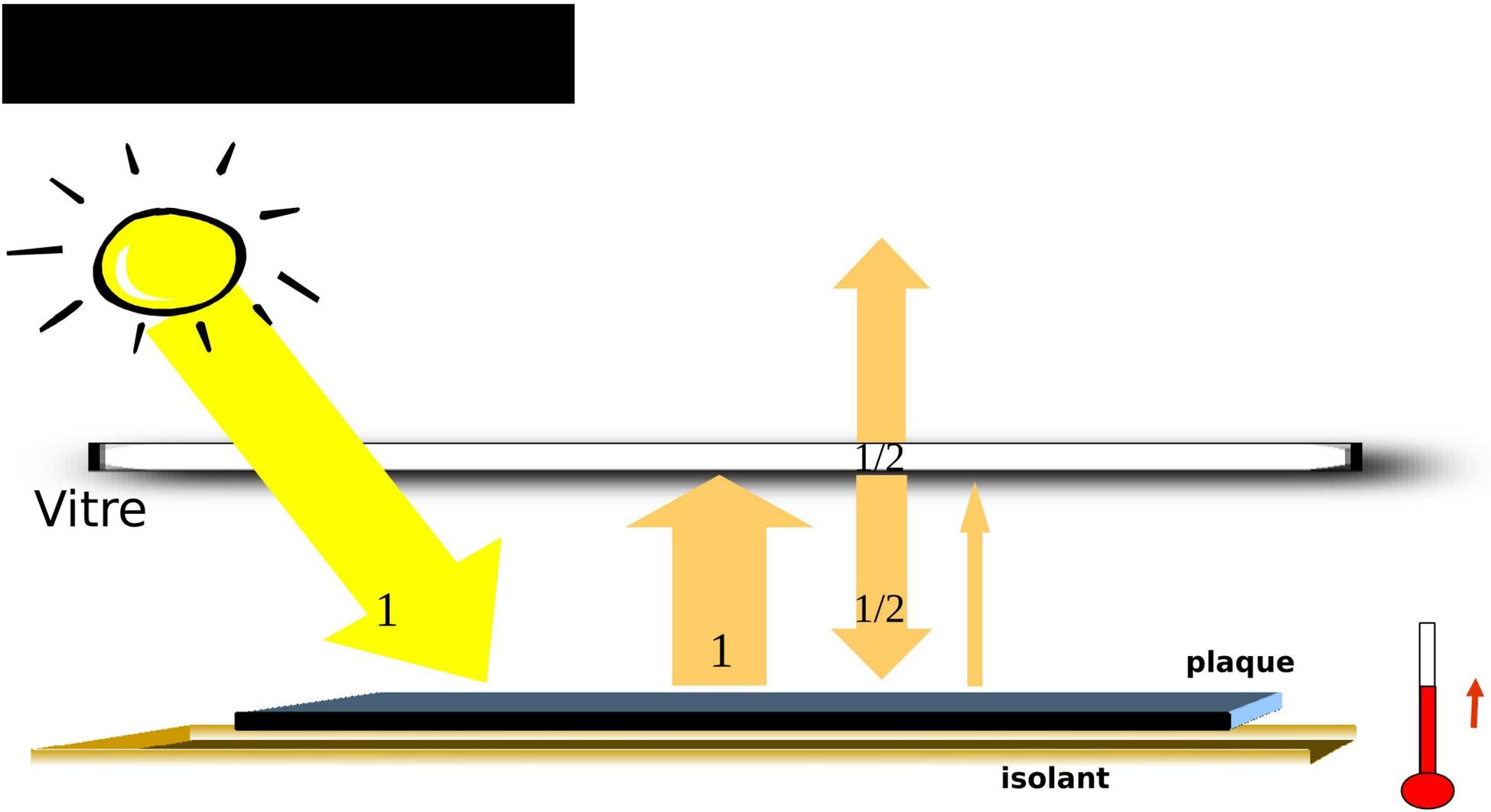
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



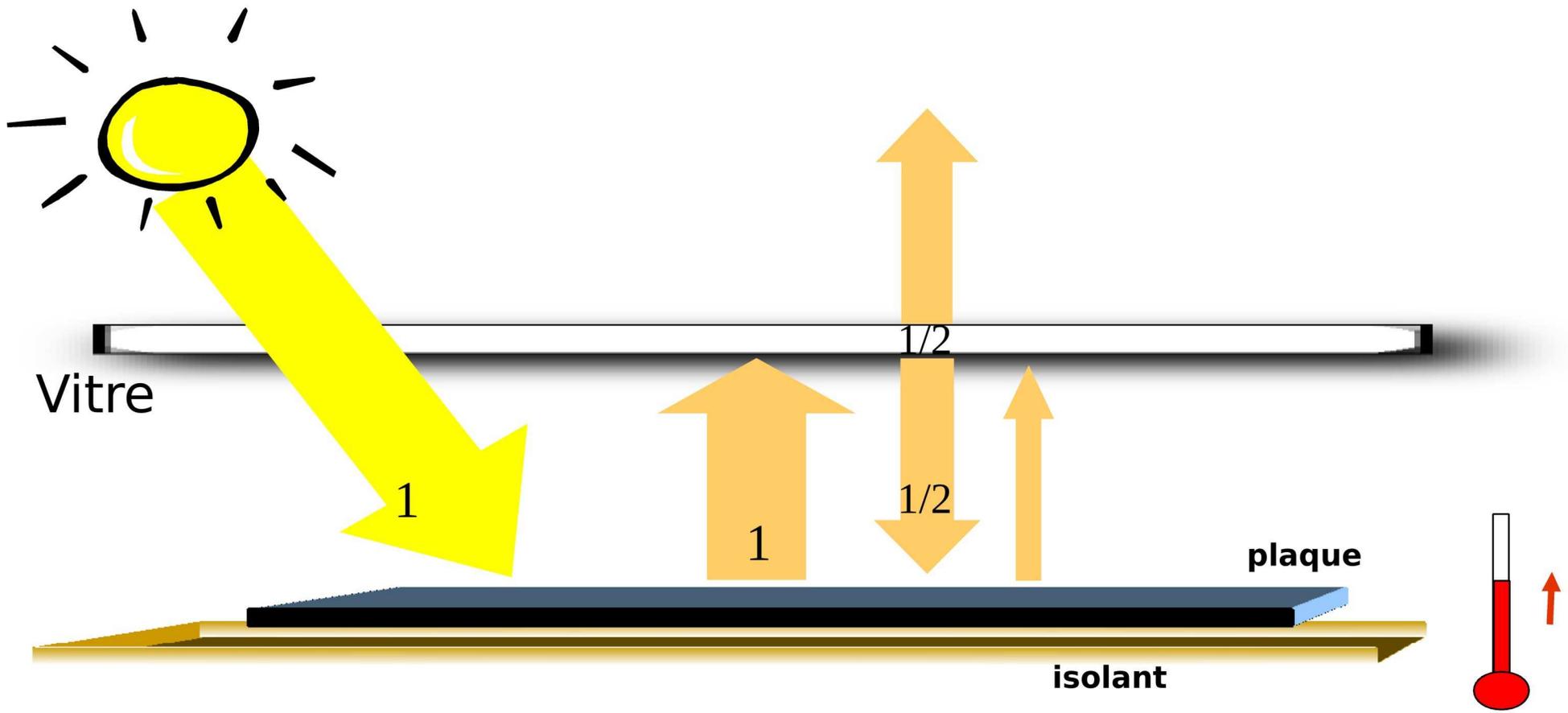
Le rayonnement infrarouge émis par la vitre vers le bas est absorbé par la plaque.



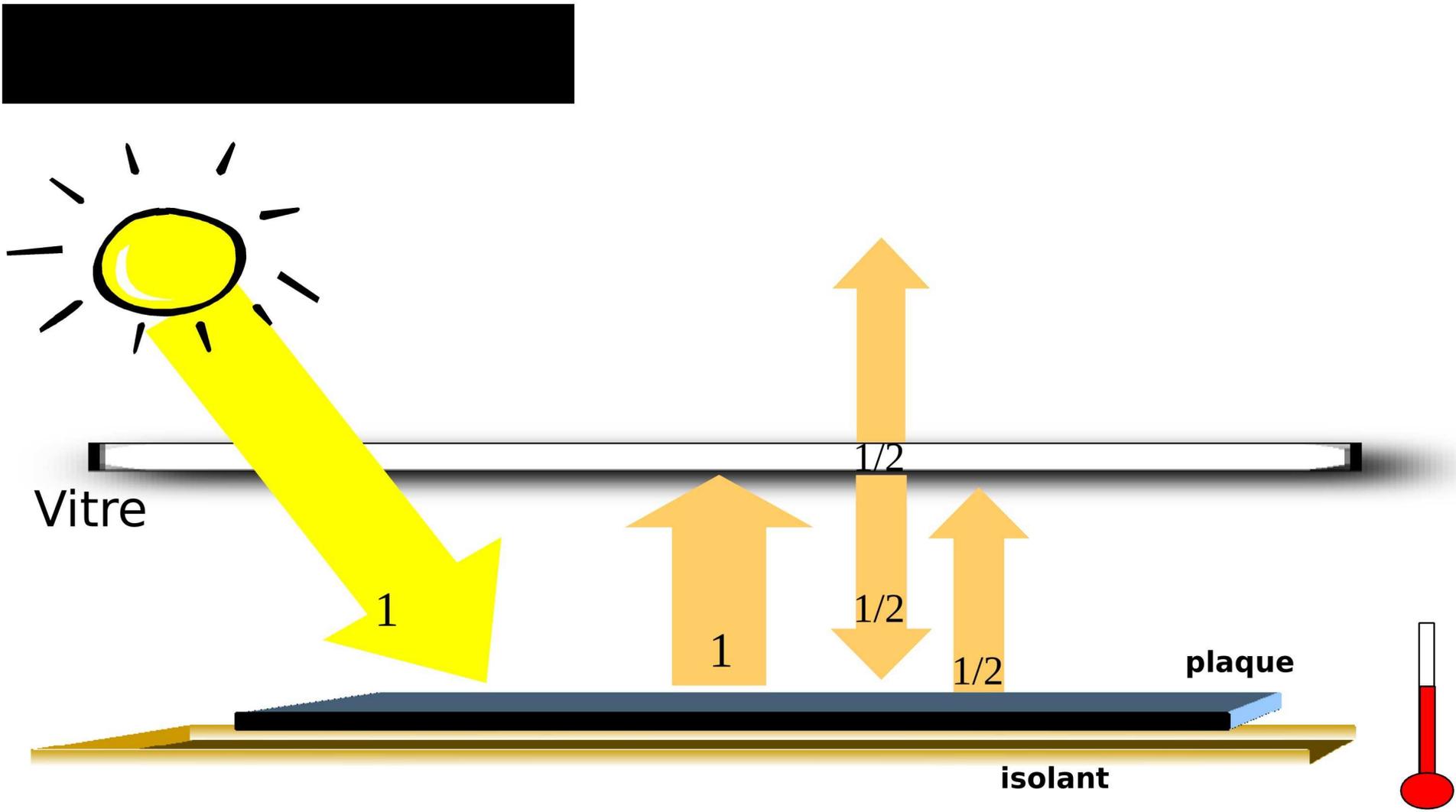
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.



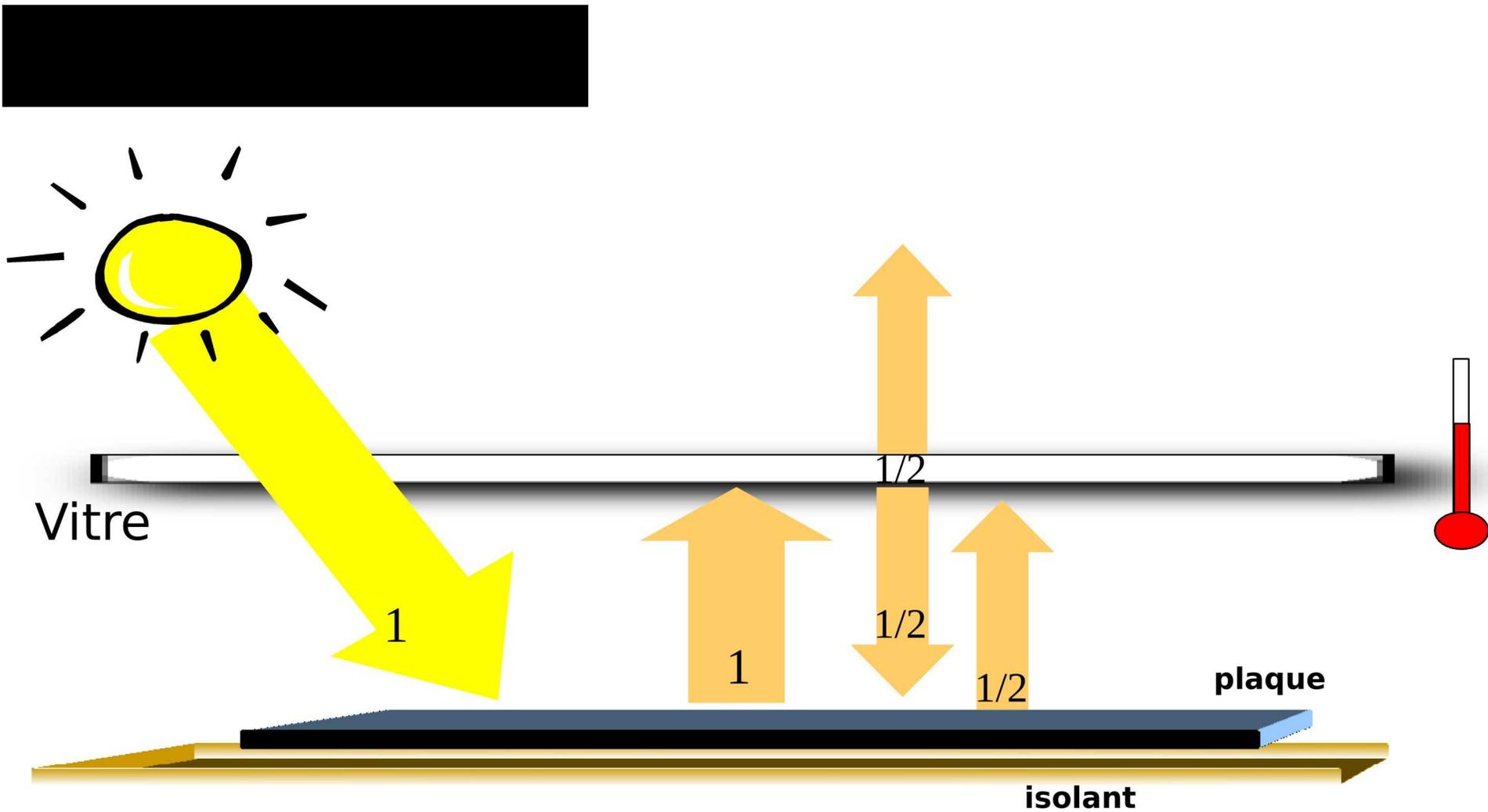
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.



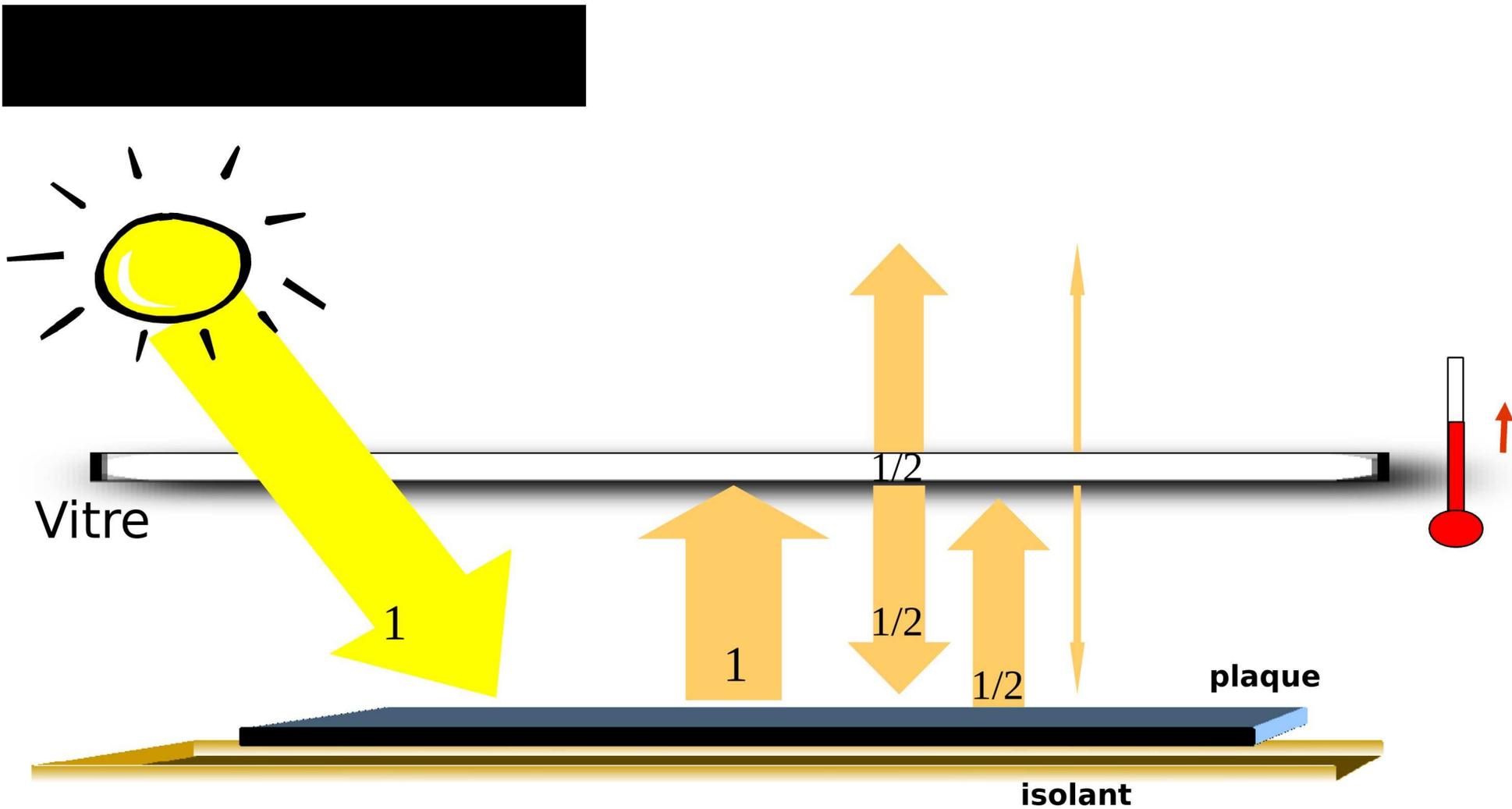
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.



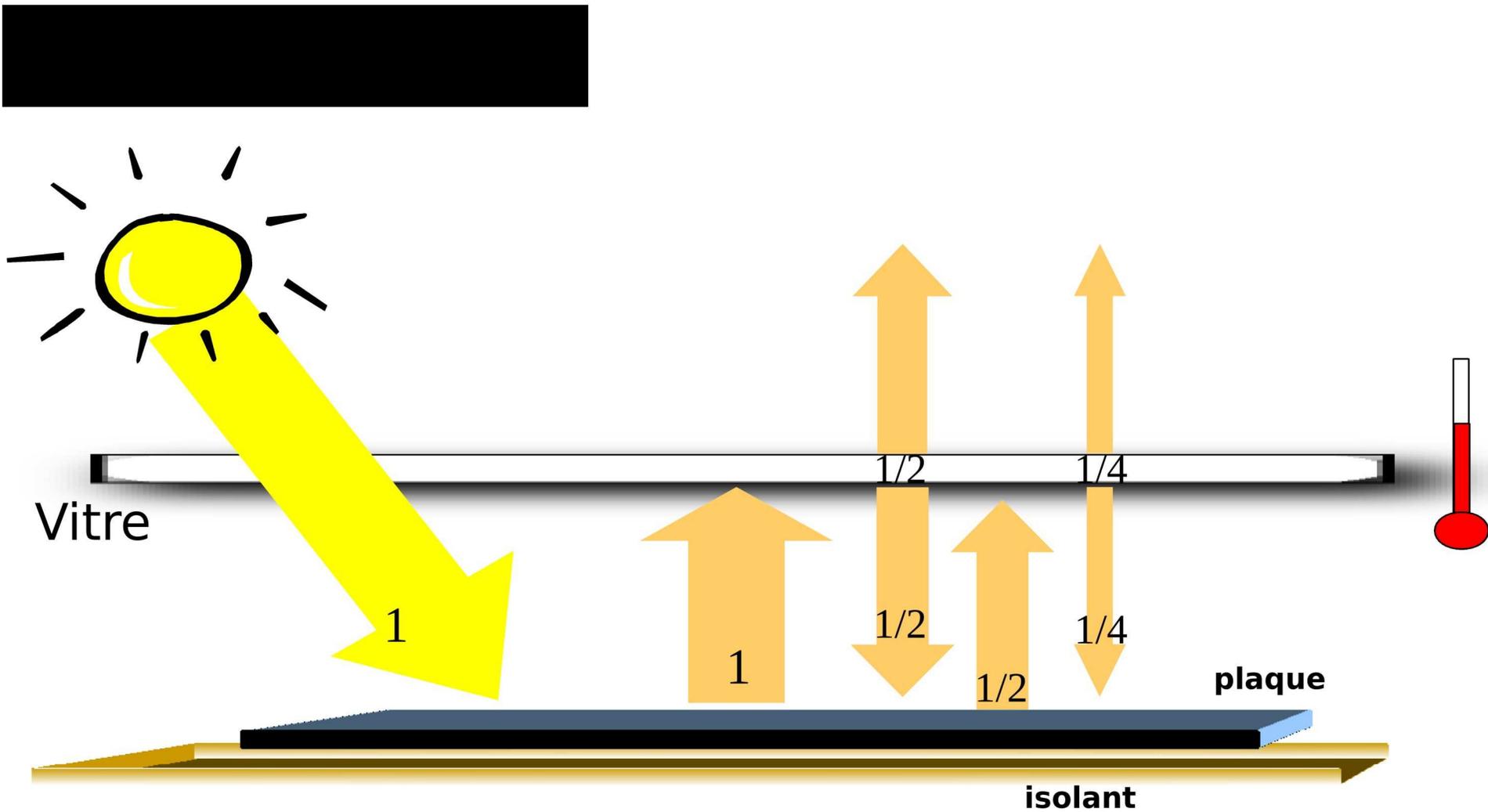
Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre.



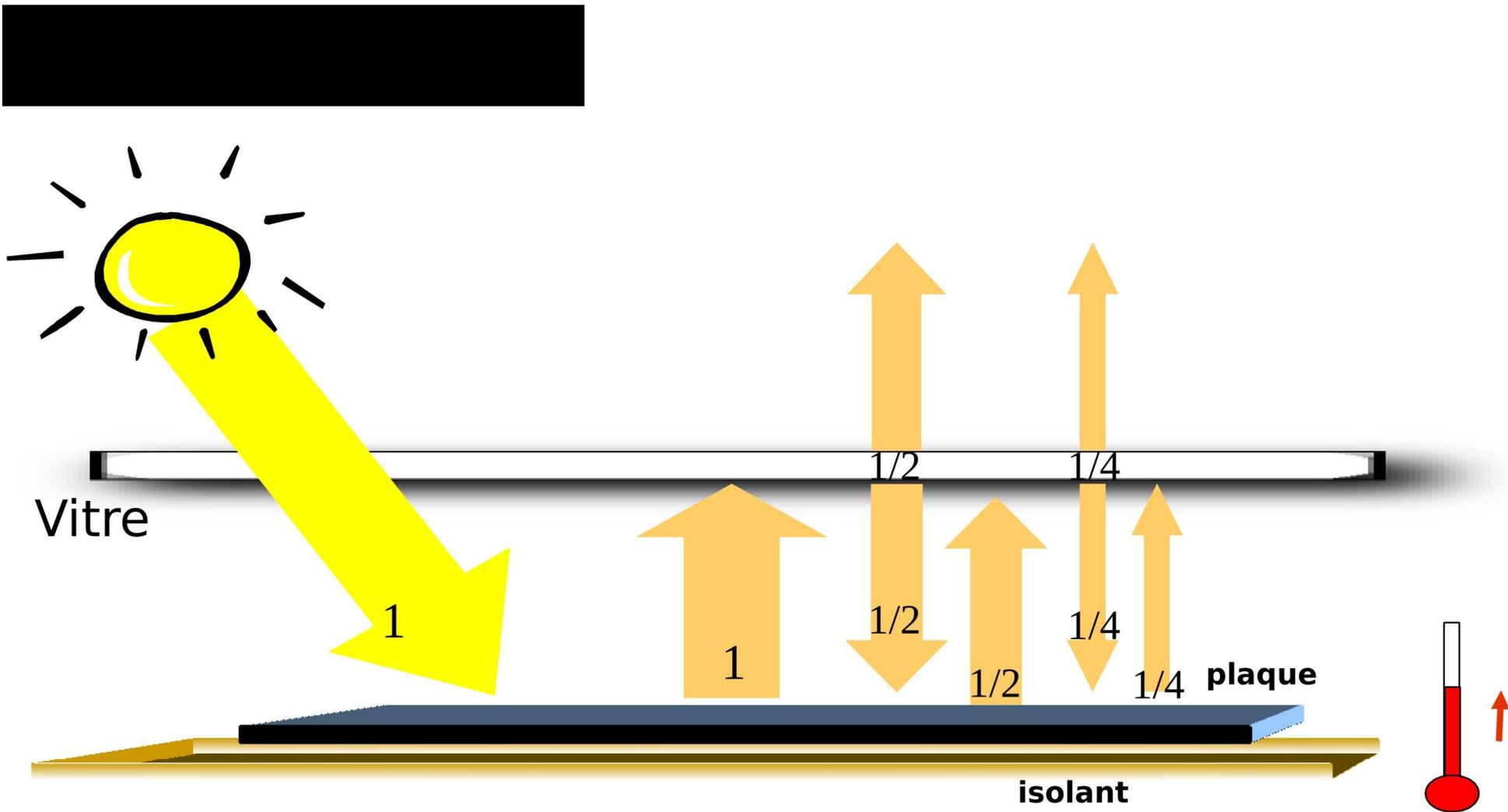
Ce rayonnement supplémentaire émis par la plaque est de nouveau absorbé par la vitre dont la température augmente encore.



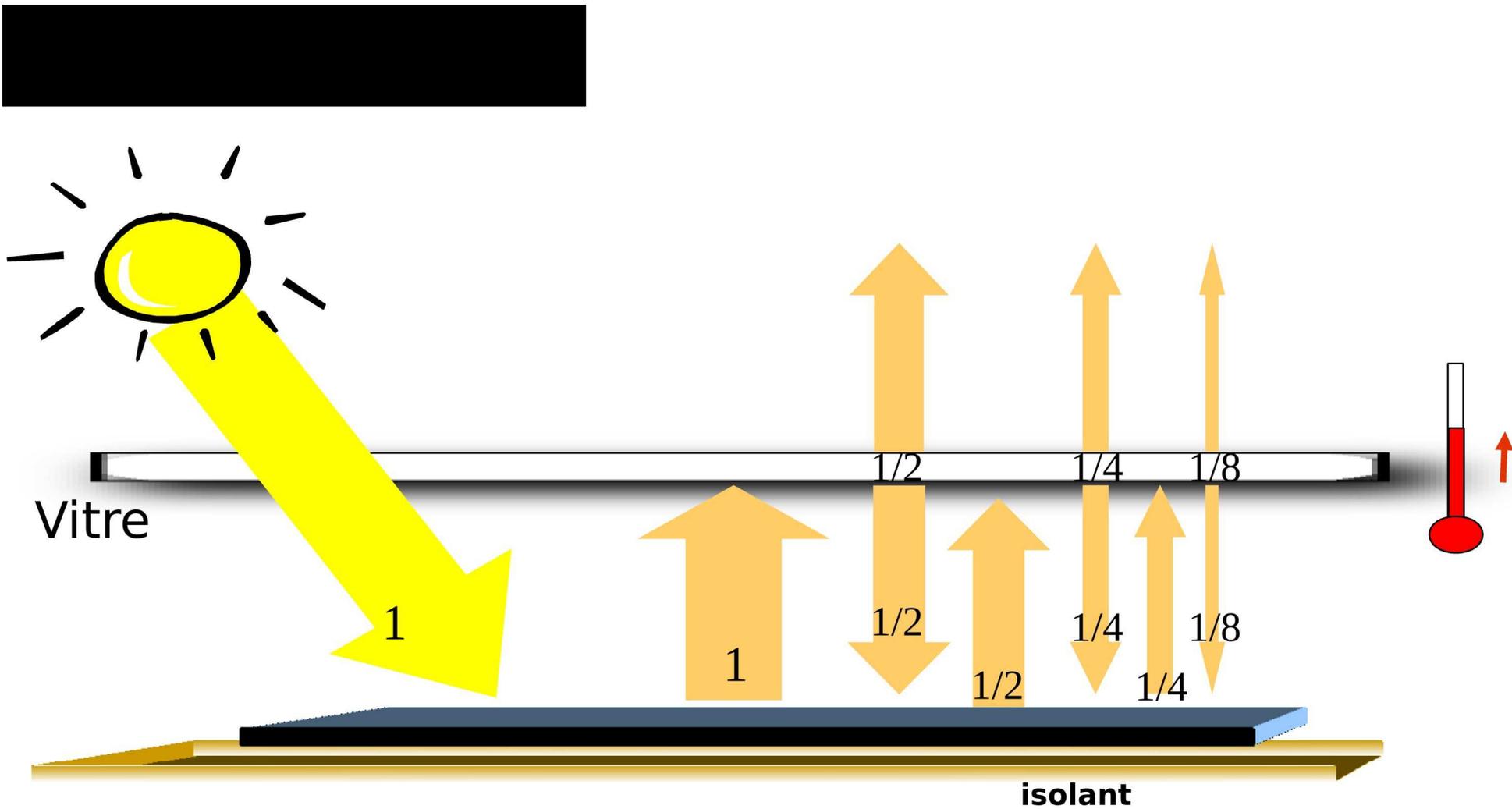
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge, moitié vers le haut, moitié vers le bas.



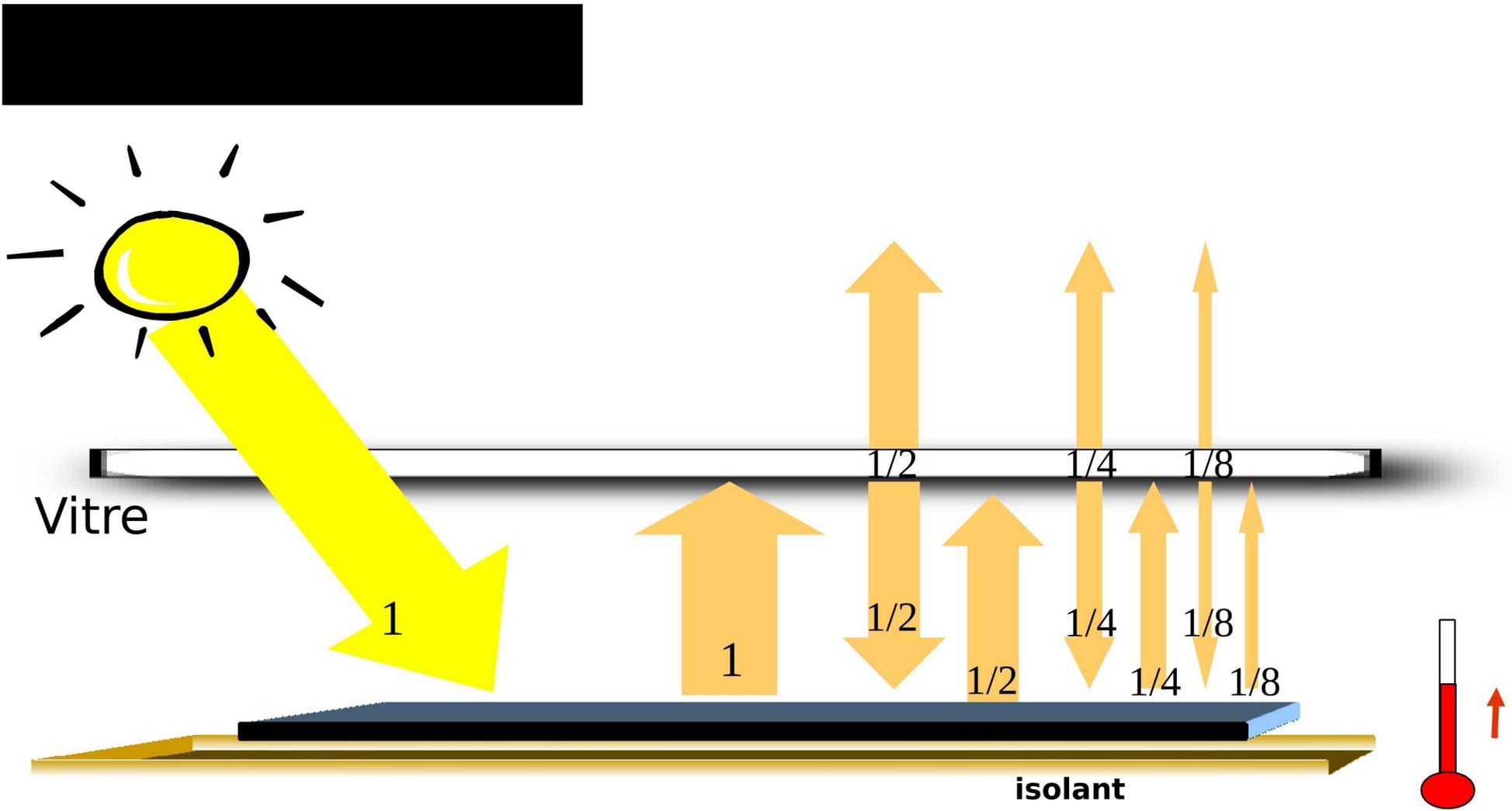
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



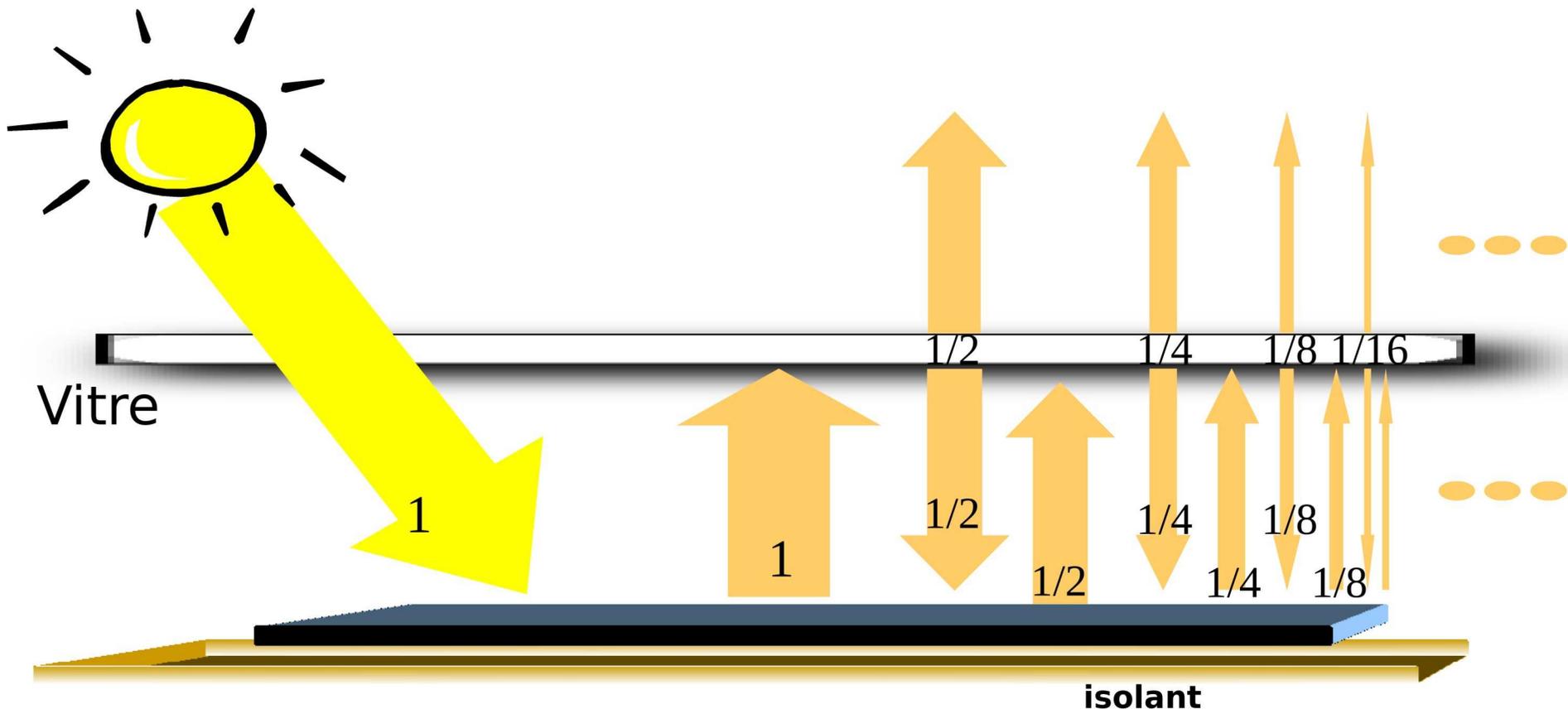
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



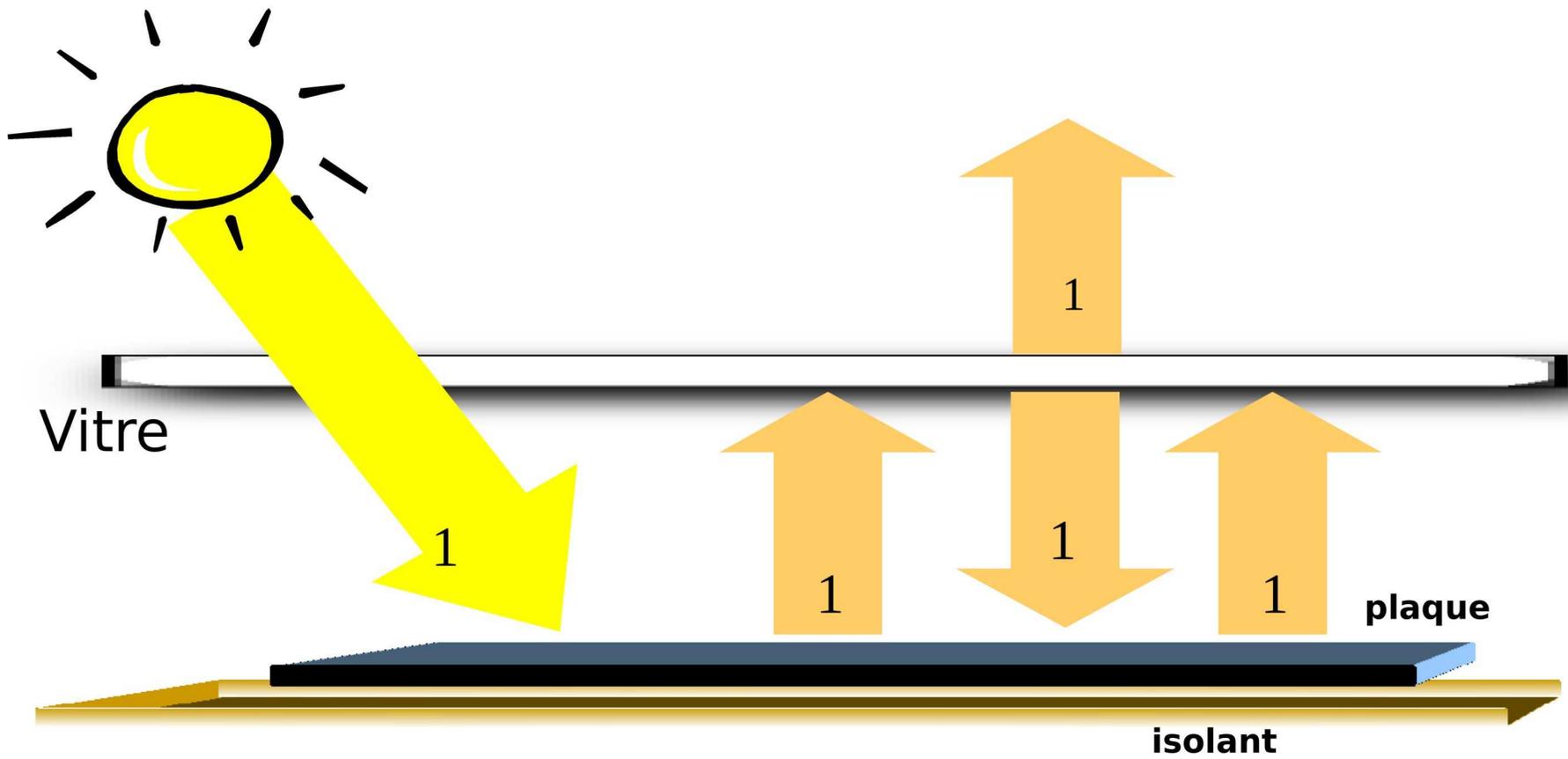
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



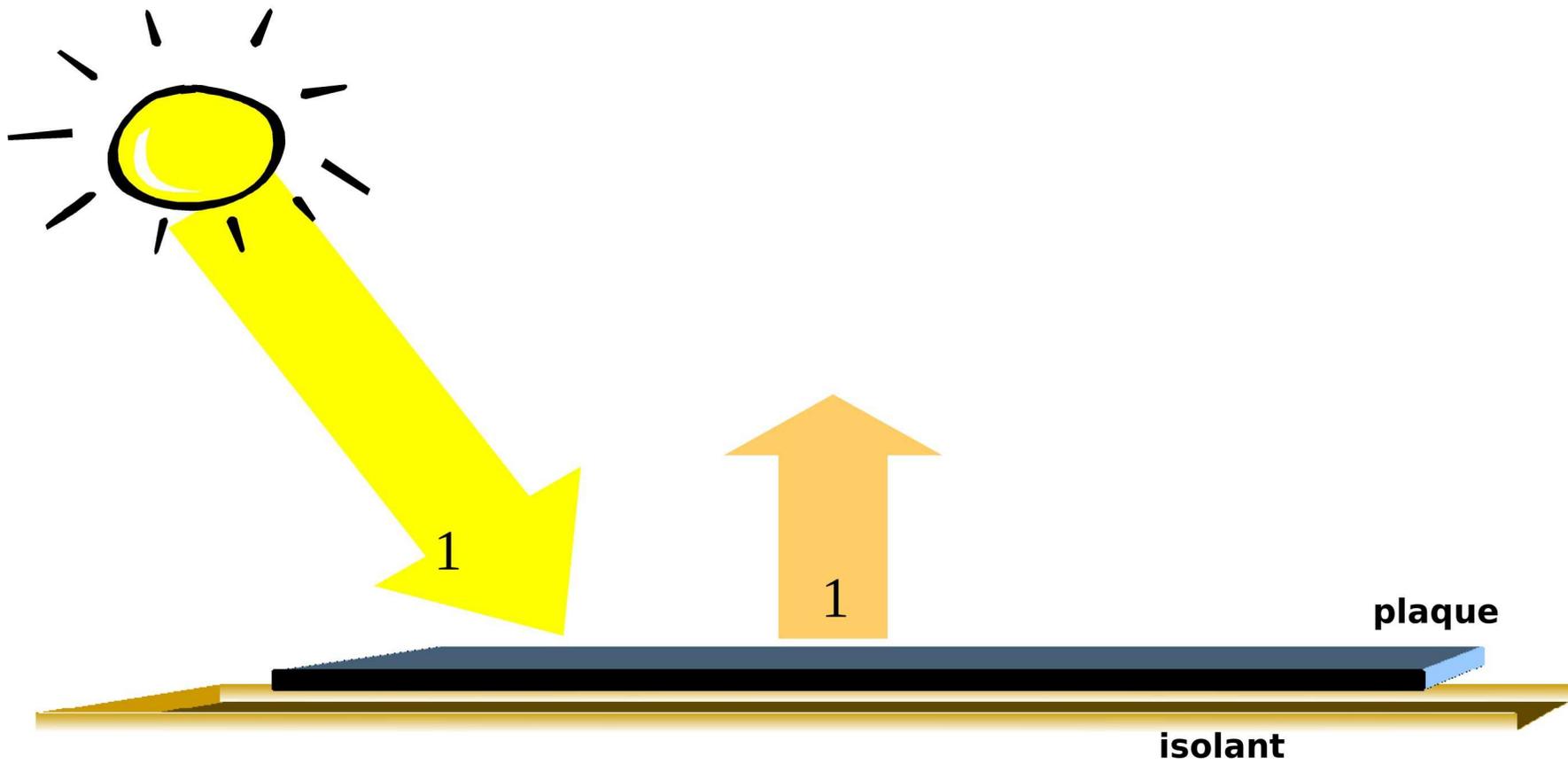
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



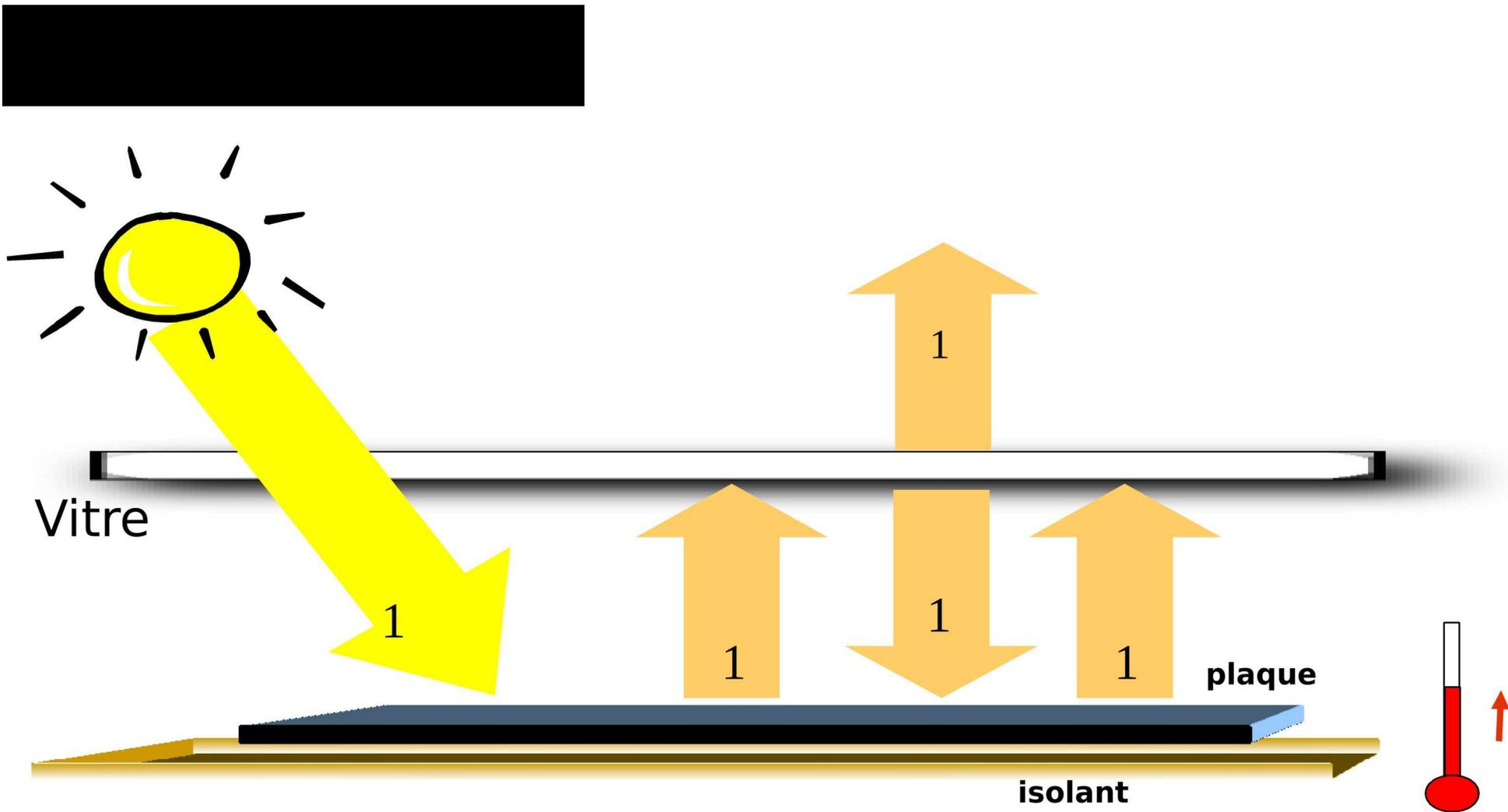
etc...



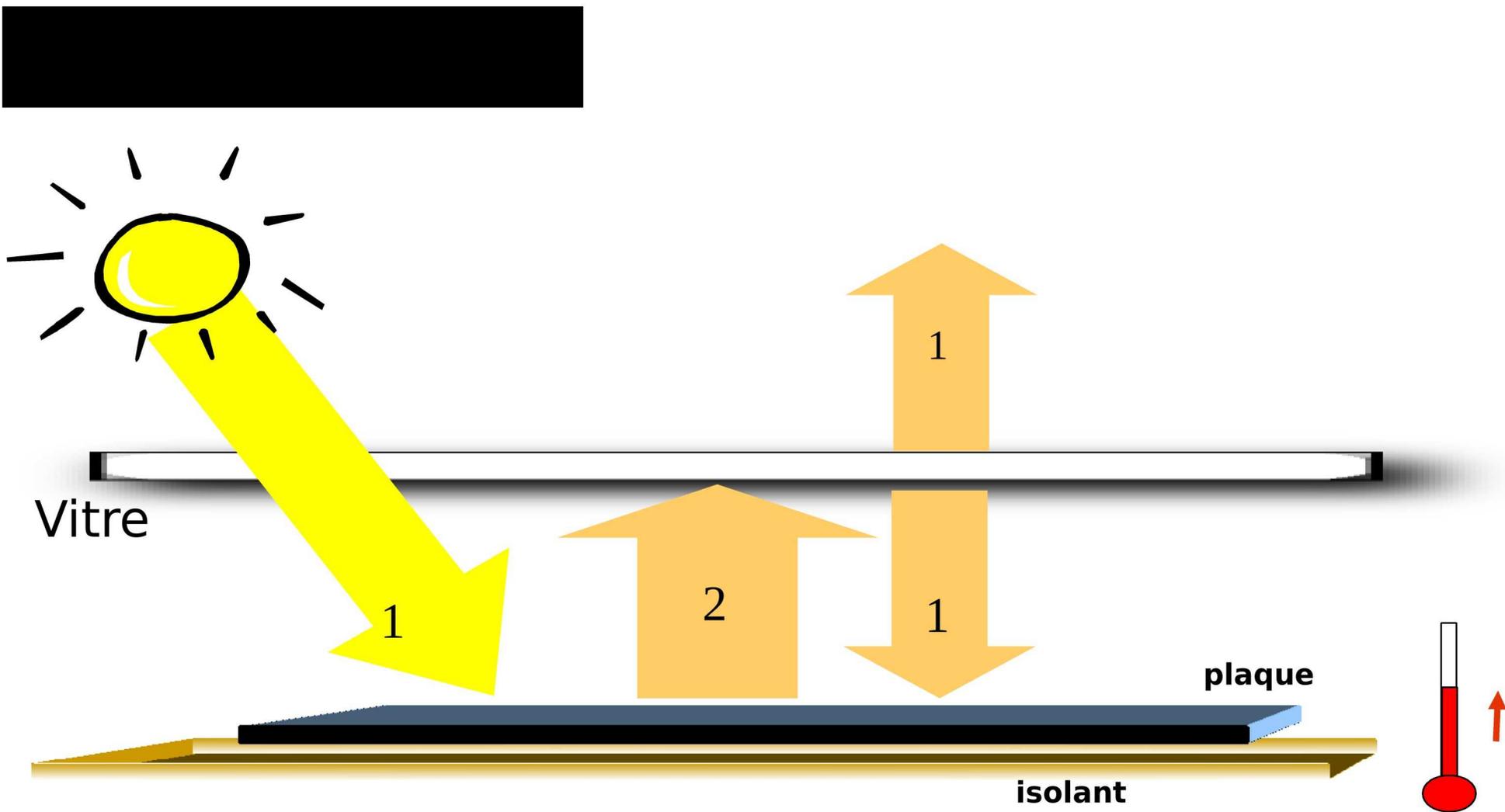
et si on fait la somme...



Si on résume le déroulement précédent, ...



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.



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.

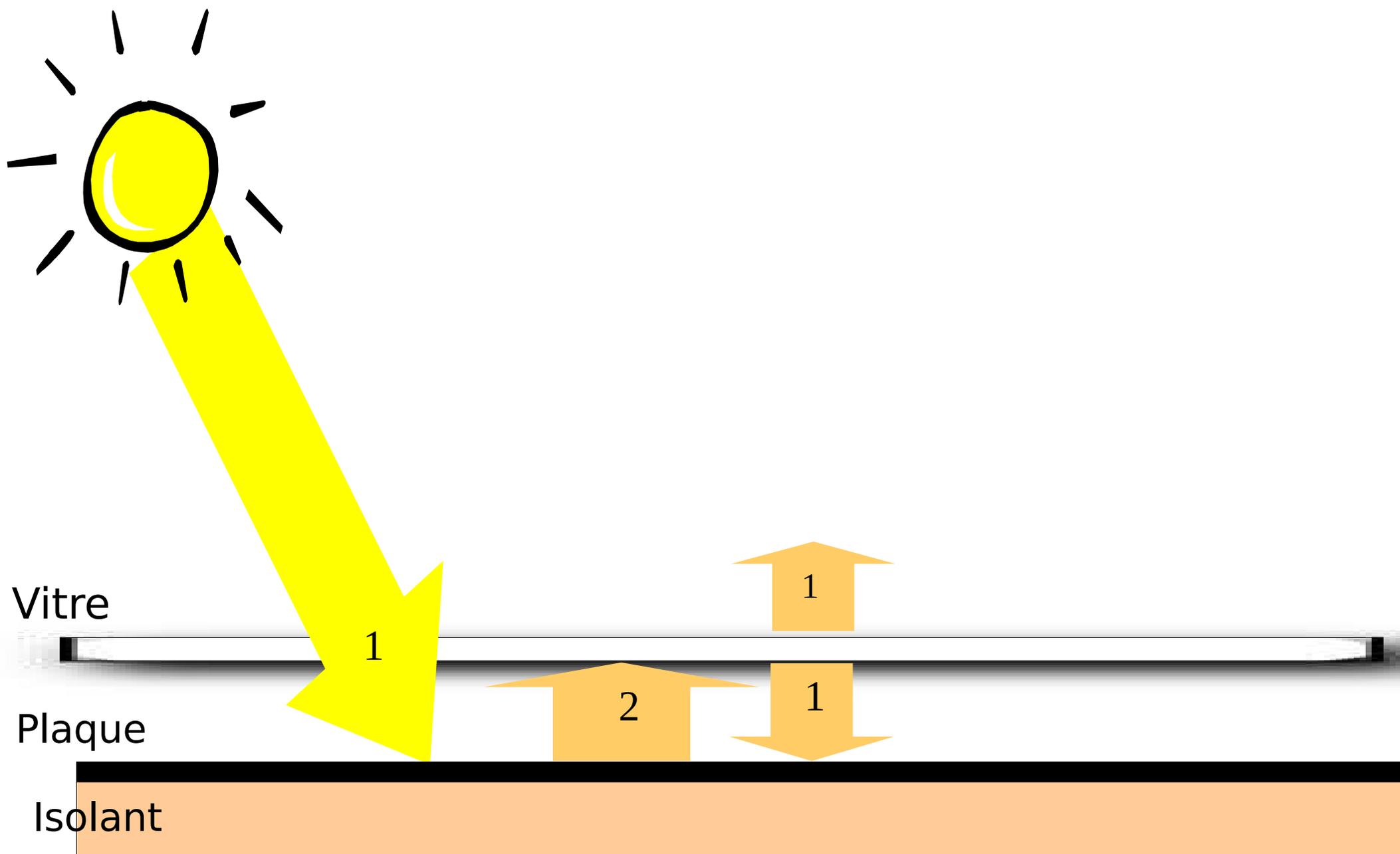
5) L'effet de serre

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

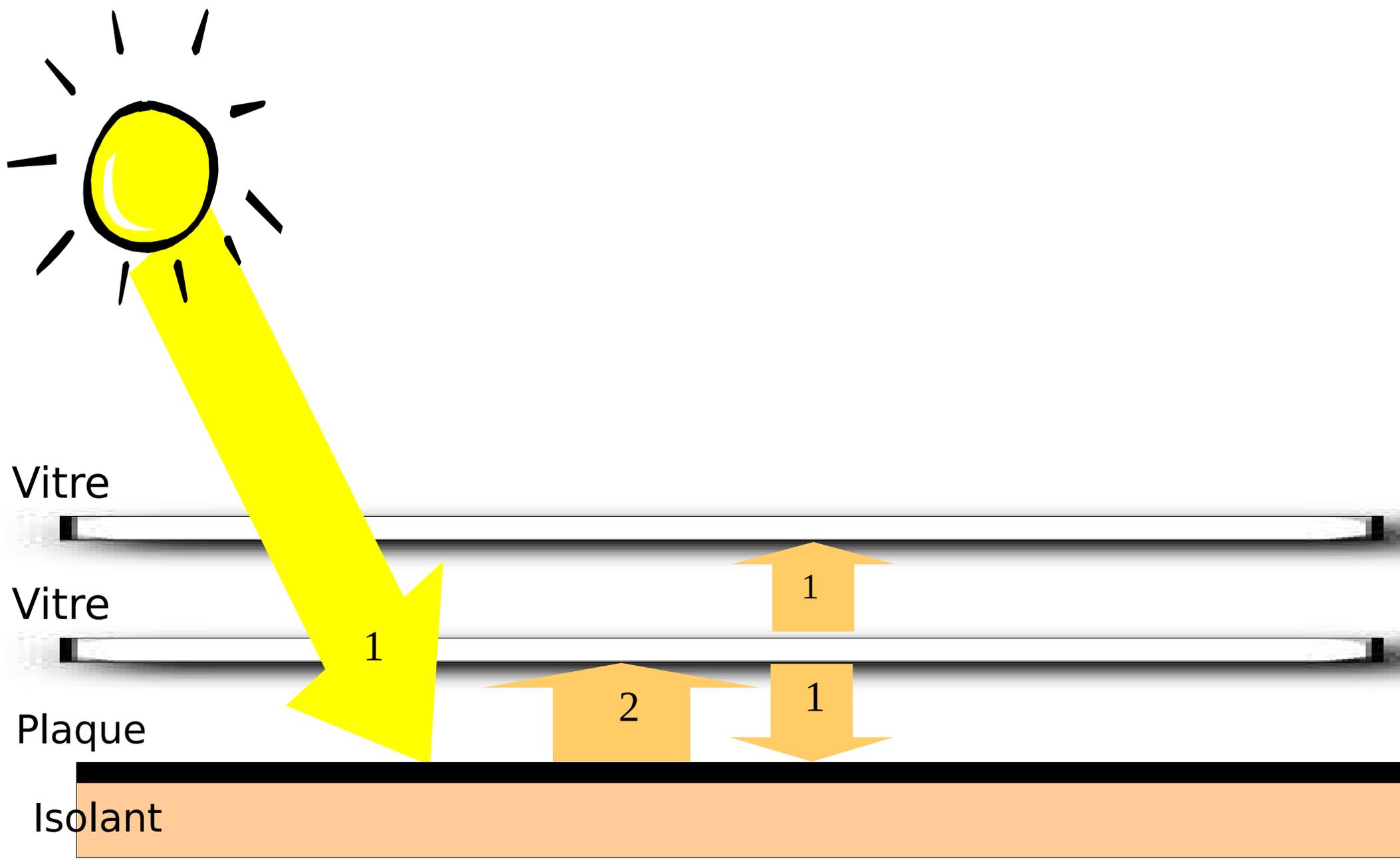
La vitre **absorbe** le rayonnement infrarouge, ne le réfléchit pas

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.

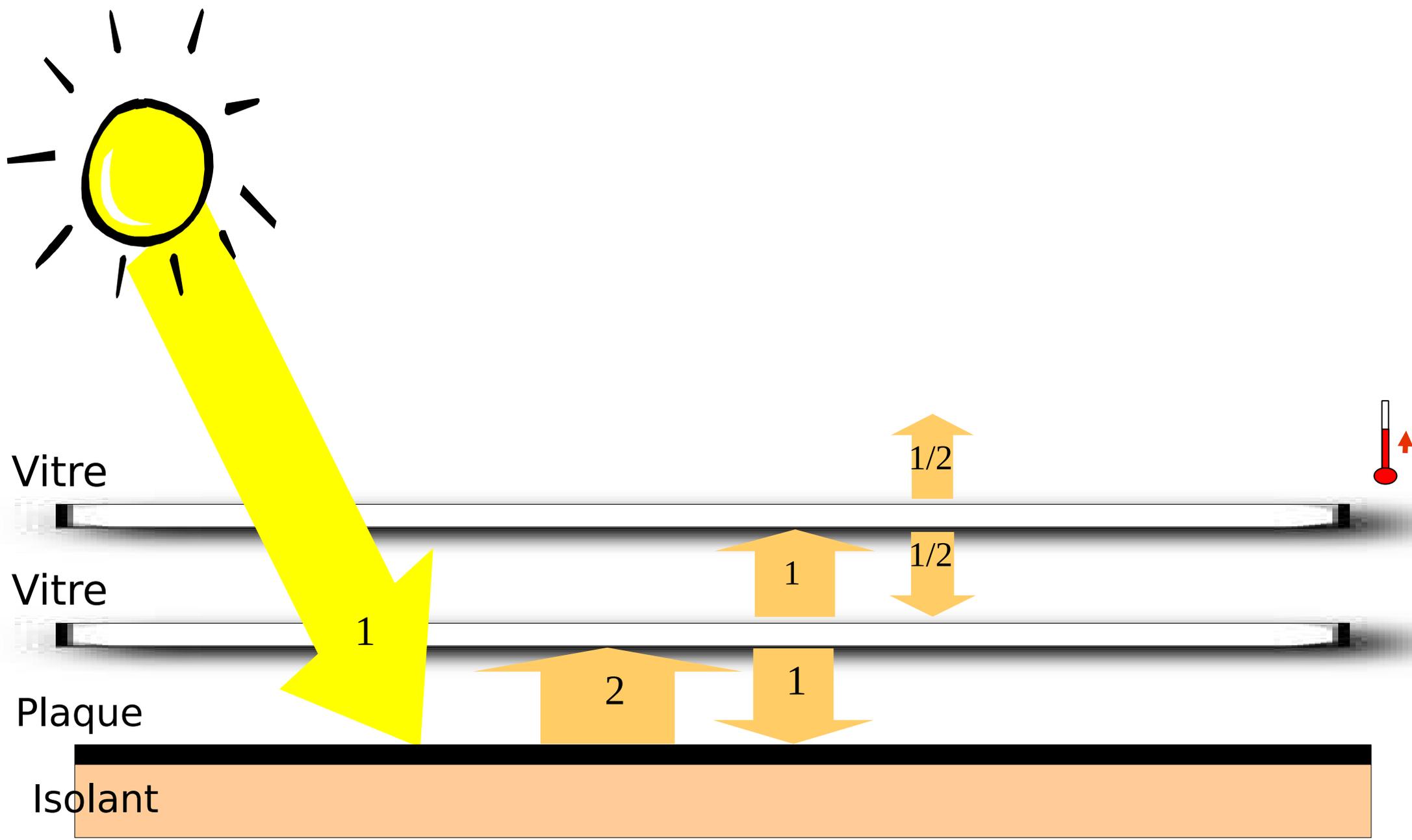
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



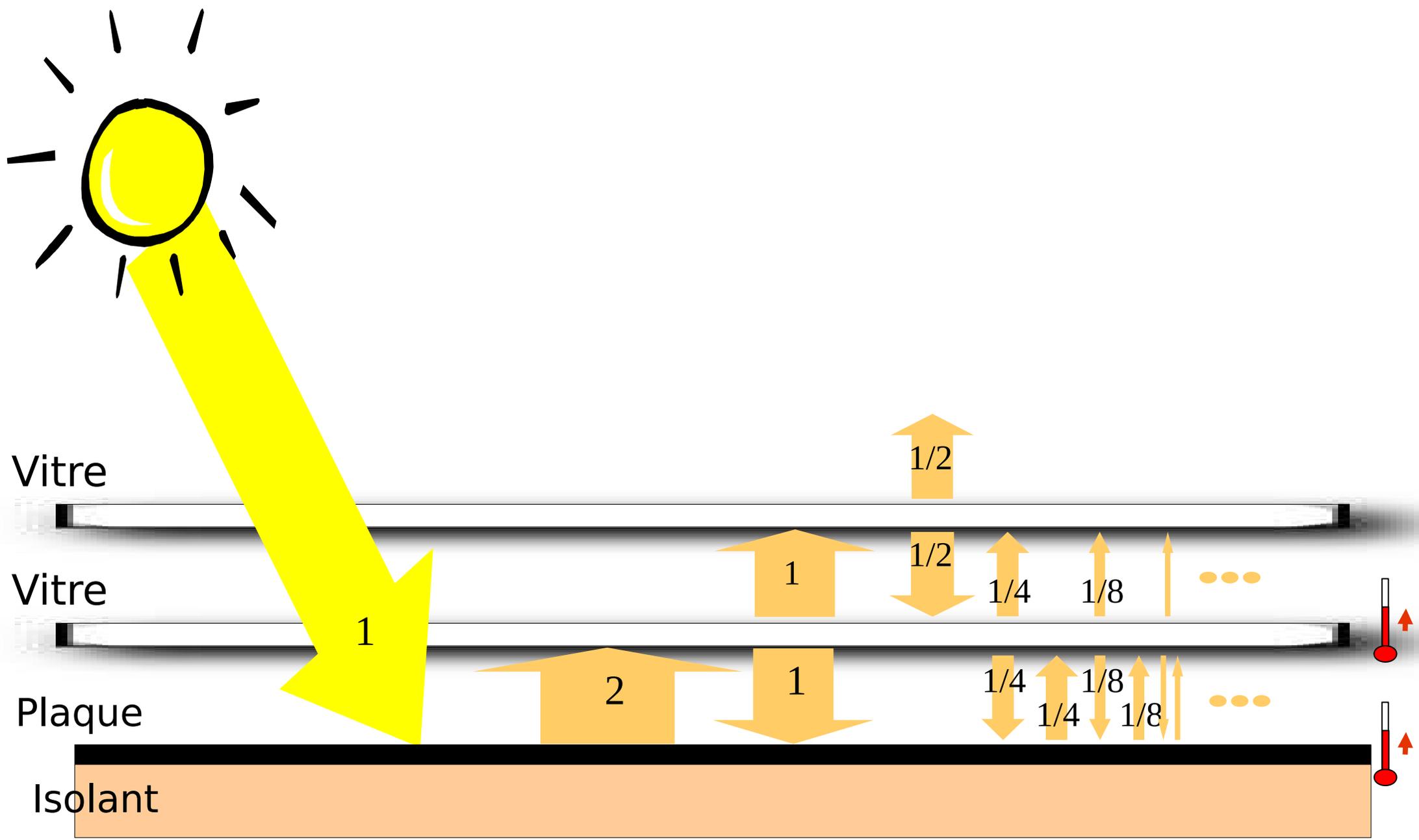
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



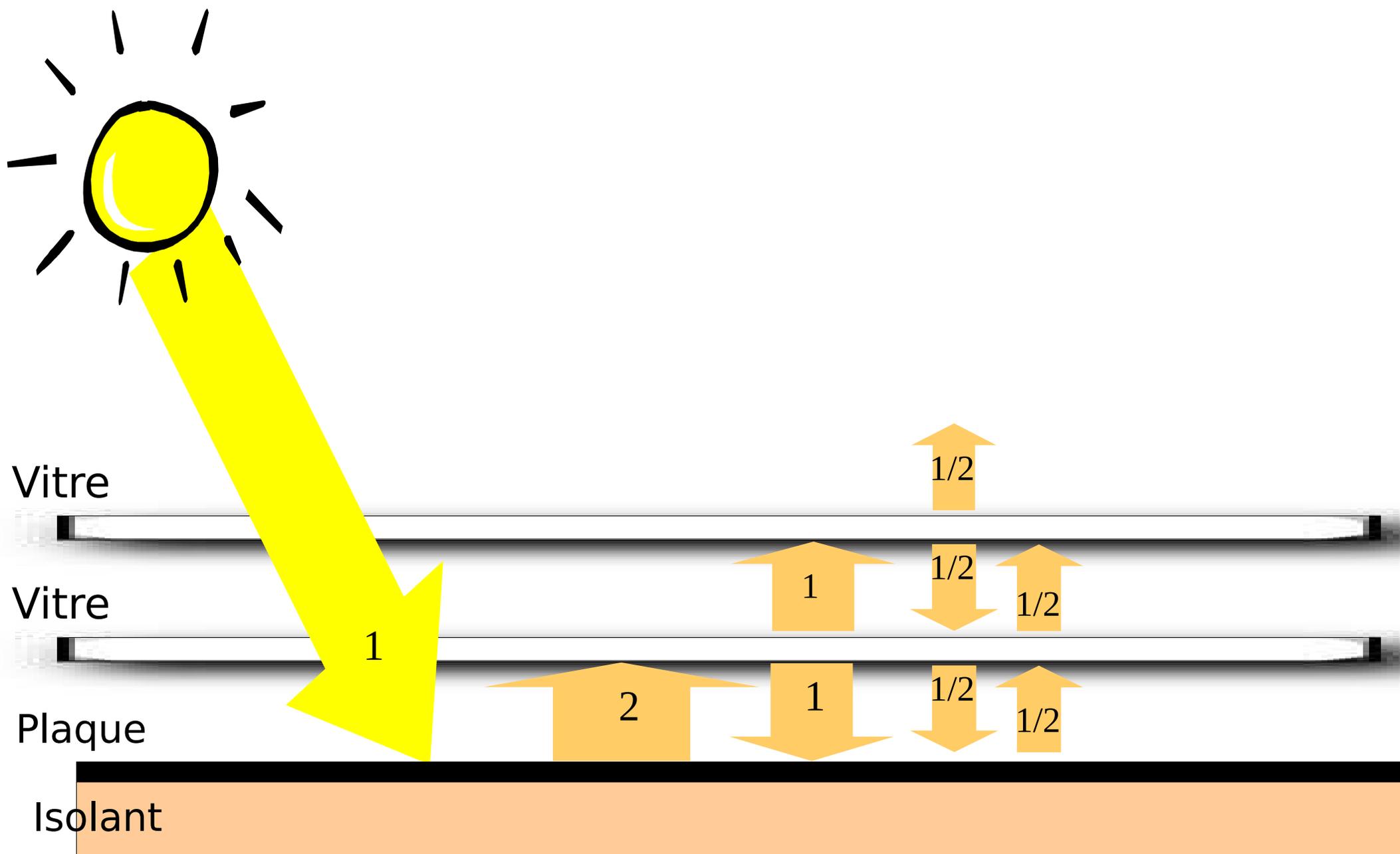
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



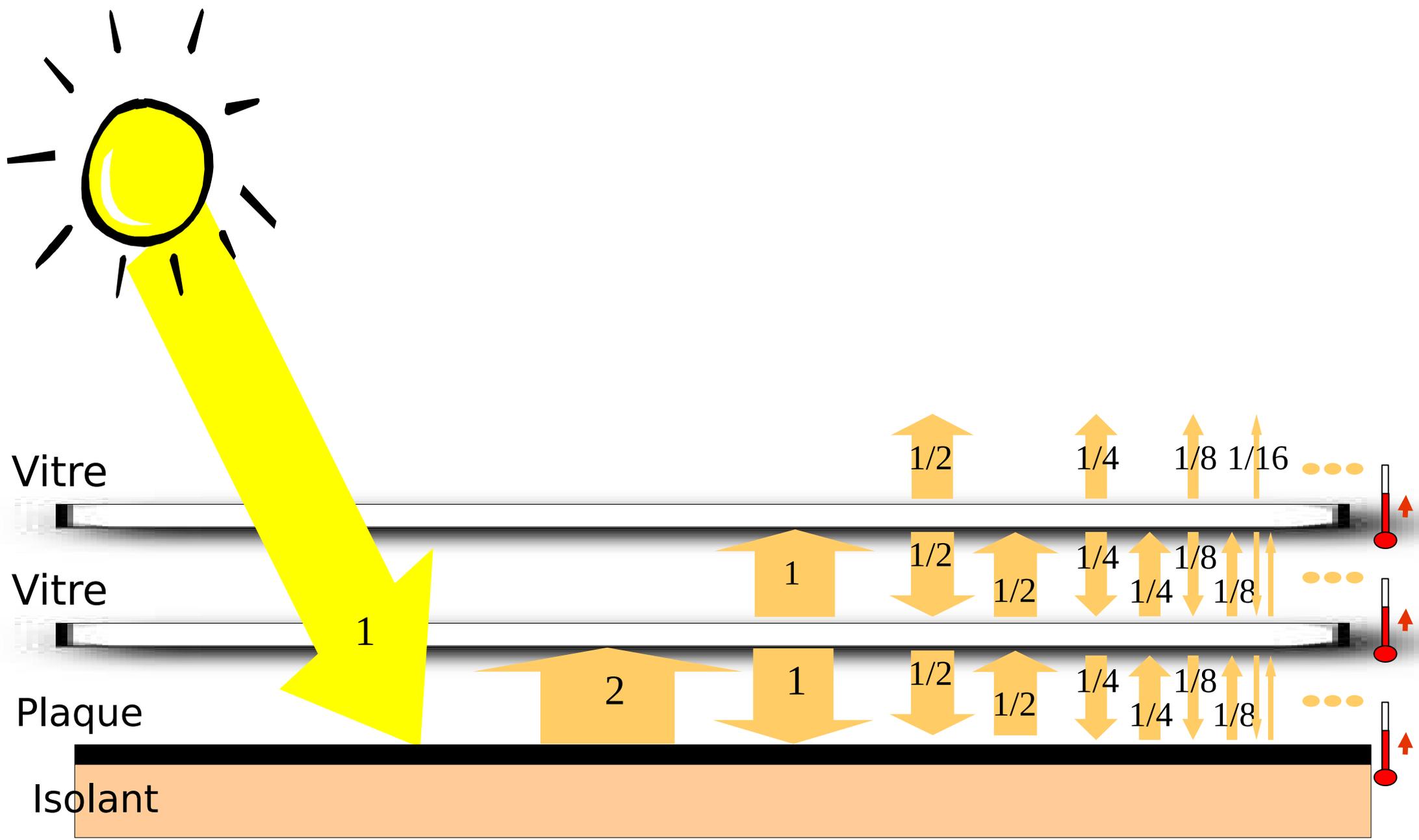
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



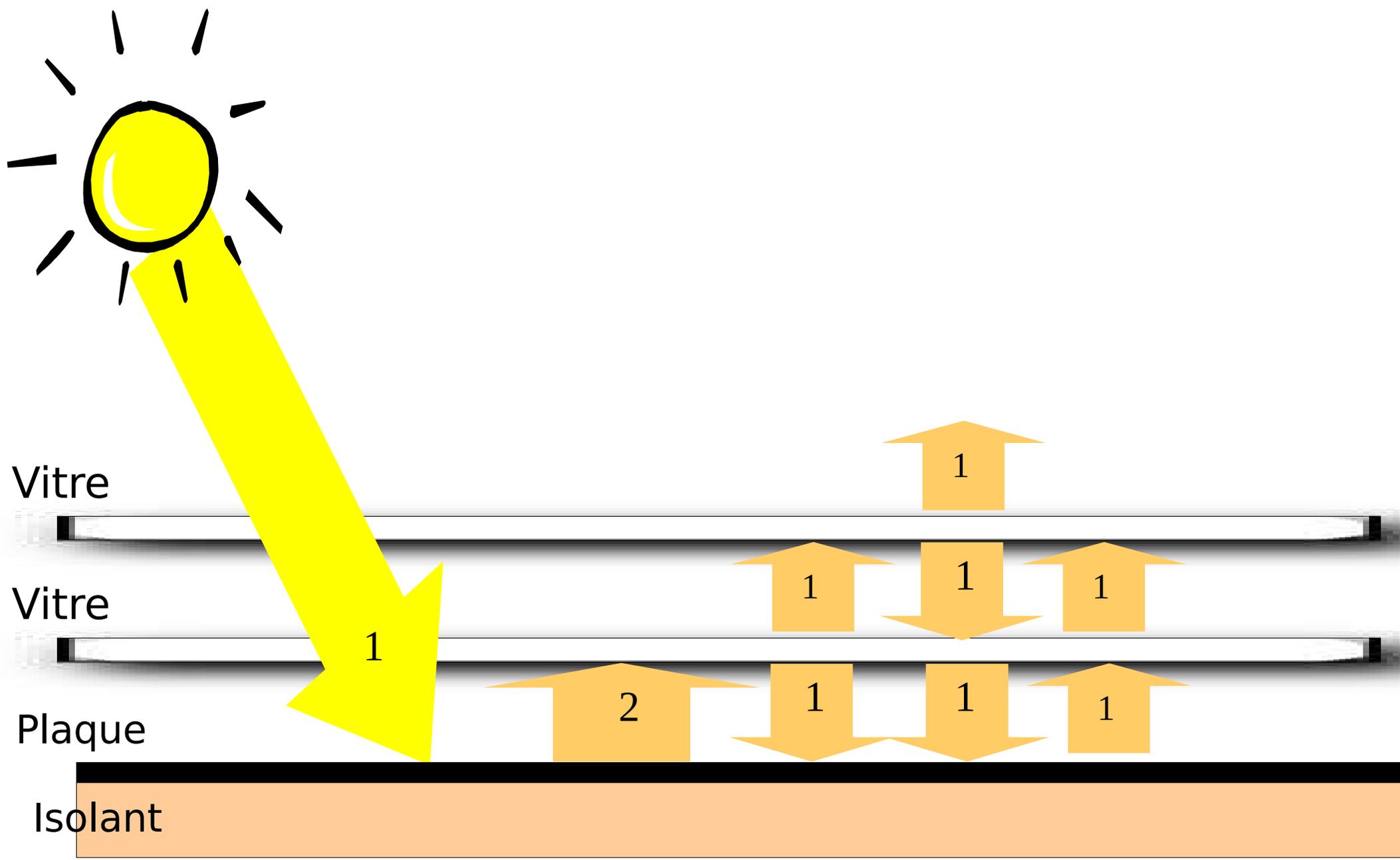
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



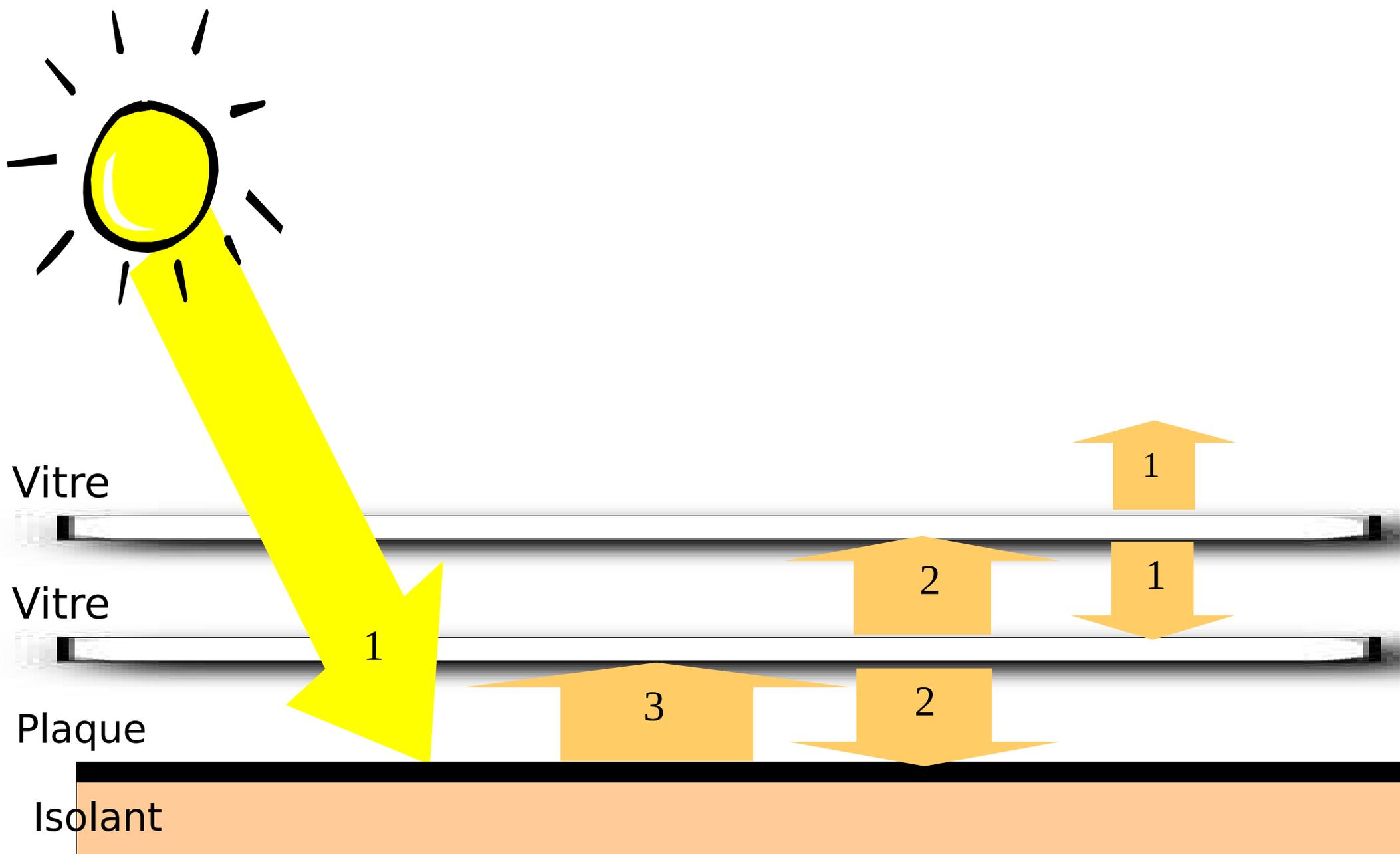
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



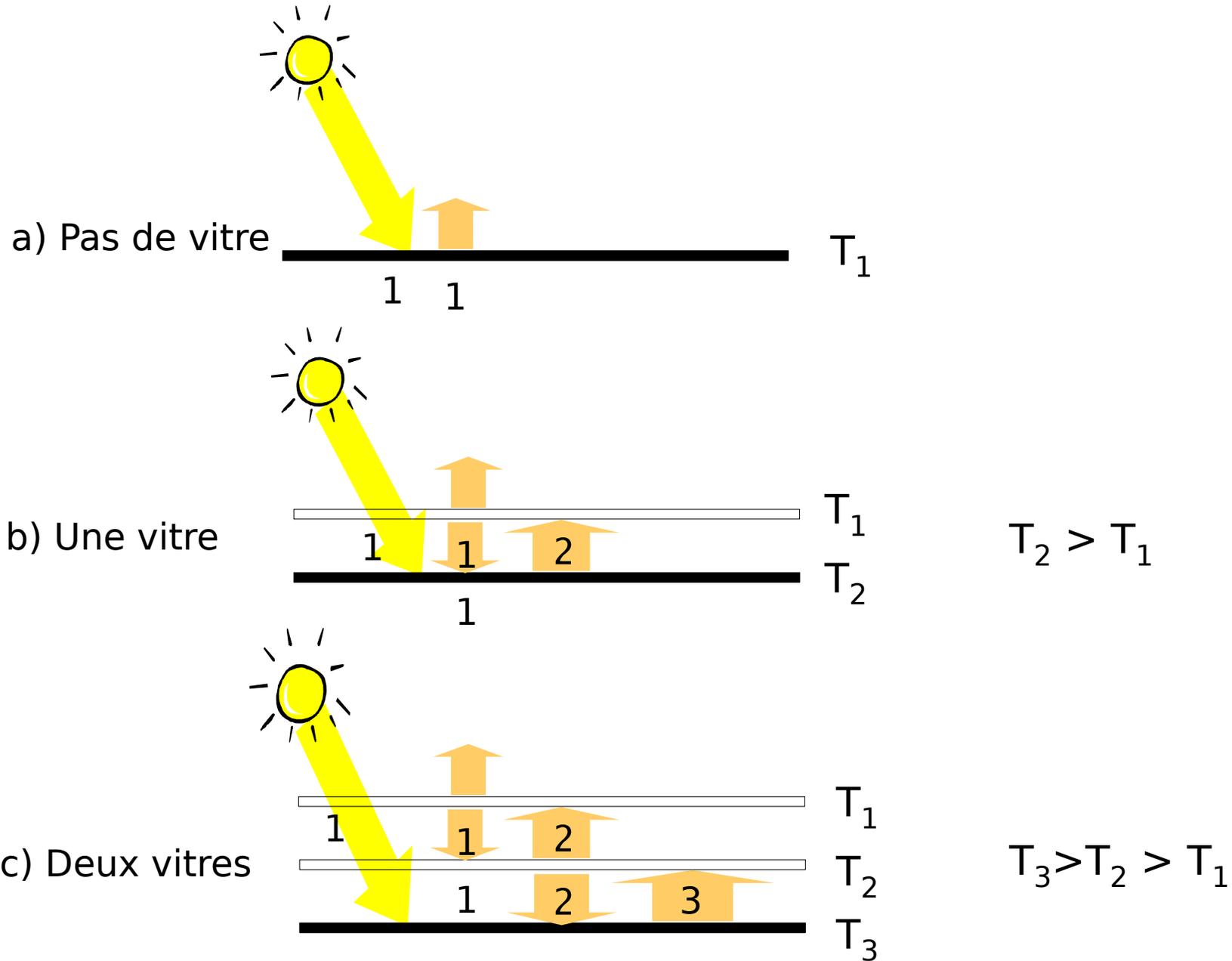
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



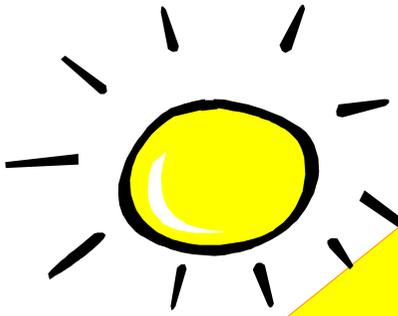
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



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



Température d'équilibre d'une planète



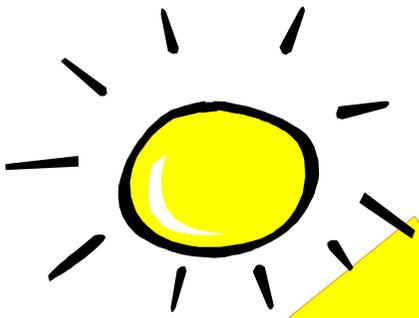
Flux solaire incident sur un **plan**: $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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



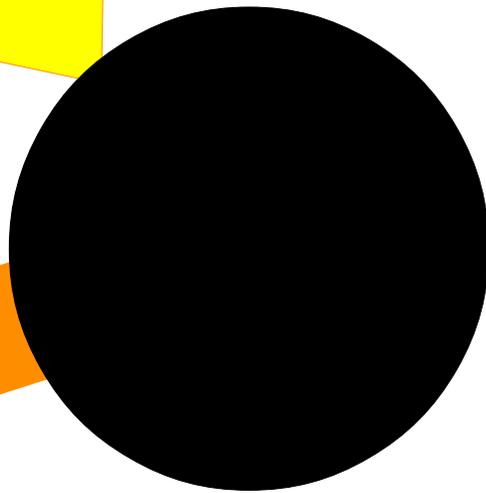
Surface noire isolée sur une face

Température d'équilibre d'une planète



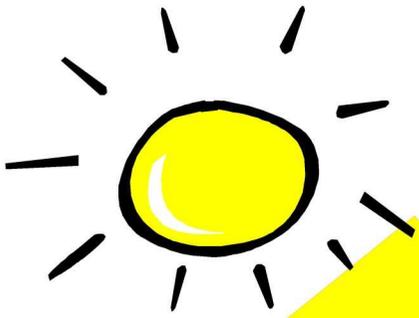
Flux solaire incident sur un **plan**: $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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 : $F_a = 240 \text{ W.m}^{-2}$

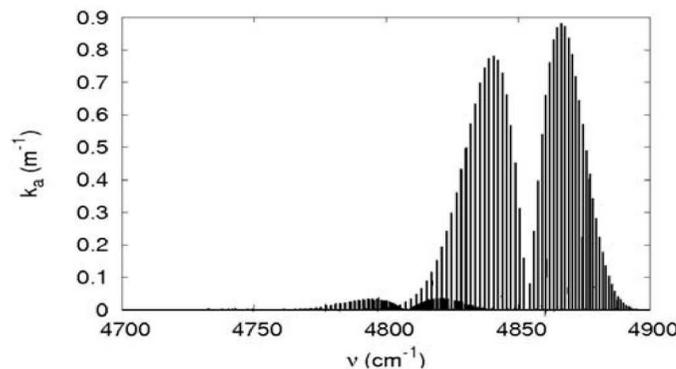
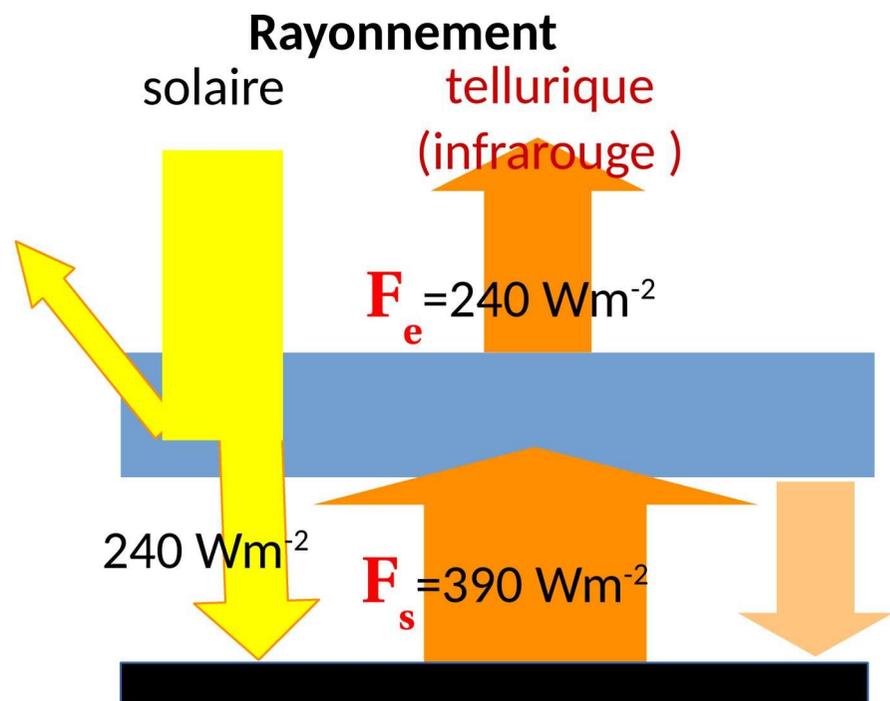
1/3 du flux réfléchi



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

La température moyenne de la surface de la Terre est de 15°C environ. Pourquoi cette différence?

Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives



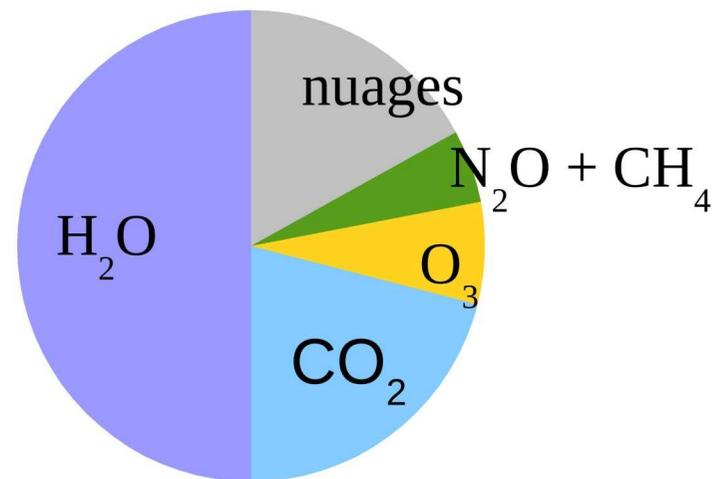
Profils atmosphériques

Calcul des flux radiatifs \mathbf{F} et de l'effet de serre

$$\mathbf{G} = \mathbf{F}_s - \mathbf{F}_e$$

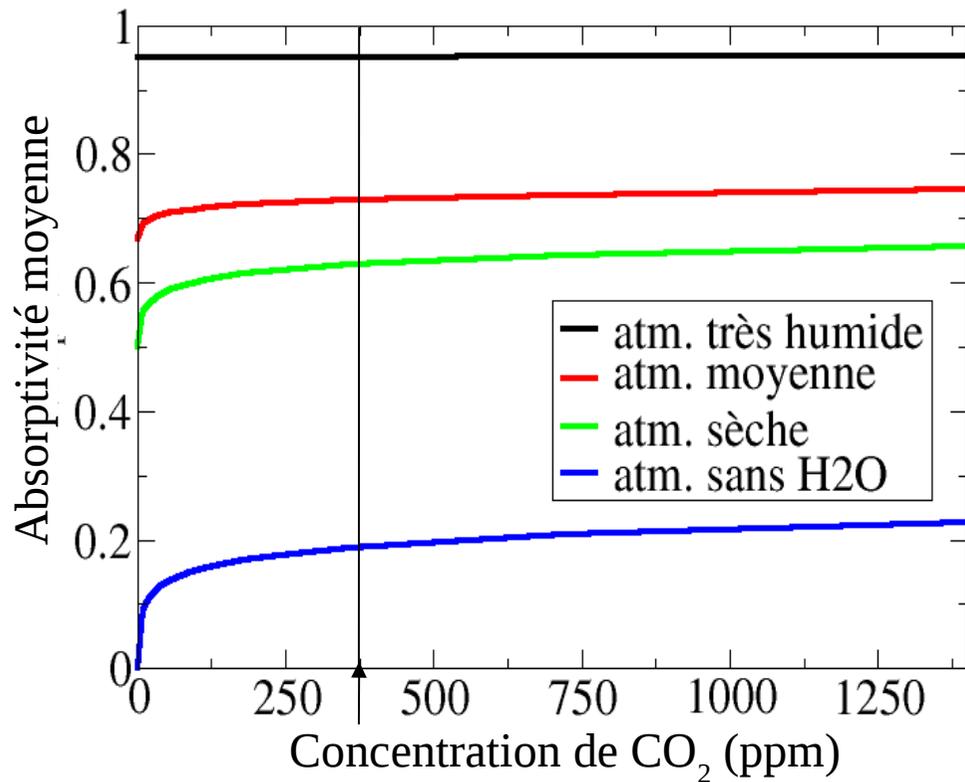
Effet de serre sur Terre : (W.m⁻²) (%)

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

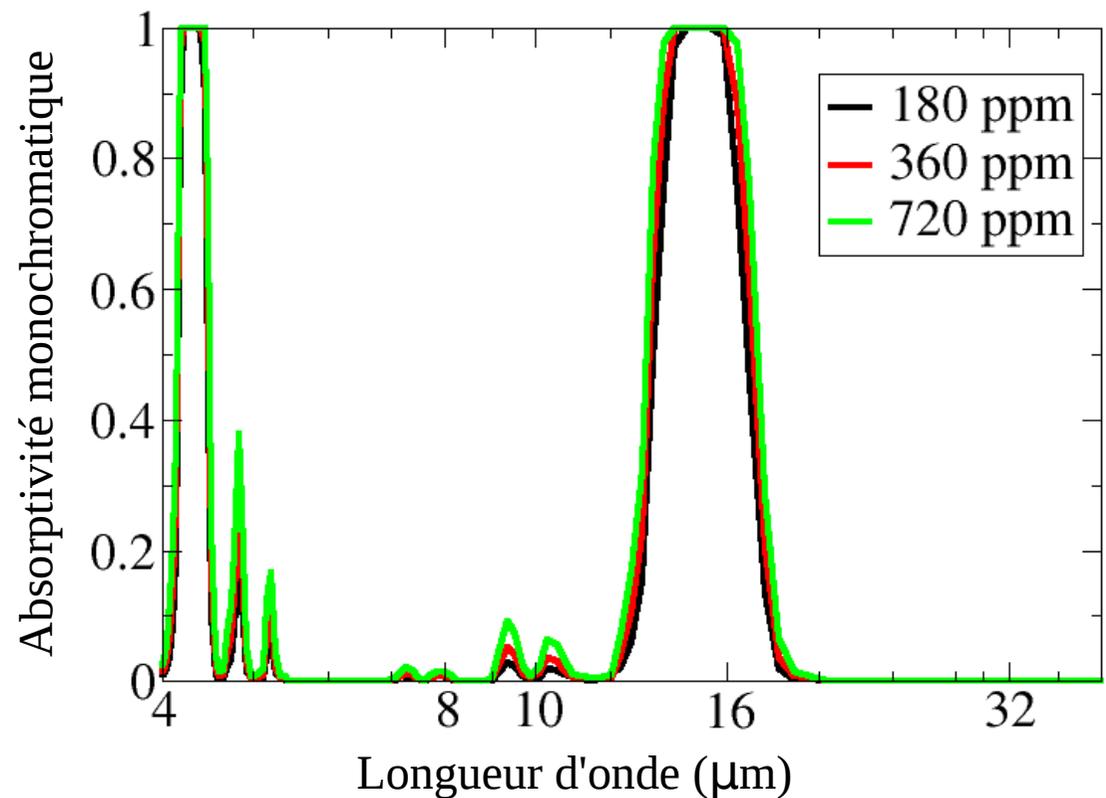


Effet de saturation

Absorptivité de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O

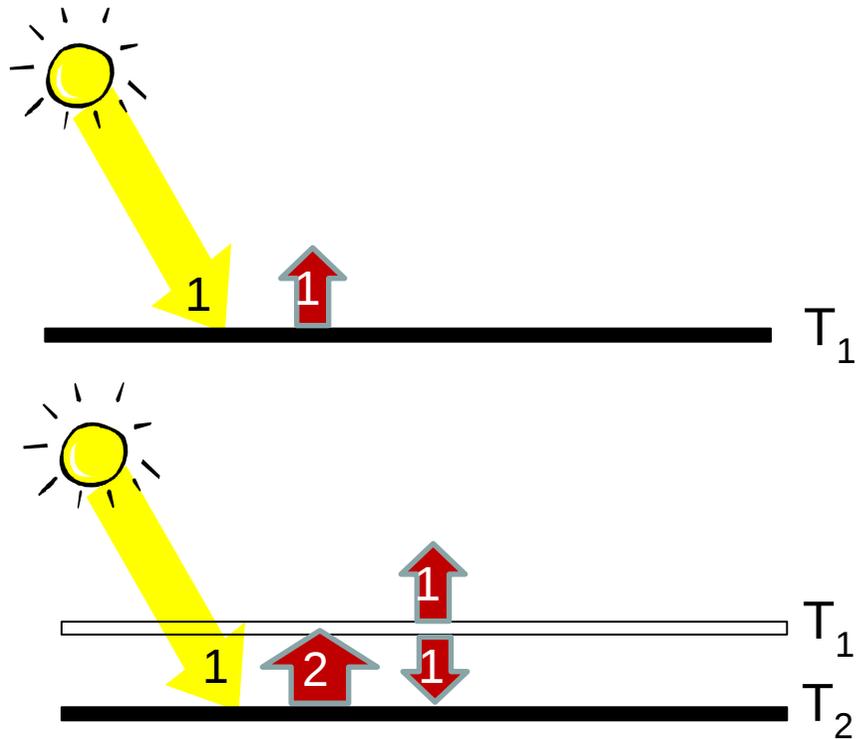


Absorptivité monochromatique de l'atmosphère due au seul CO_2 , en fonction de la longueur d'onde, pour différente concentration de CO_2

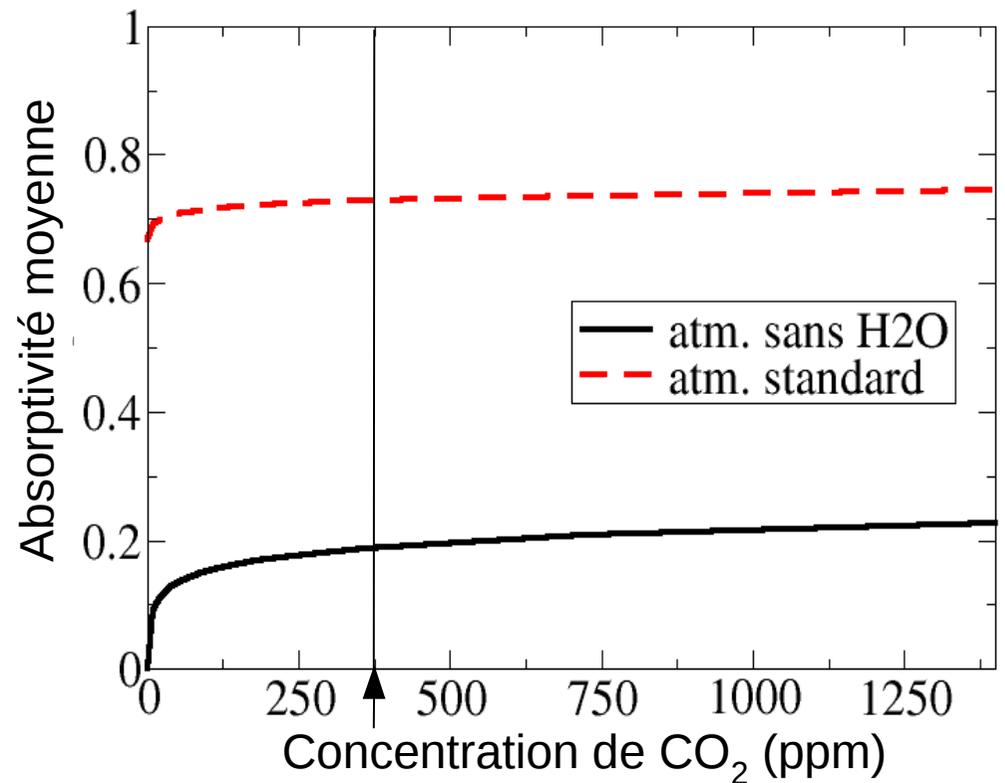


Accroissement de CO₂ et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



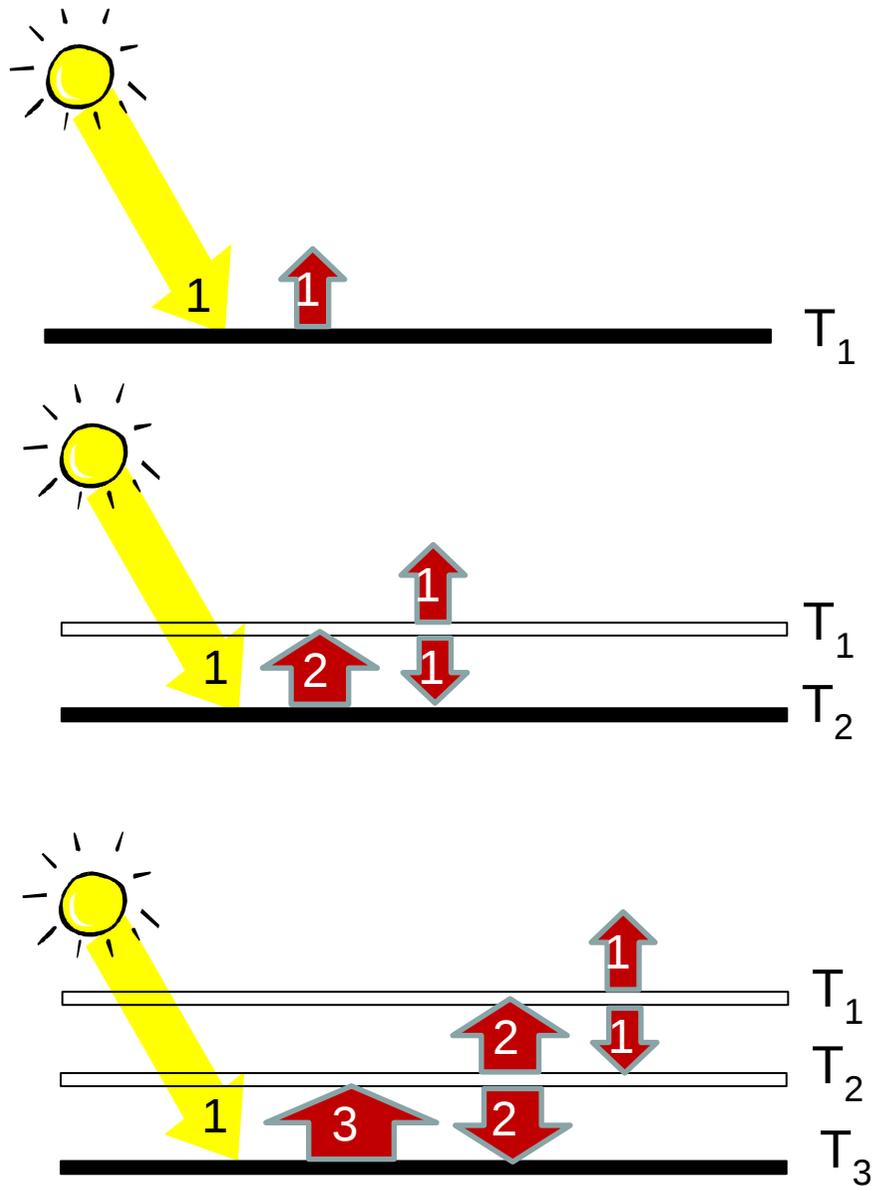
Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO₂, pour différentes valeurs de H₂O



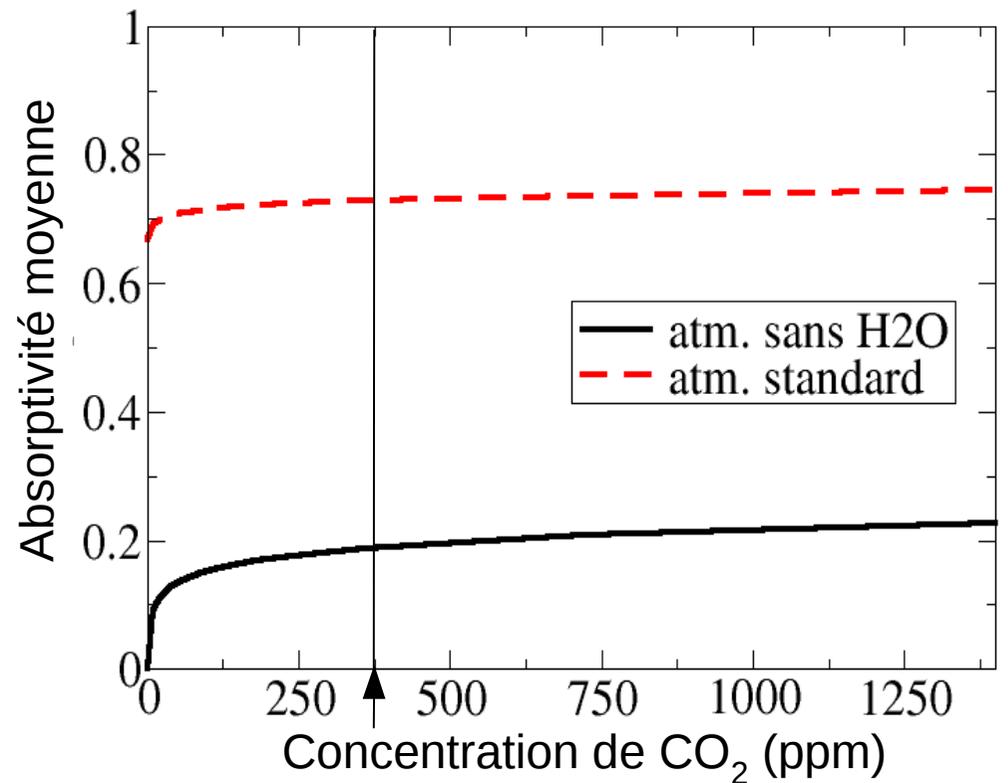
A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO₂?

Accroissement de CO₂ et effet de serre

L'analogie de l'effet de serre



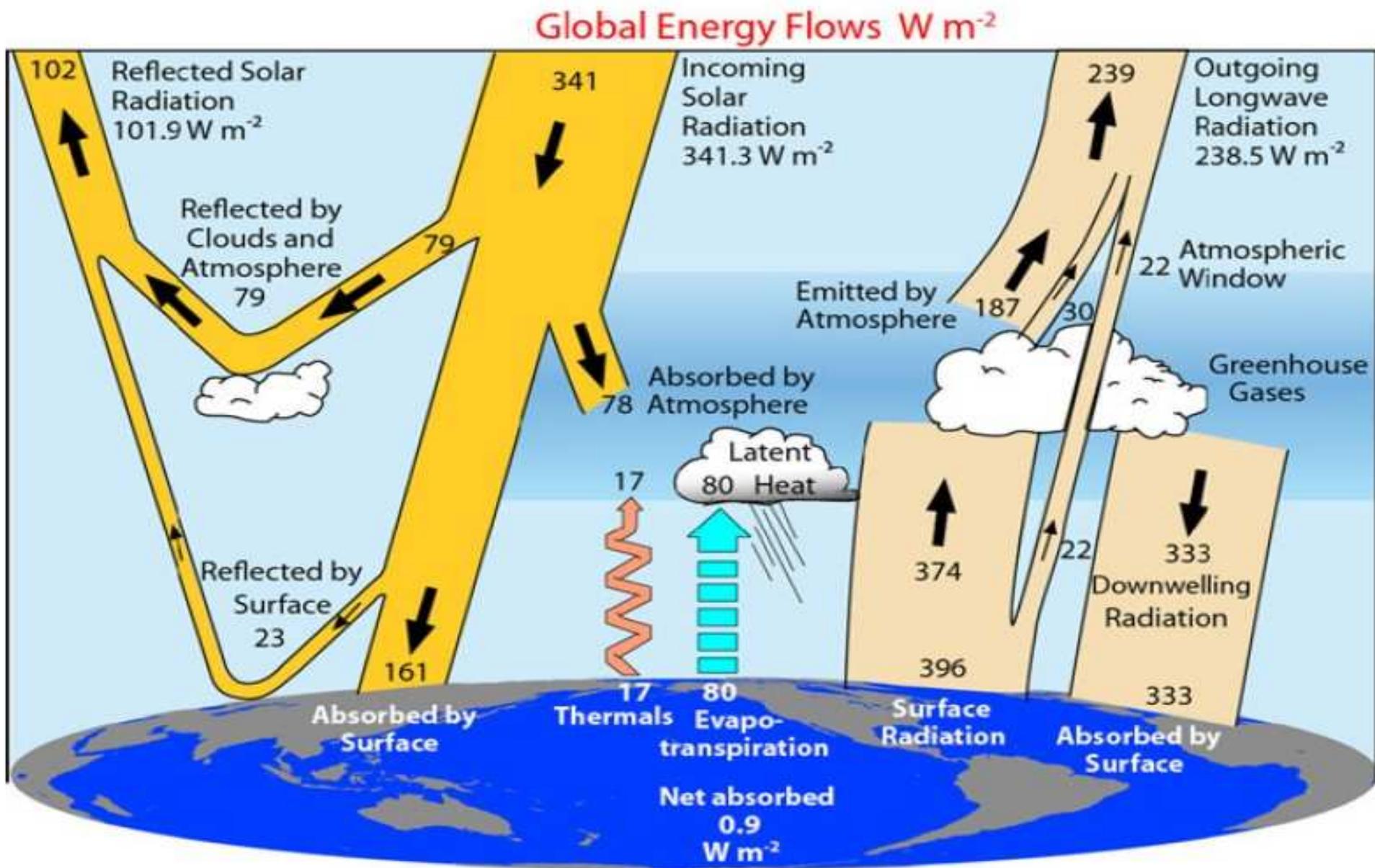
Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO₂, pour différentes valeurs de H₂O



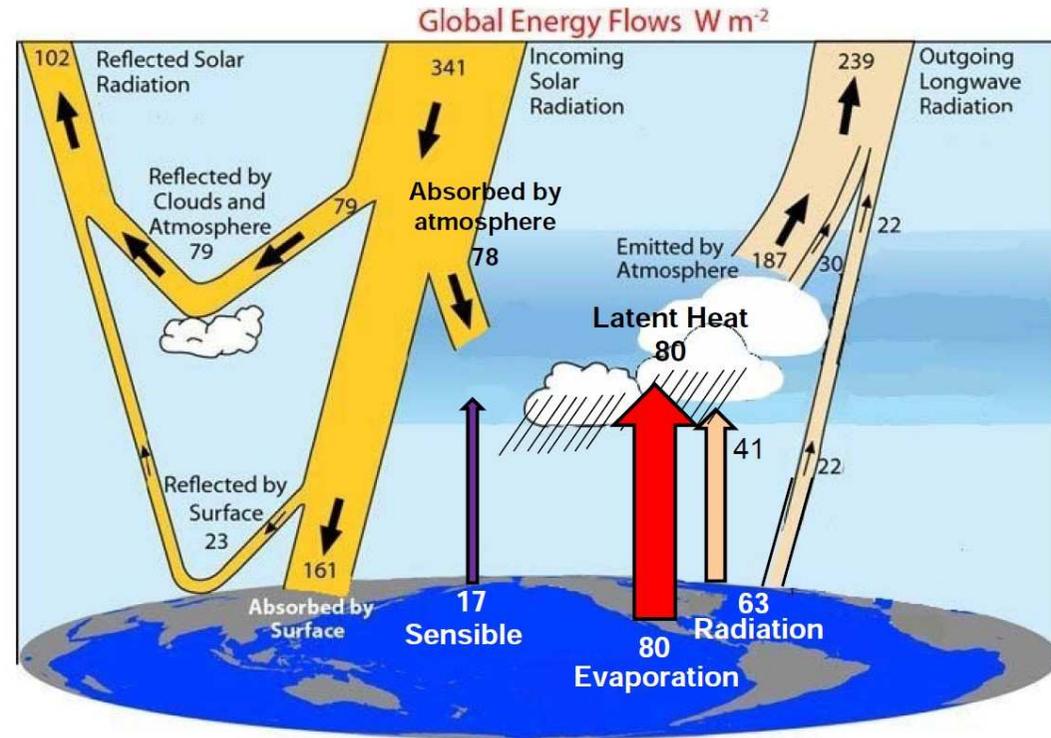
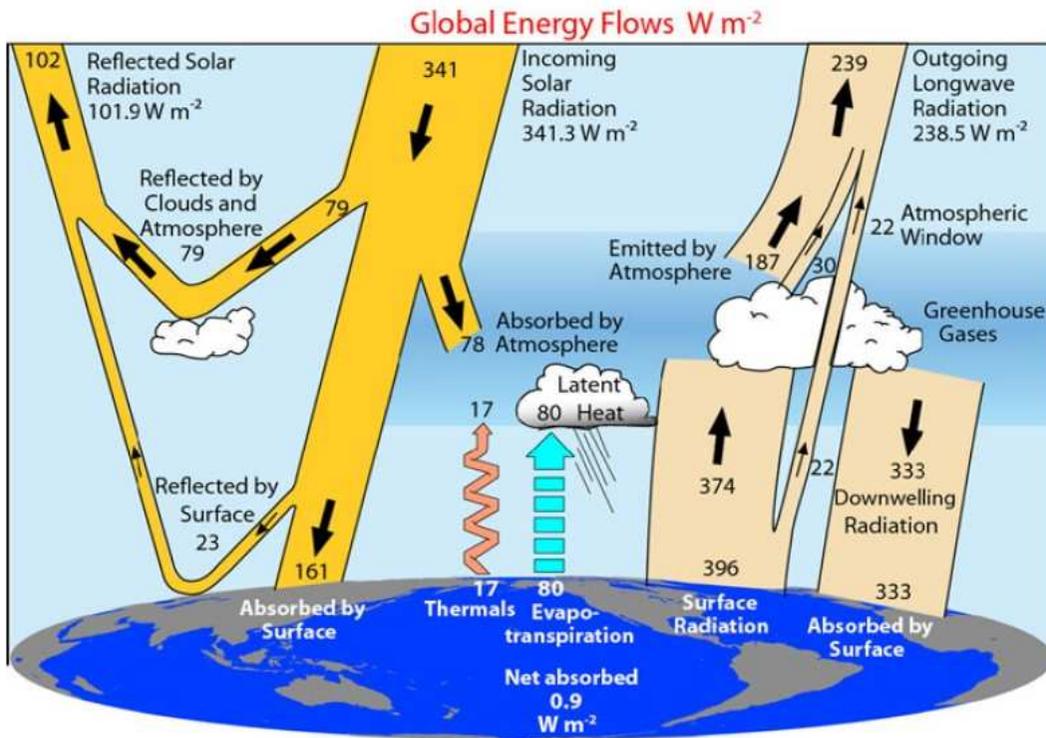
A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO₂?
NON!

(Dufresne Treiner 2012)

Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



[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 CO₂ 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



Merci de votre attention