

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
www.lmd.jussieu.fr/~jldufres

Température d'équilibre d'une planète

1) L'émission de rayonnement

2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

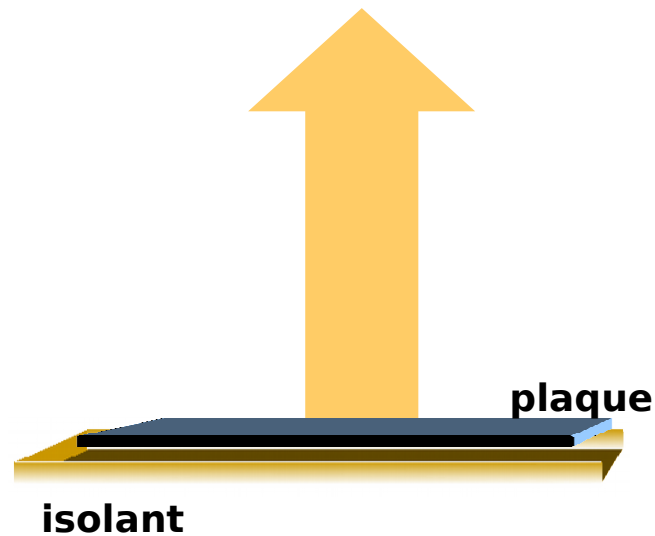
3) L'équilibre énergétique

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

5) L'effet de serre

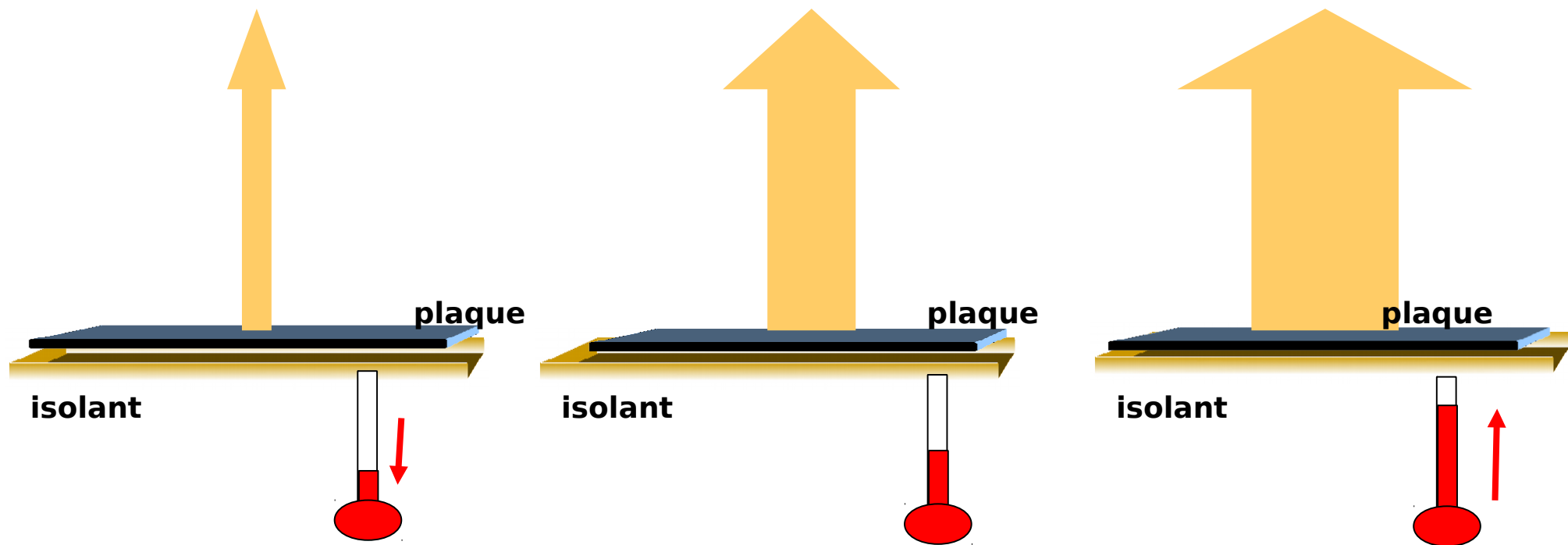
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum?

1) L'émission de rayonnement



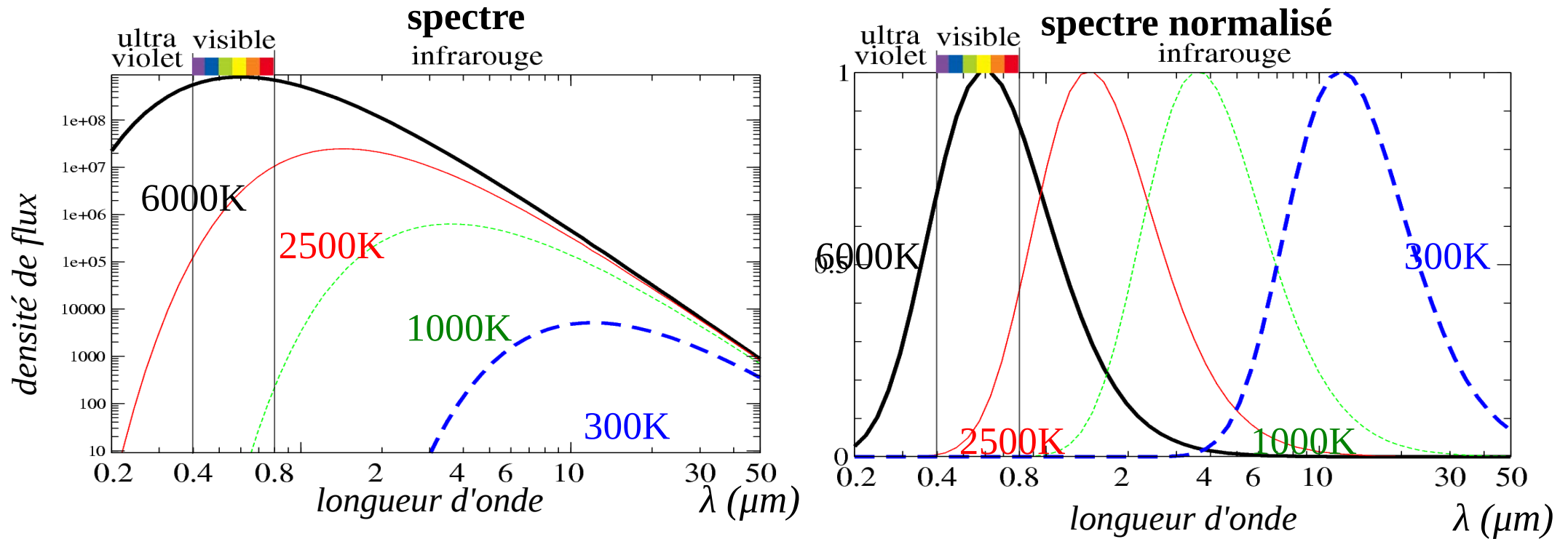
a) Tout corps (ici une plaque posée sur un isolant thermique) émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie

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°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°C), notre œil voit une partie du rayonnement émis par cet objet :

C'est le rayonnement visible



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

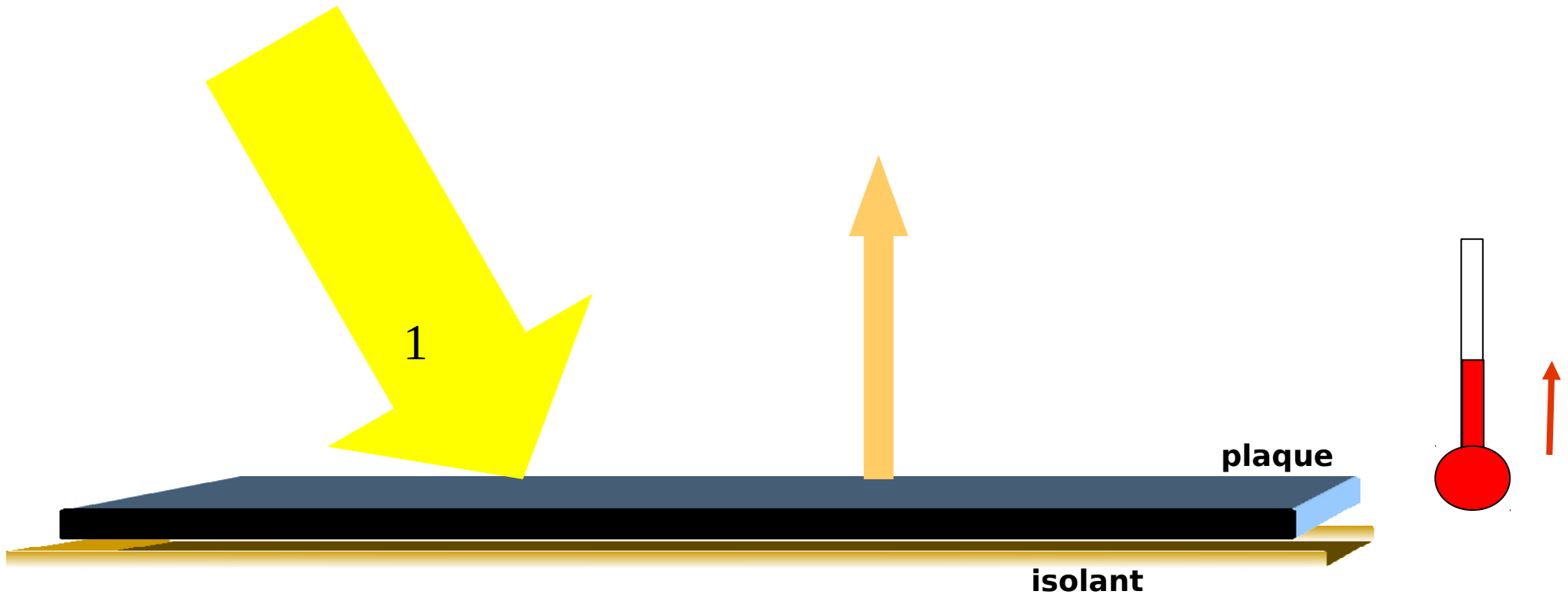


Soleil : $T \approx 6000\text{ K}$



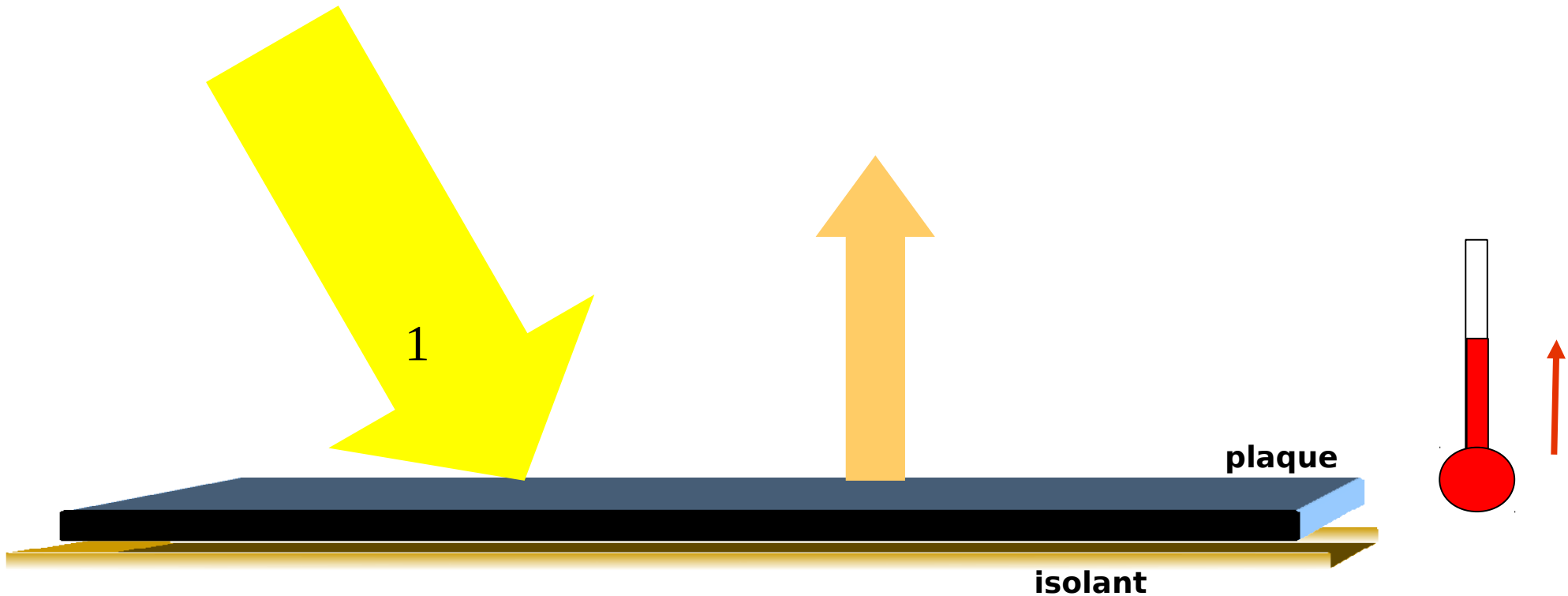
Lave de volcan : $T \approx 1000\text{ K}$

3) L'équilibre énergétique



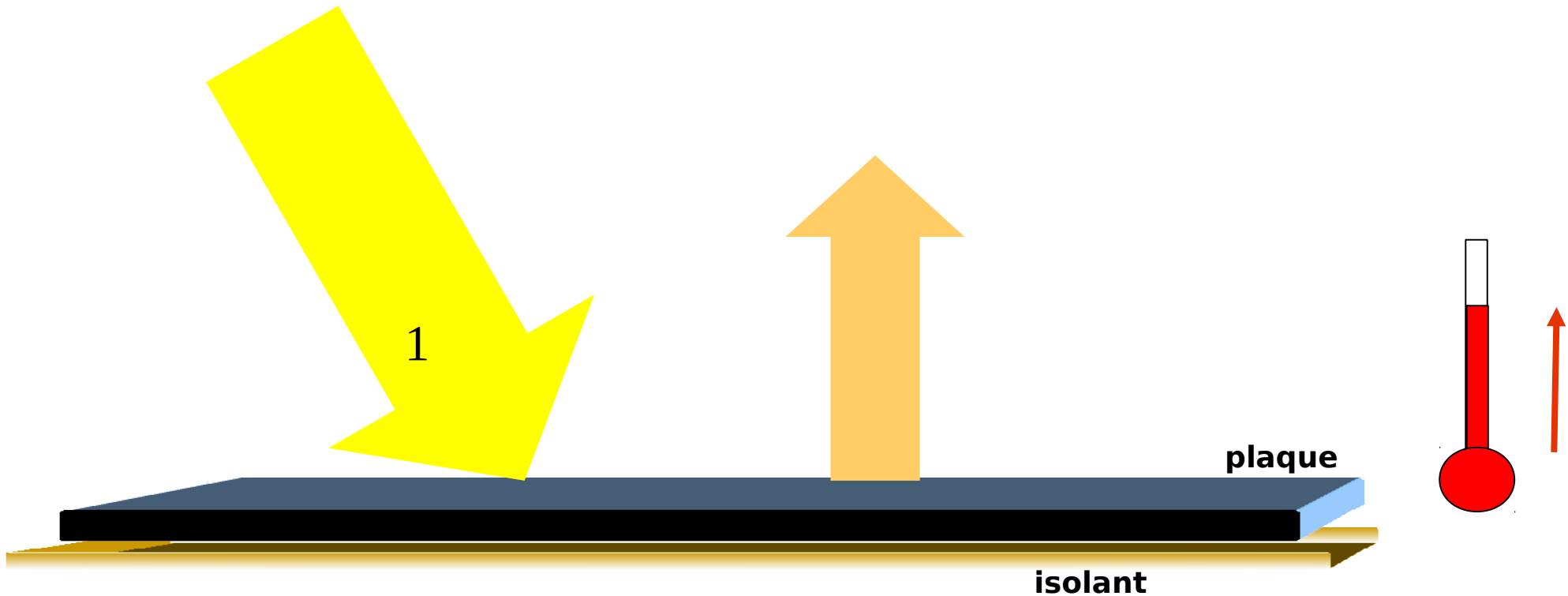
- Si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.

3) L'équilibre énergétique



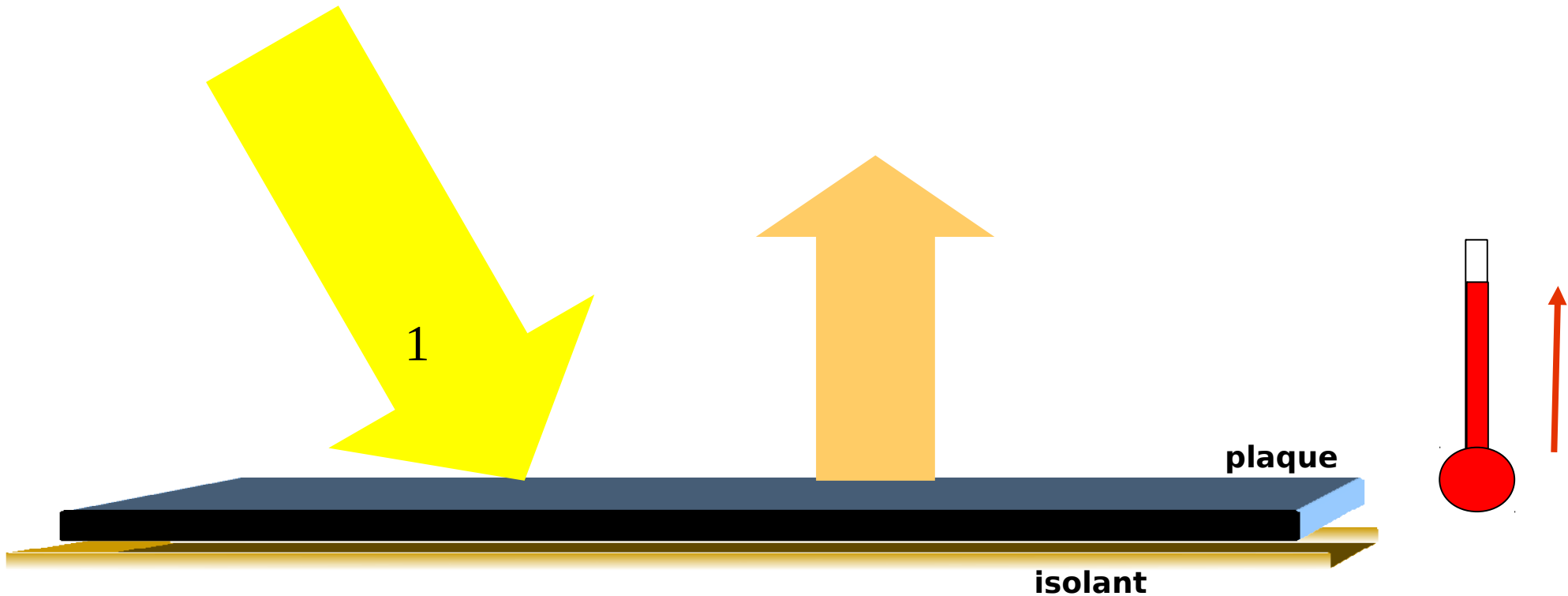
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

3) L'équilibre énergétique



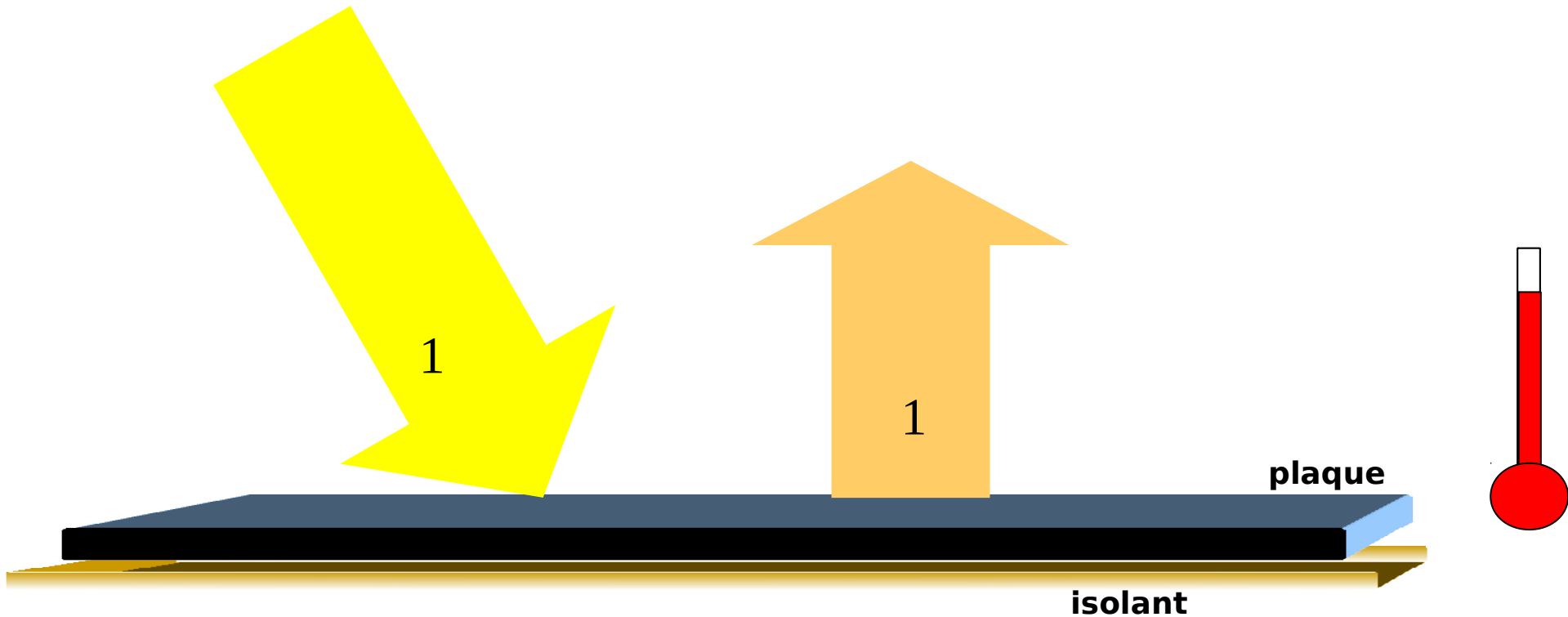
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

3) L'équilibre énergétique



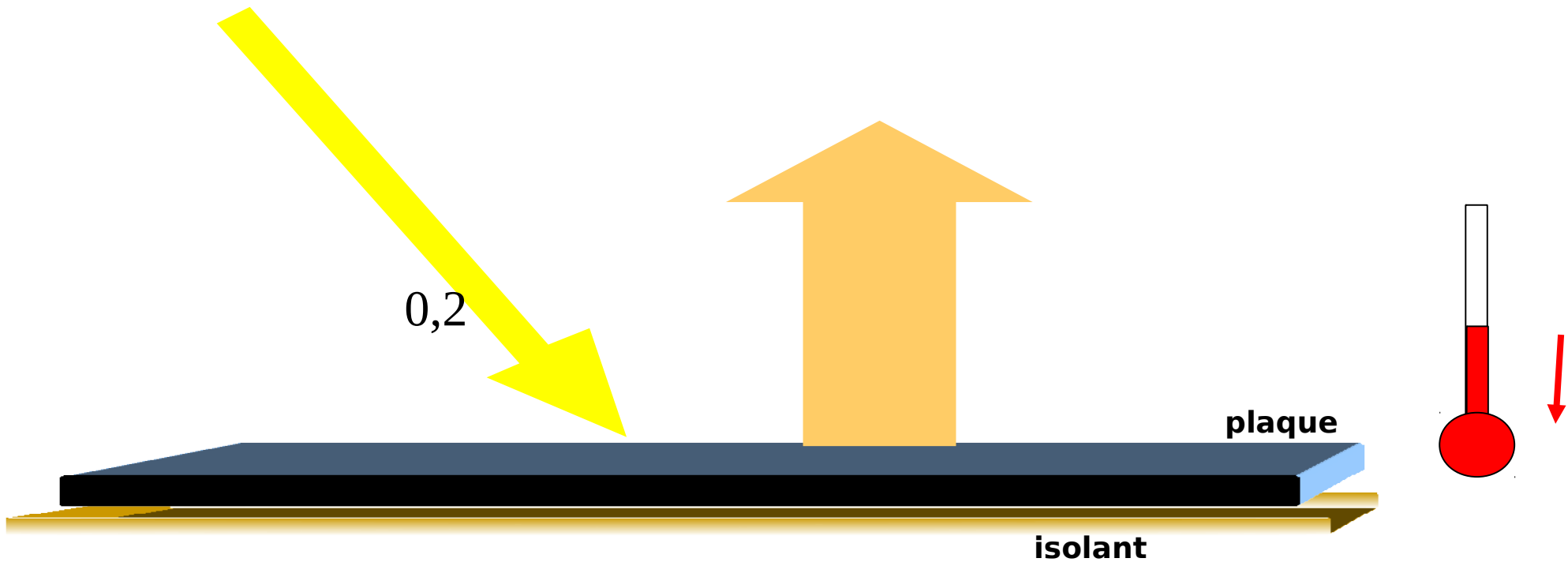
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

3) L'équilibre énergétique



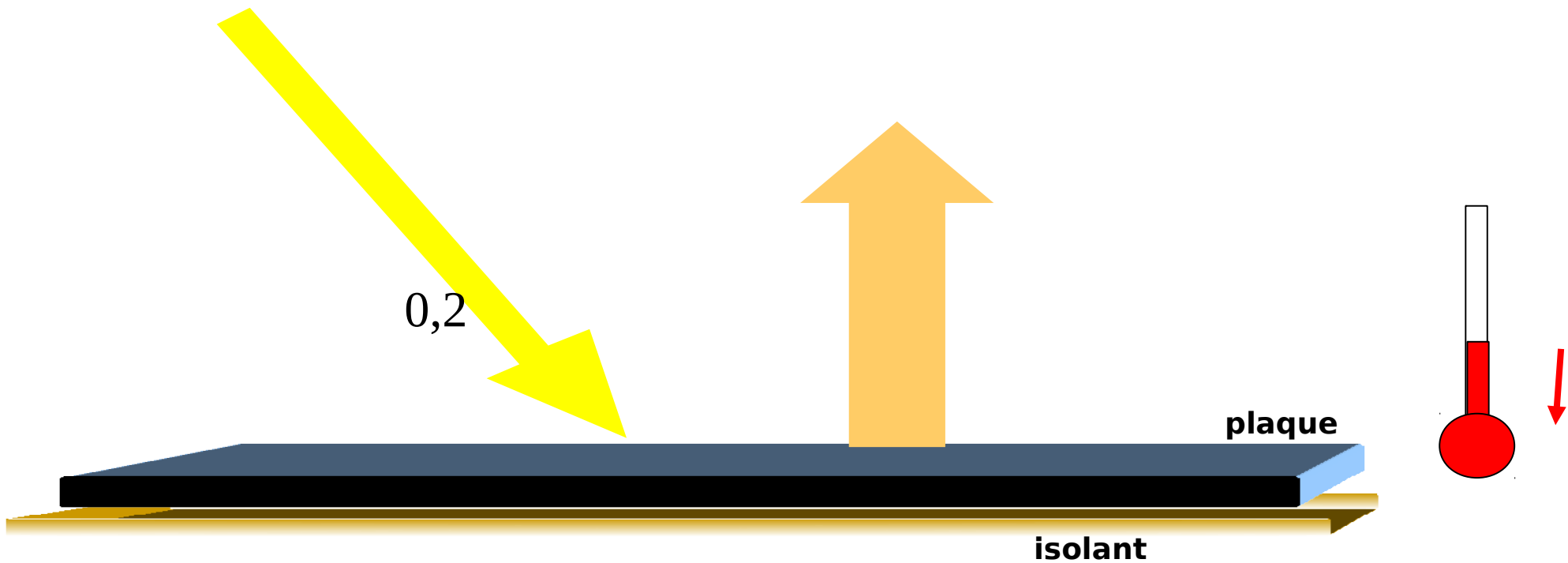
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

3) L'équilibre énergétique



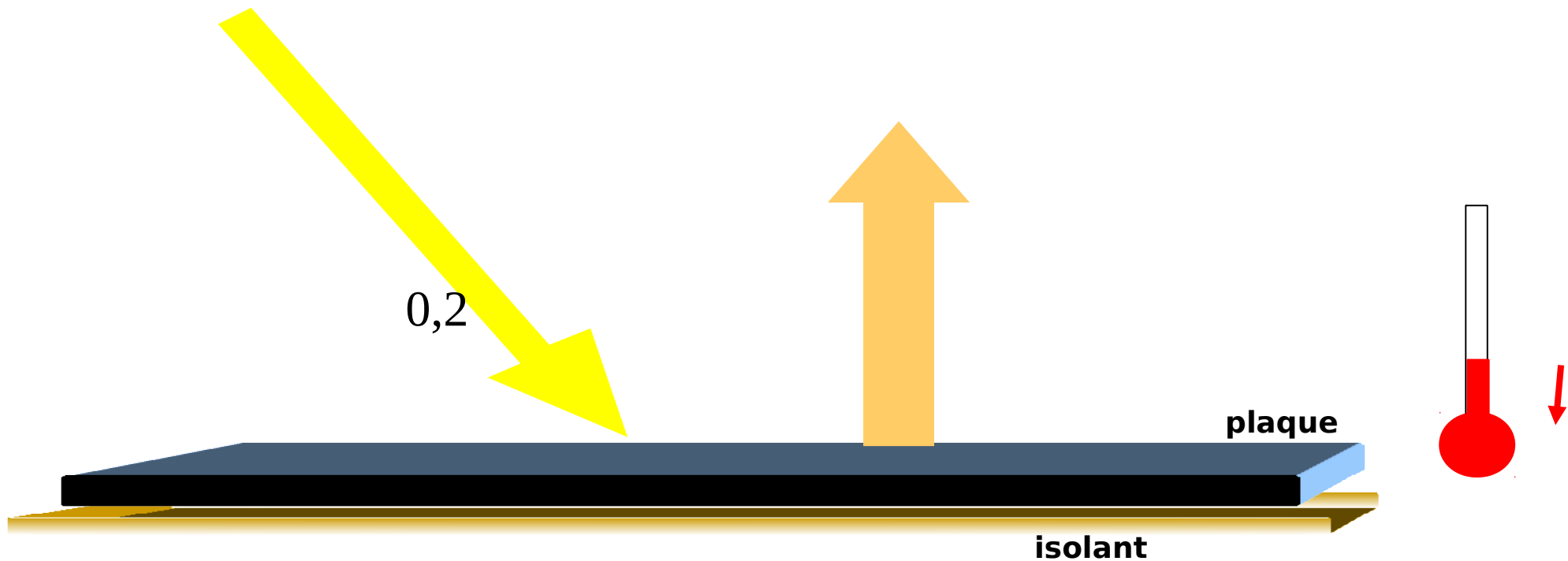
- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

3) L'équilibre énergétique



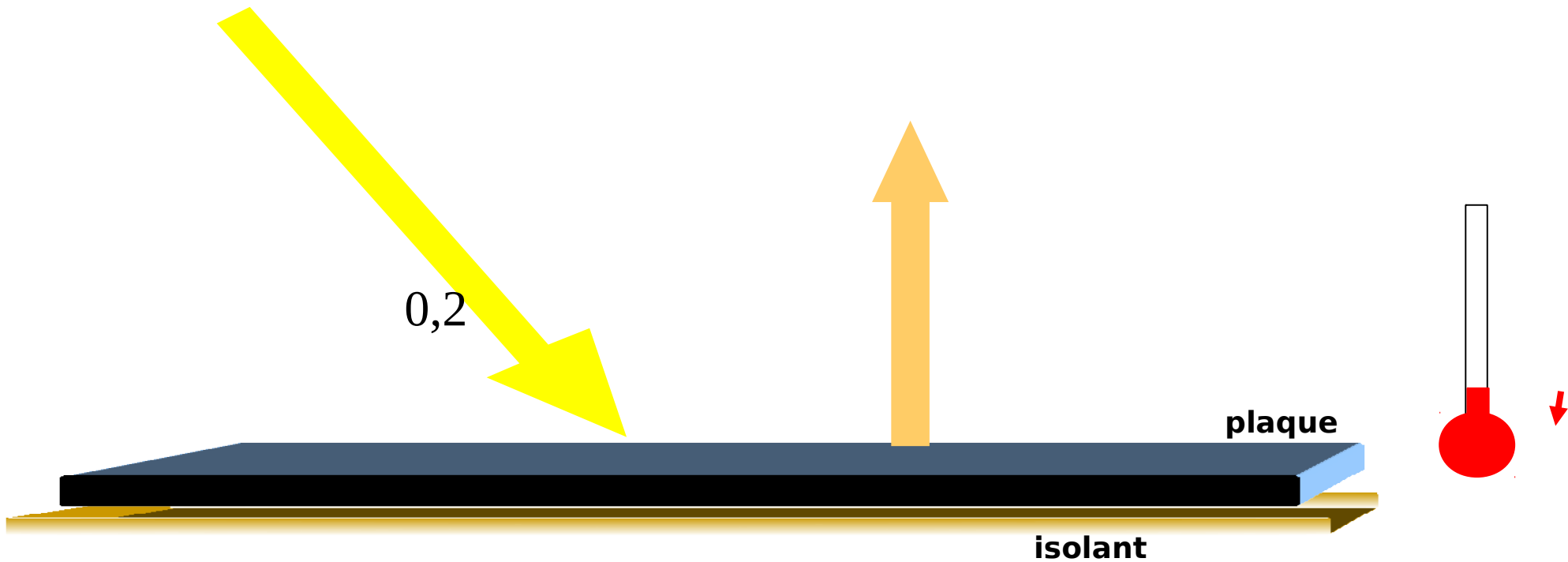
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

3) L'équilibre énergétique



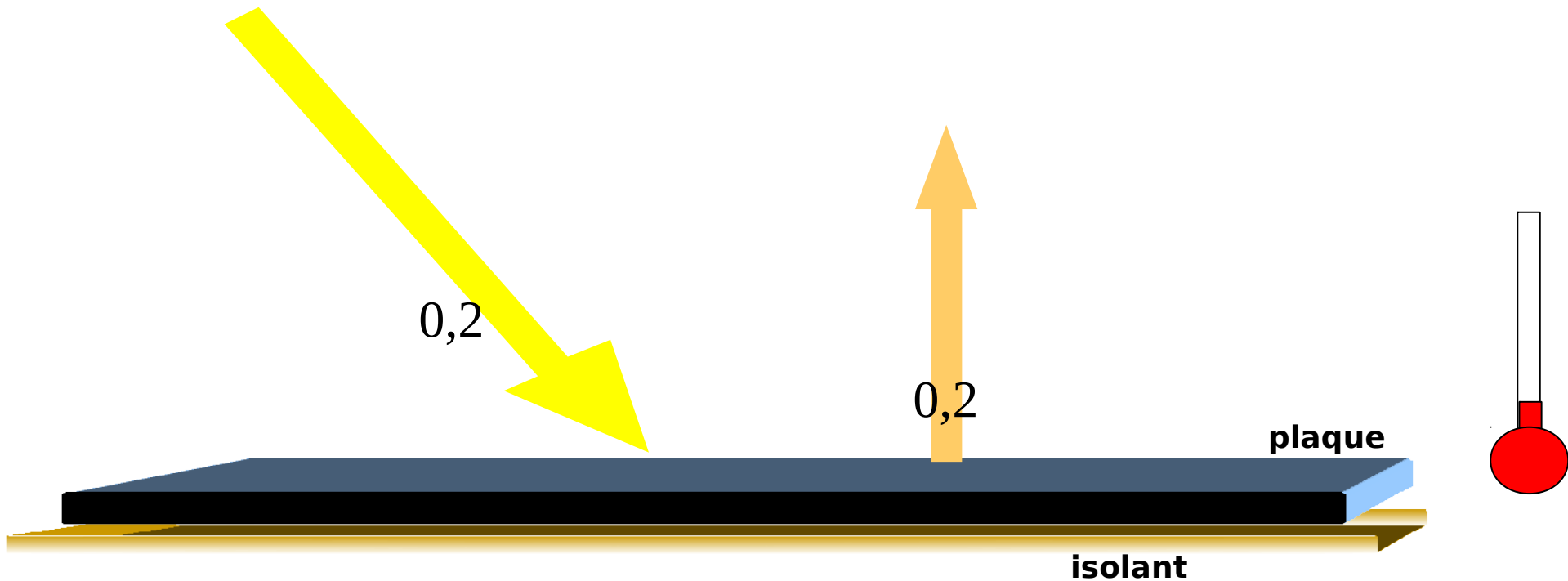
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

3) L'équilibre énergétique



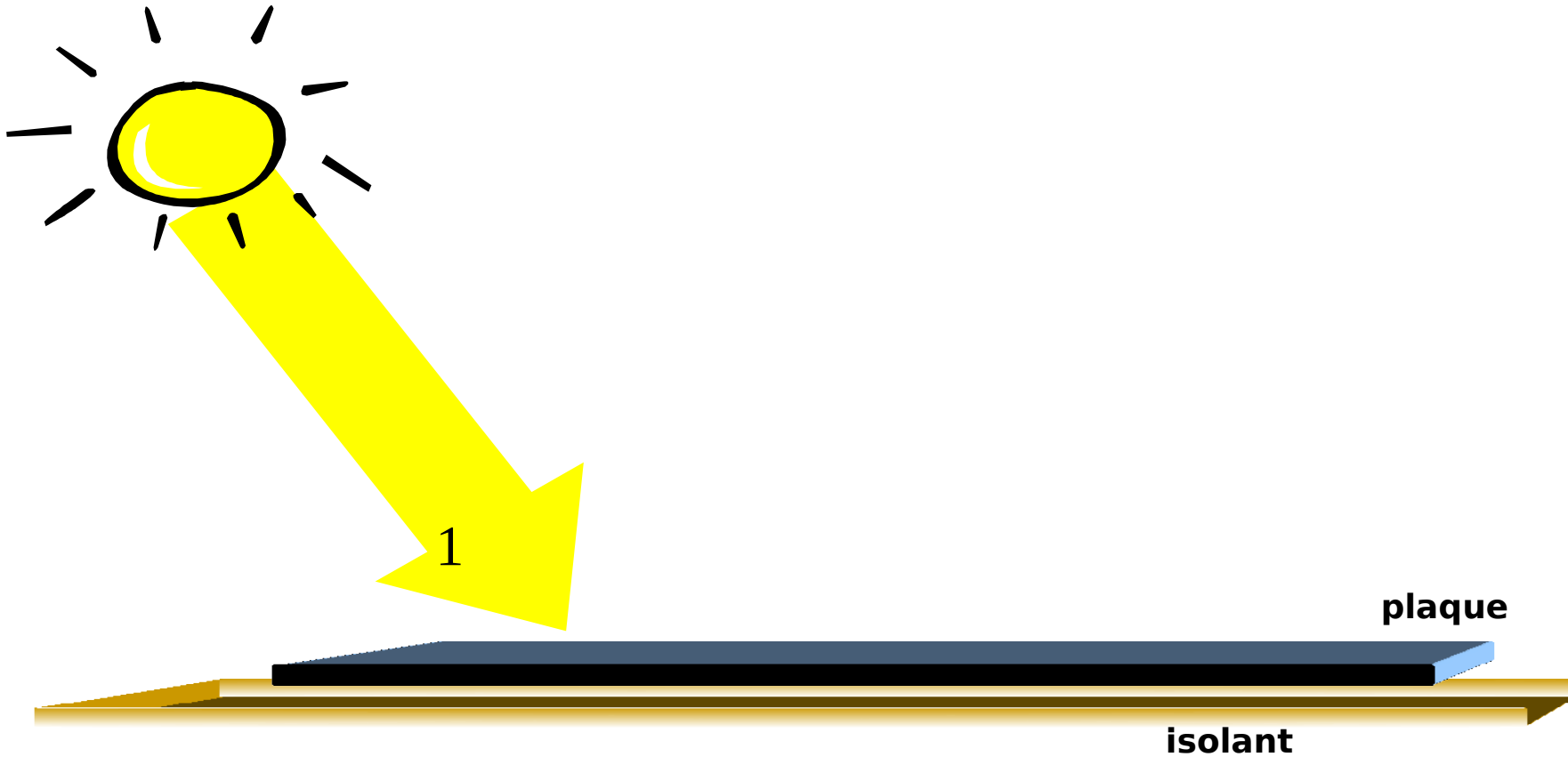
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

3) L'équilibre énergétique



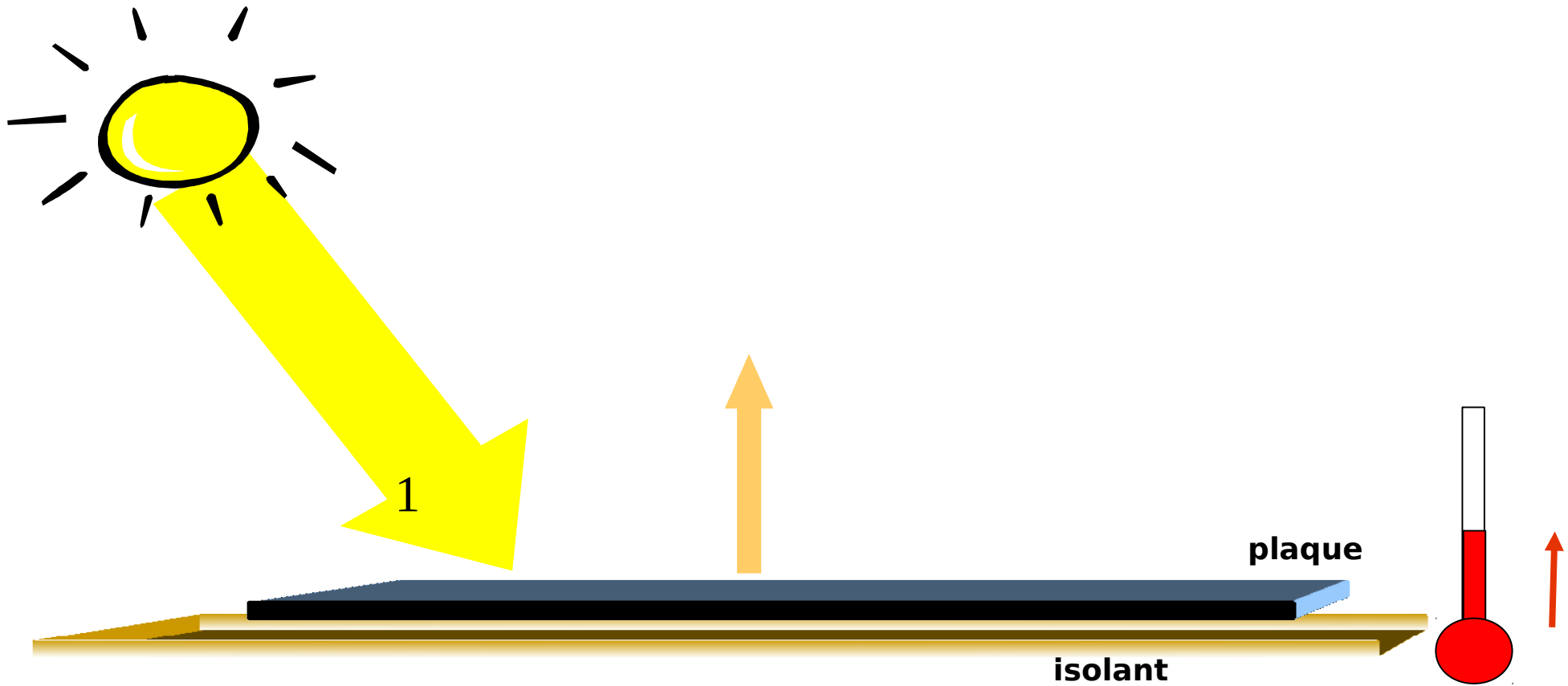
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

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



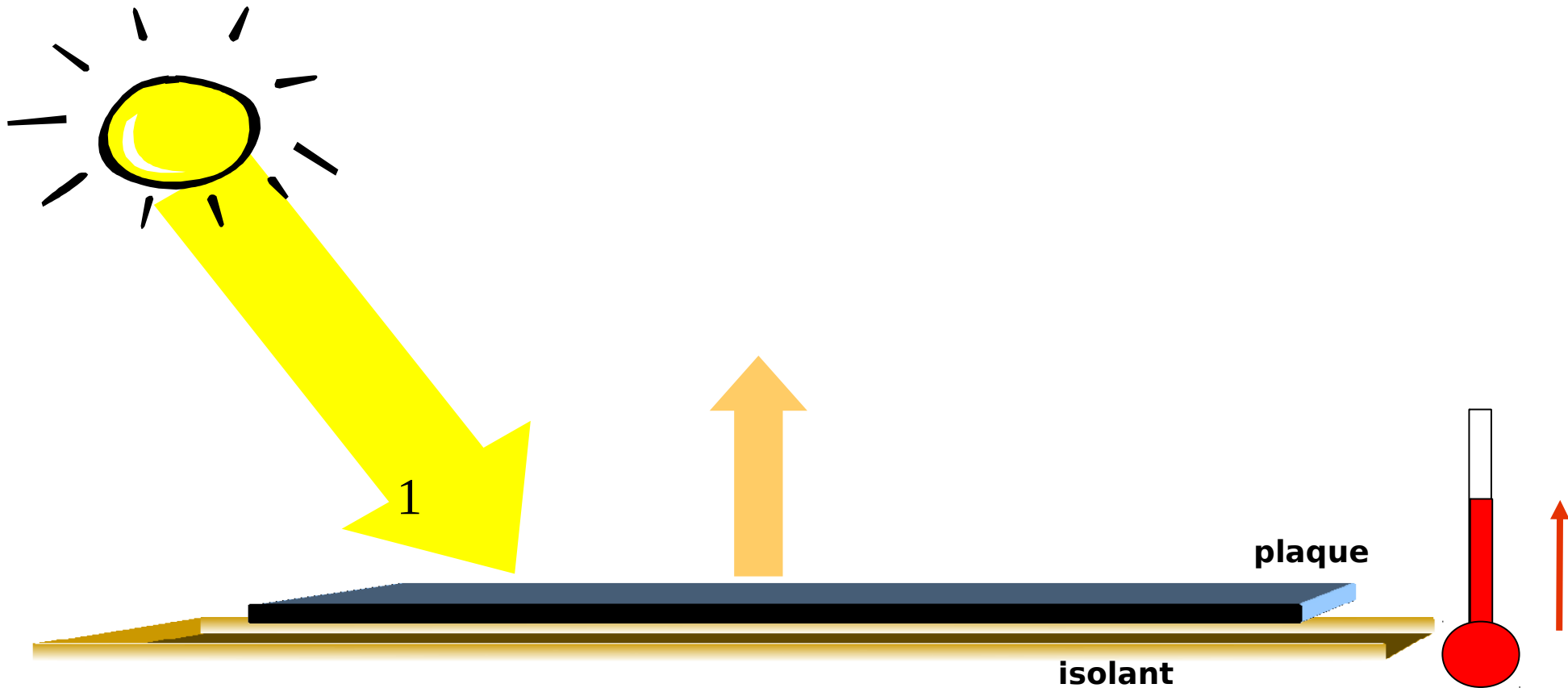
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.

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



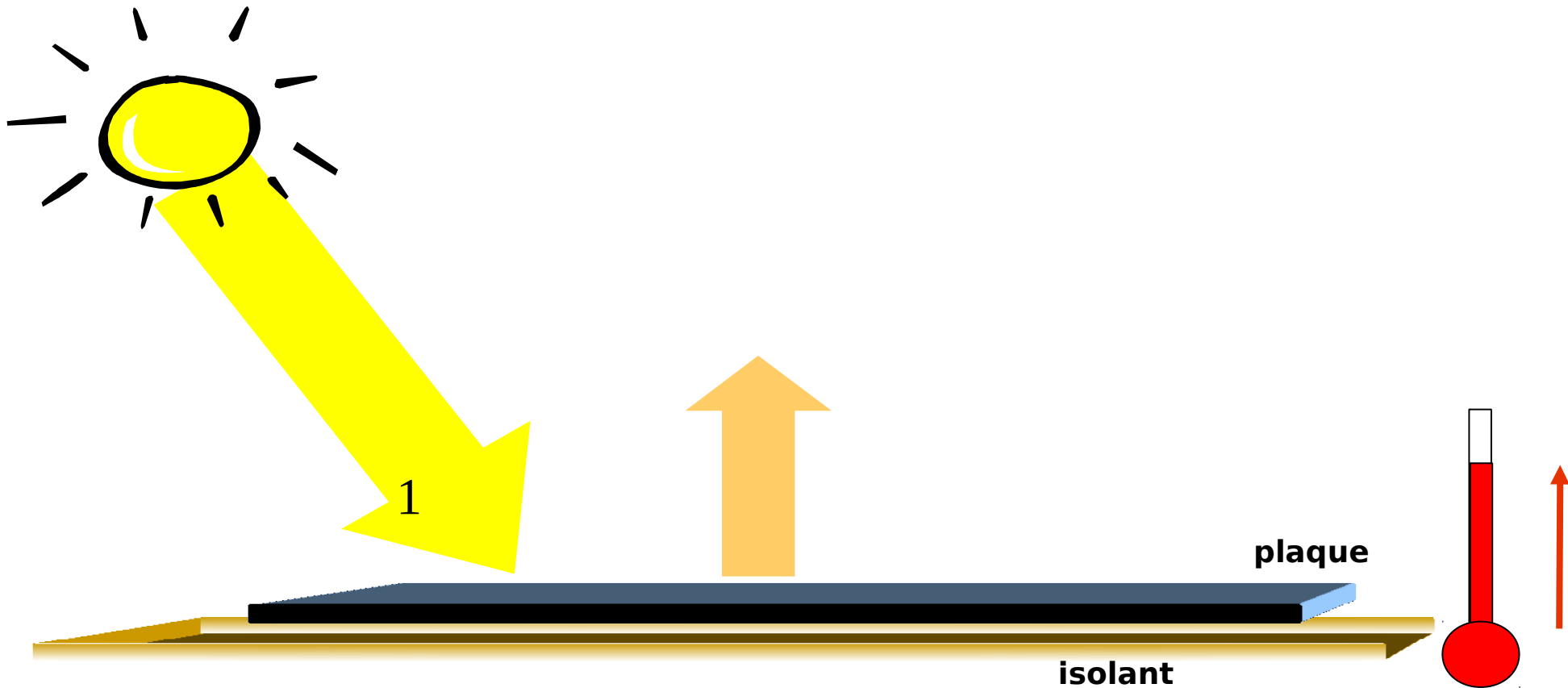
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



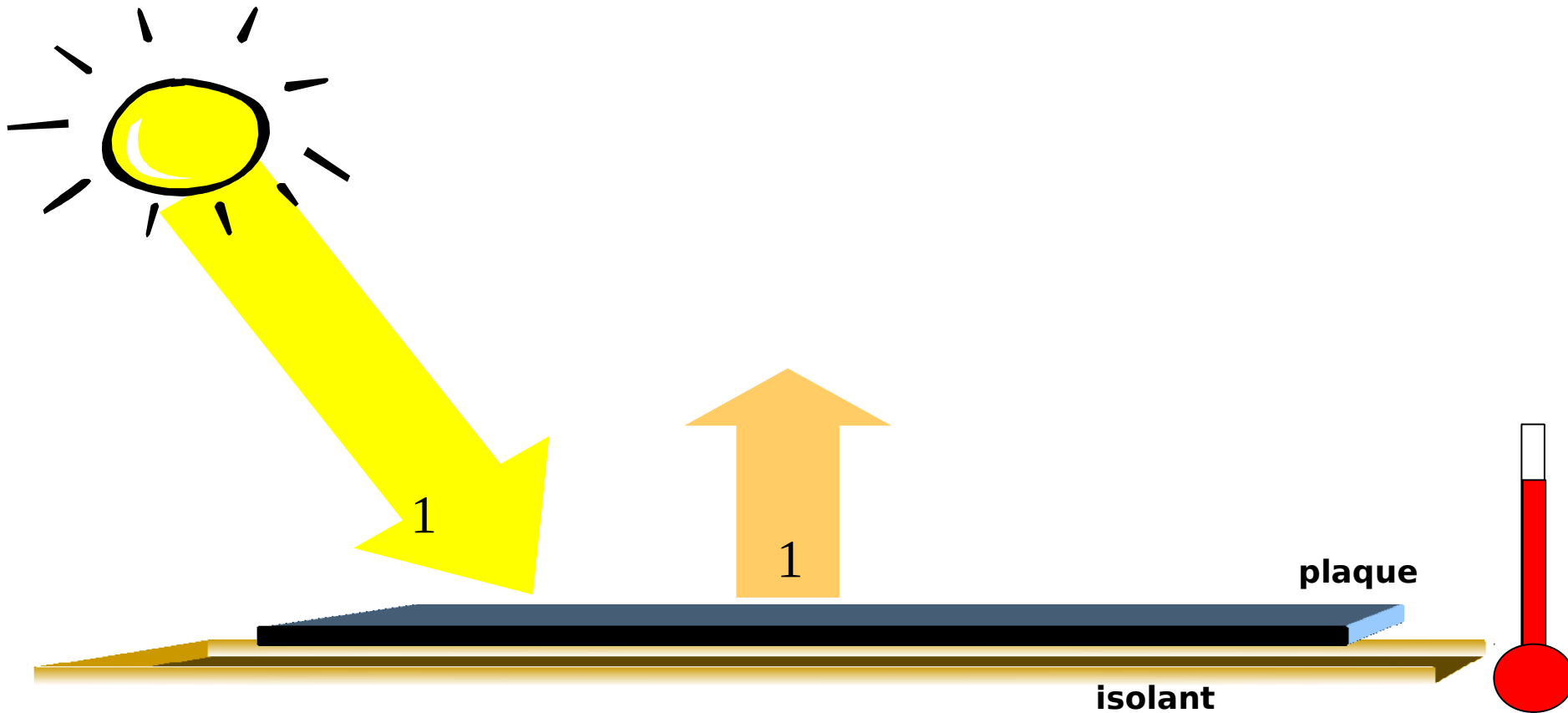
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



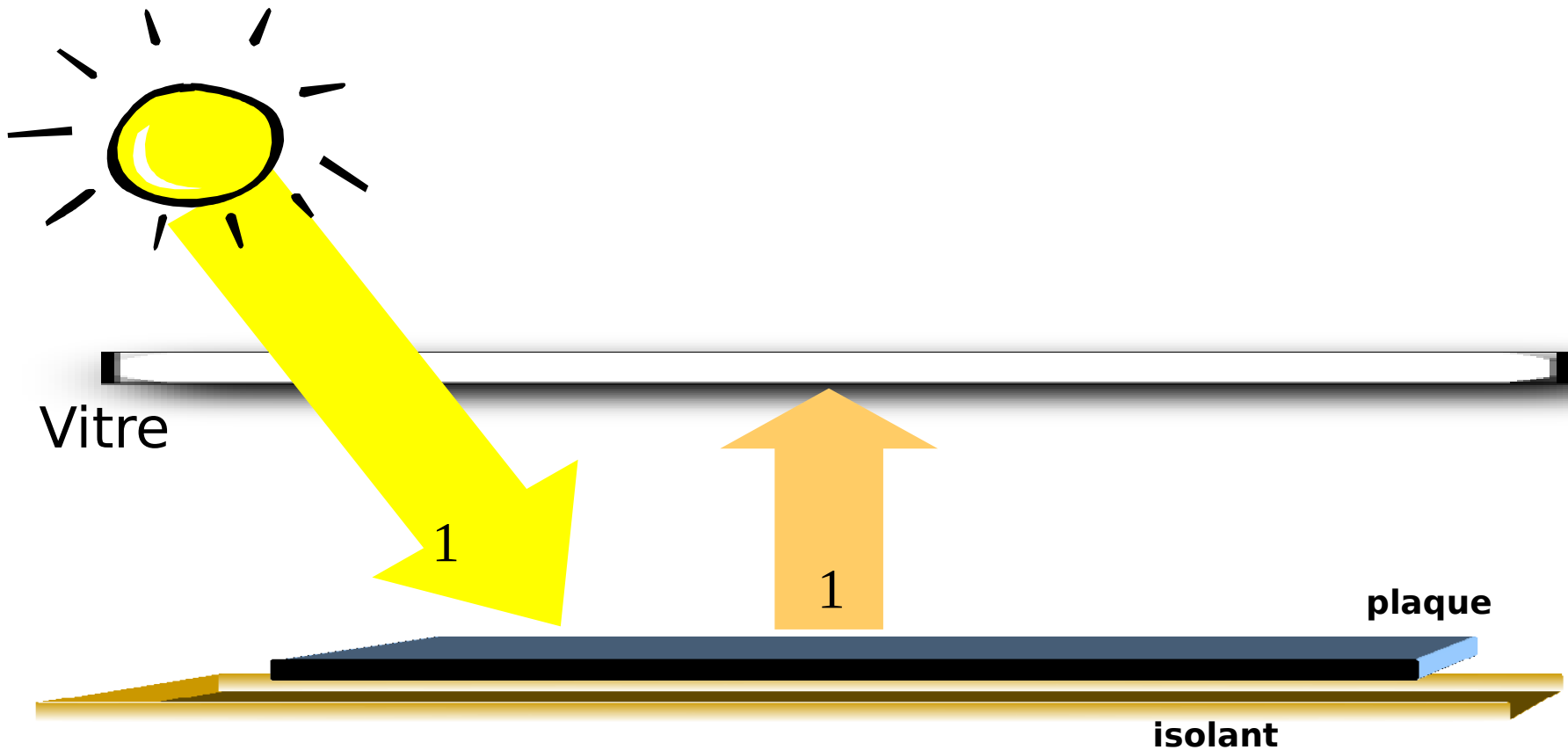
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



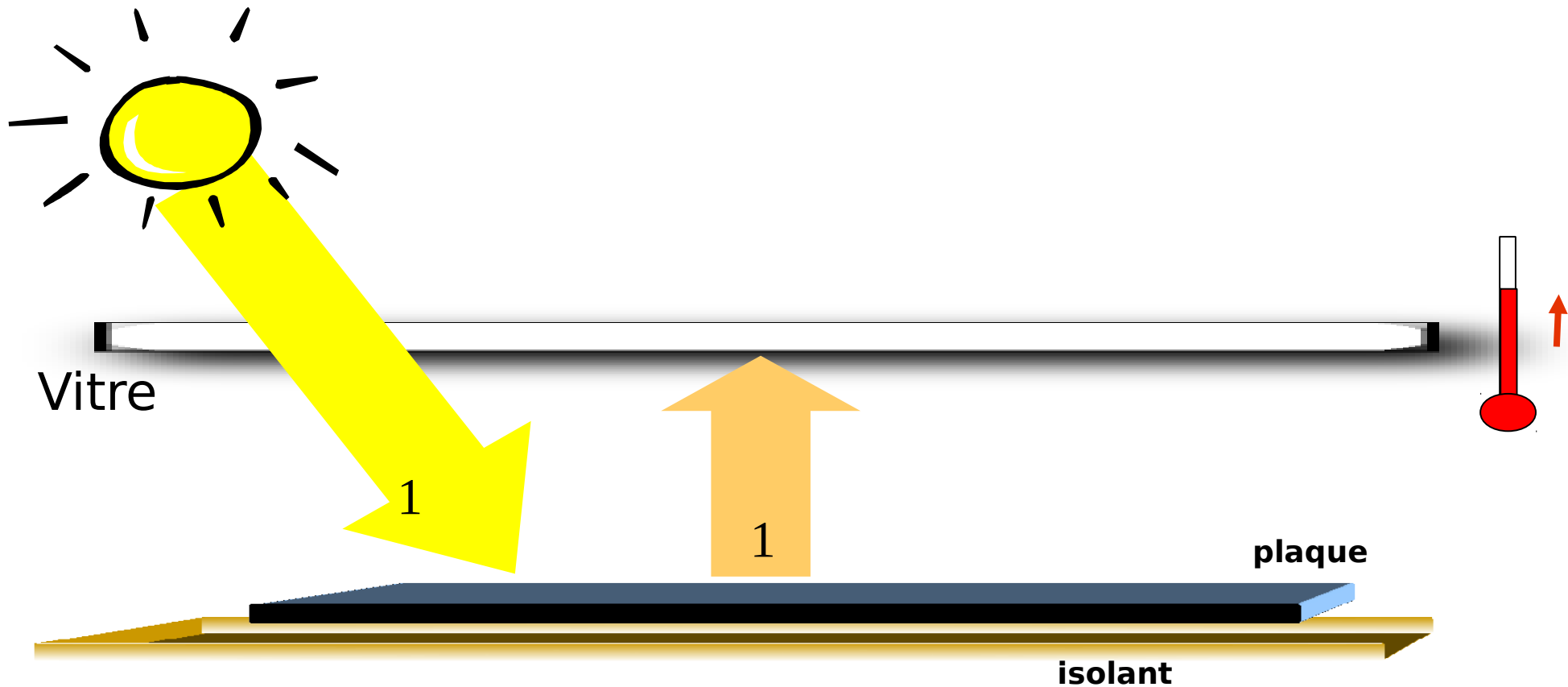
c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.

5) L'effet de serre



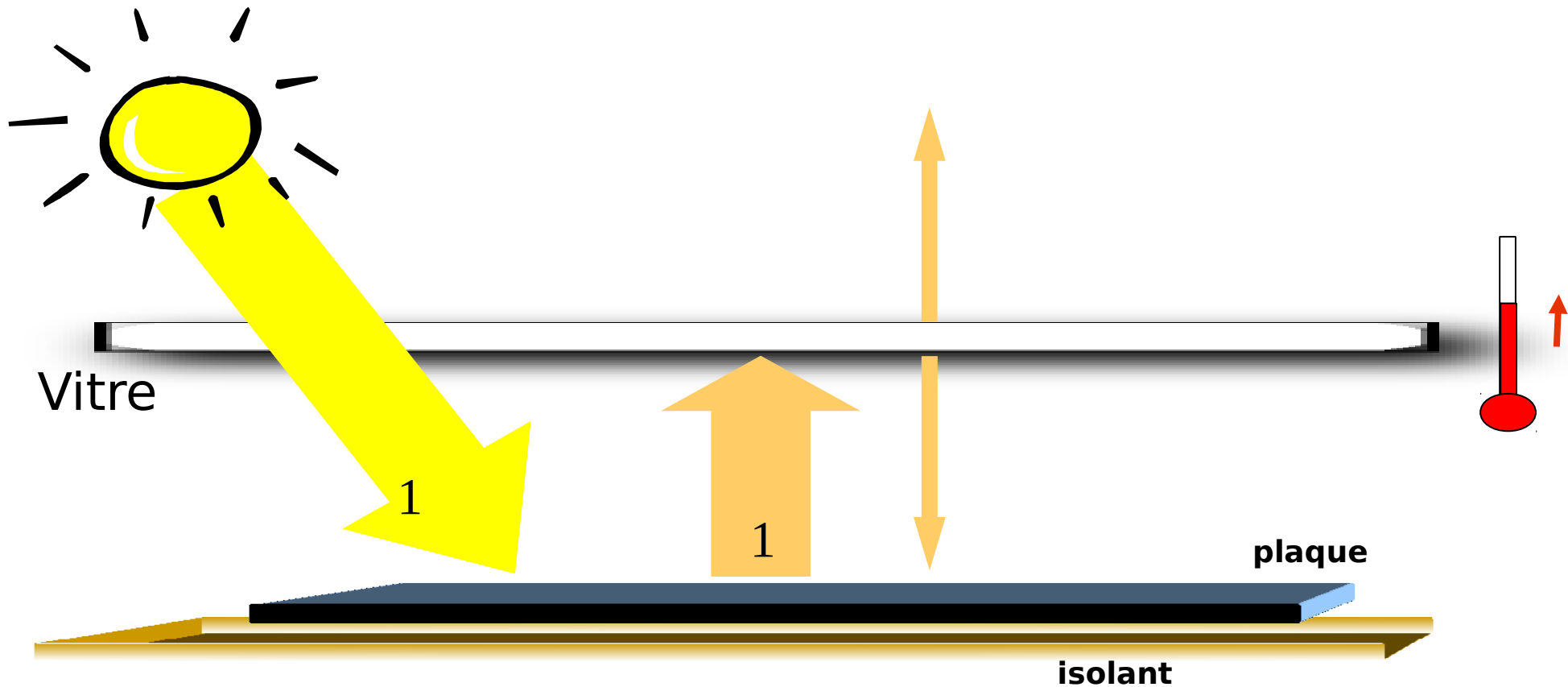
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.

5) L'effet de serre



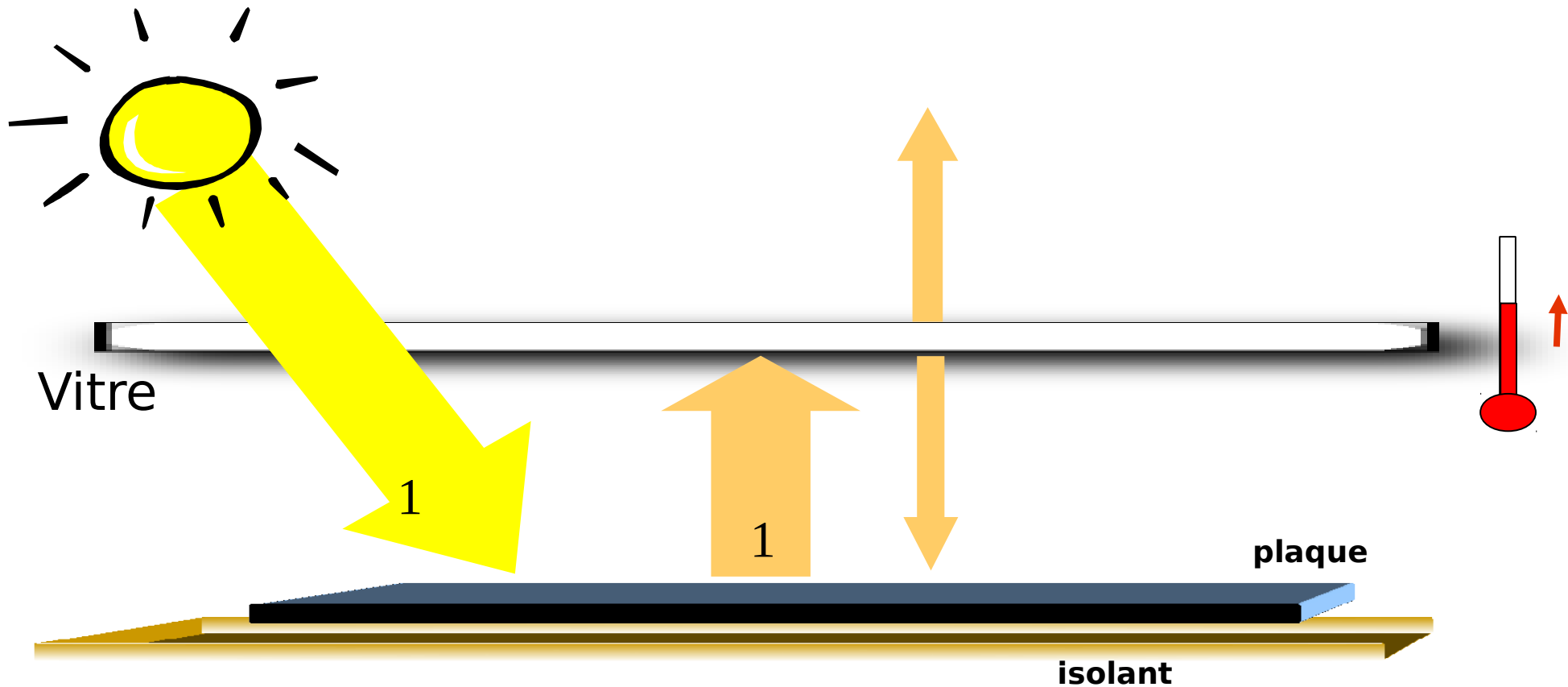
L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

5) L'effet de serre



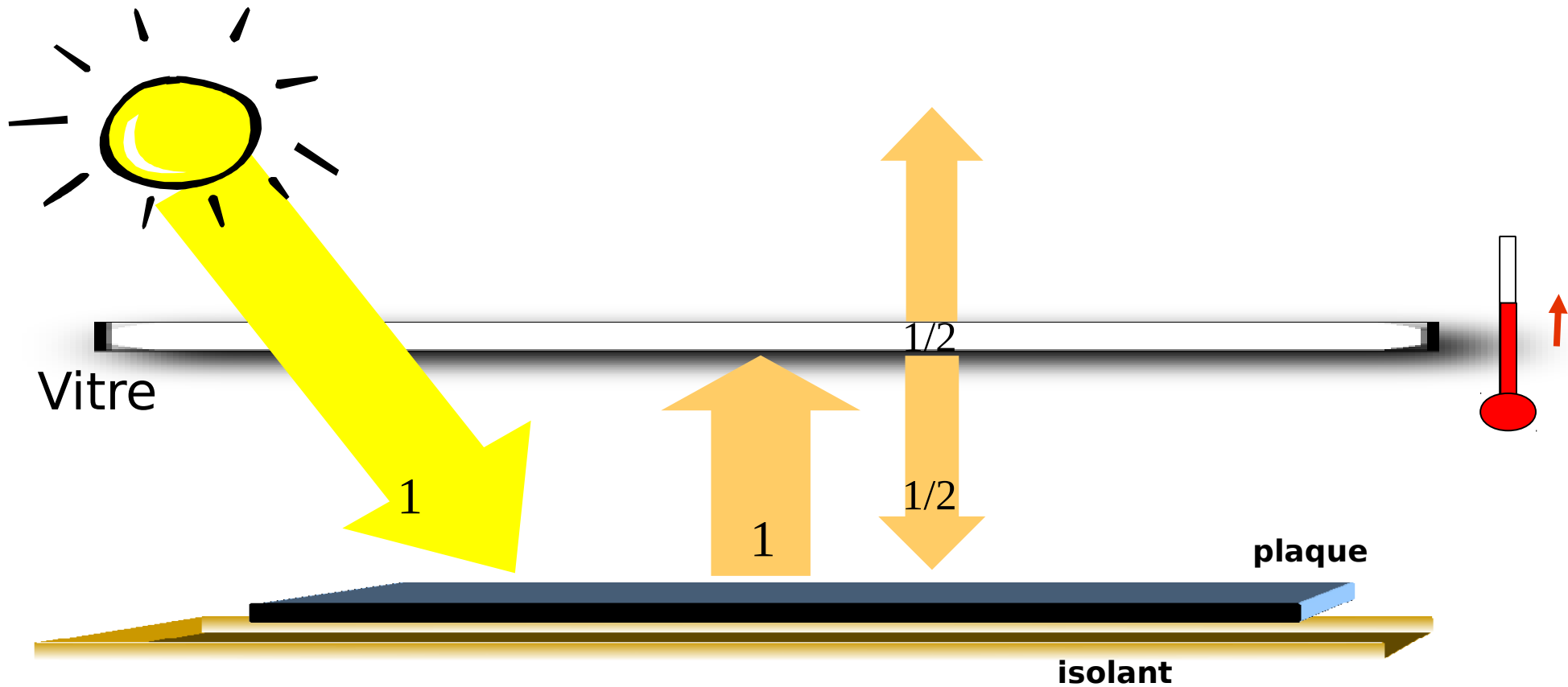
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

5) L'effet de serre



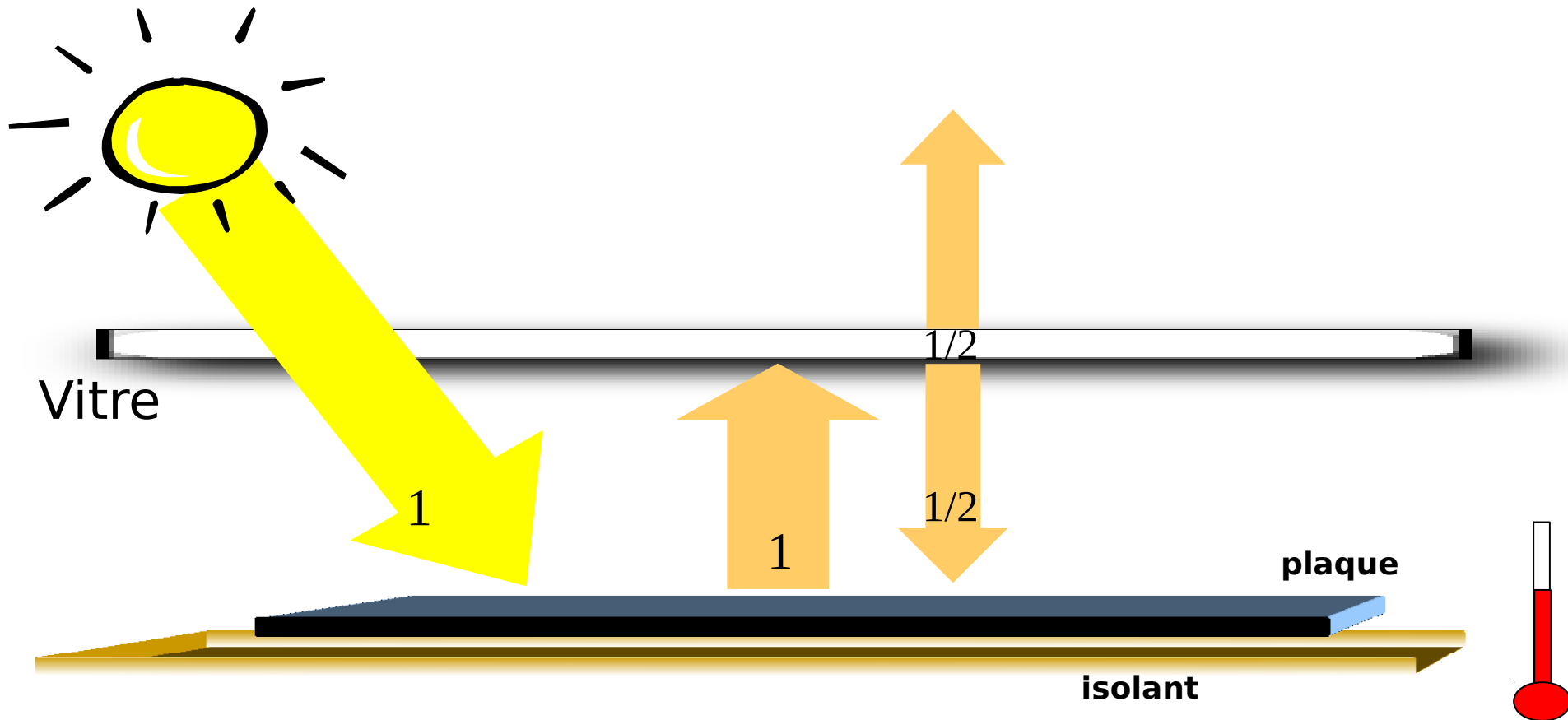
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

5) L'effet de serre



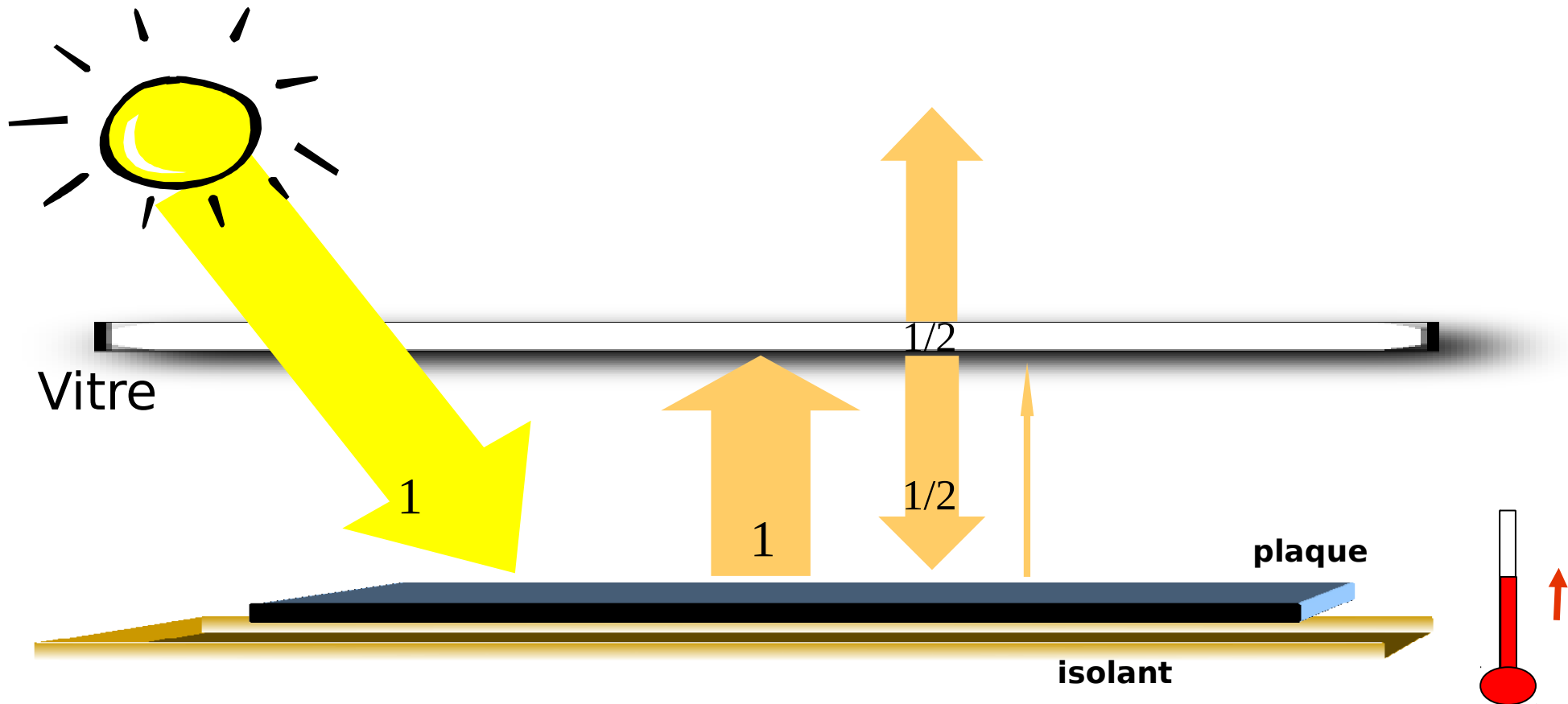
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

5) L'effet de serre



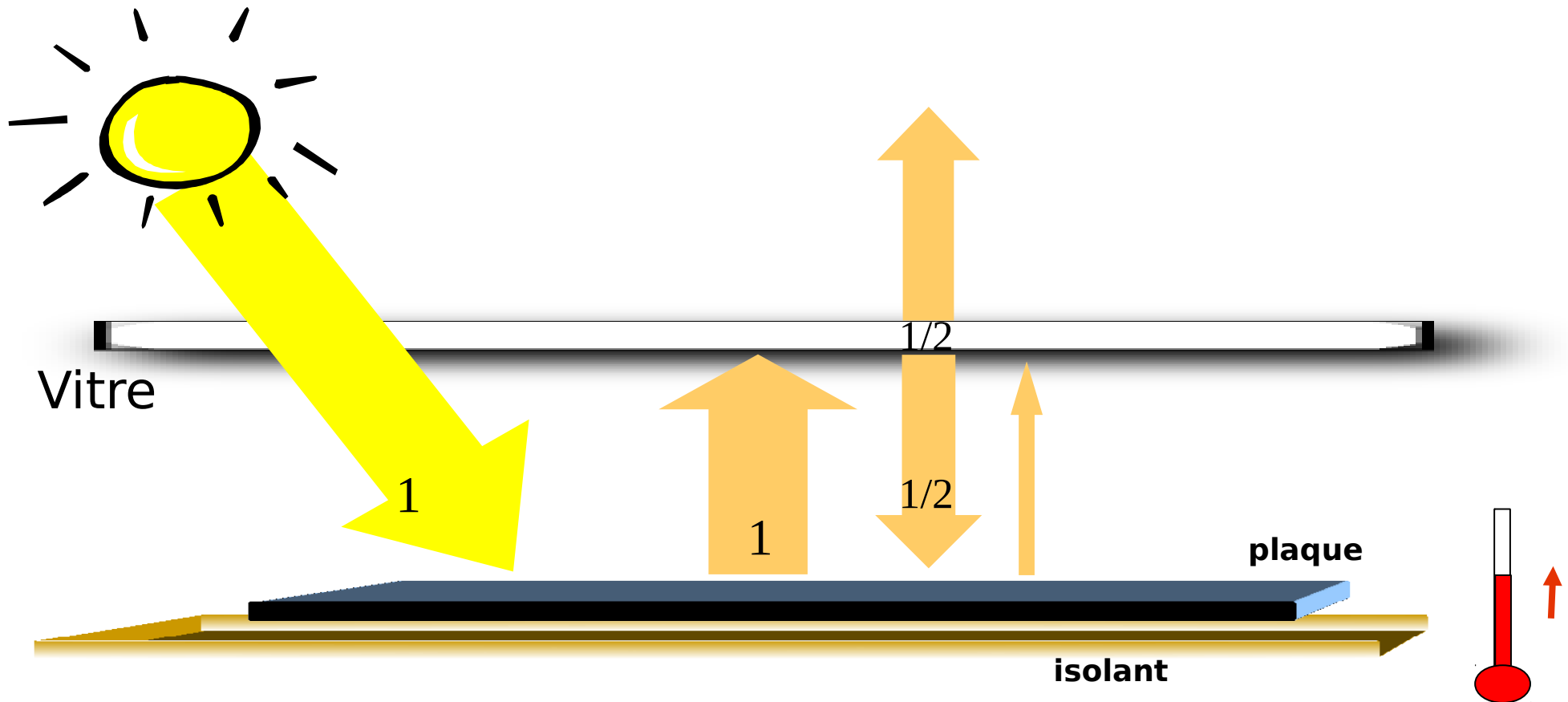
Le rayonnement infrarouge émis par la vitre vers le bas est absorbé par la plaque.

5) L'effet de serre



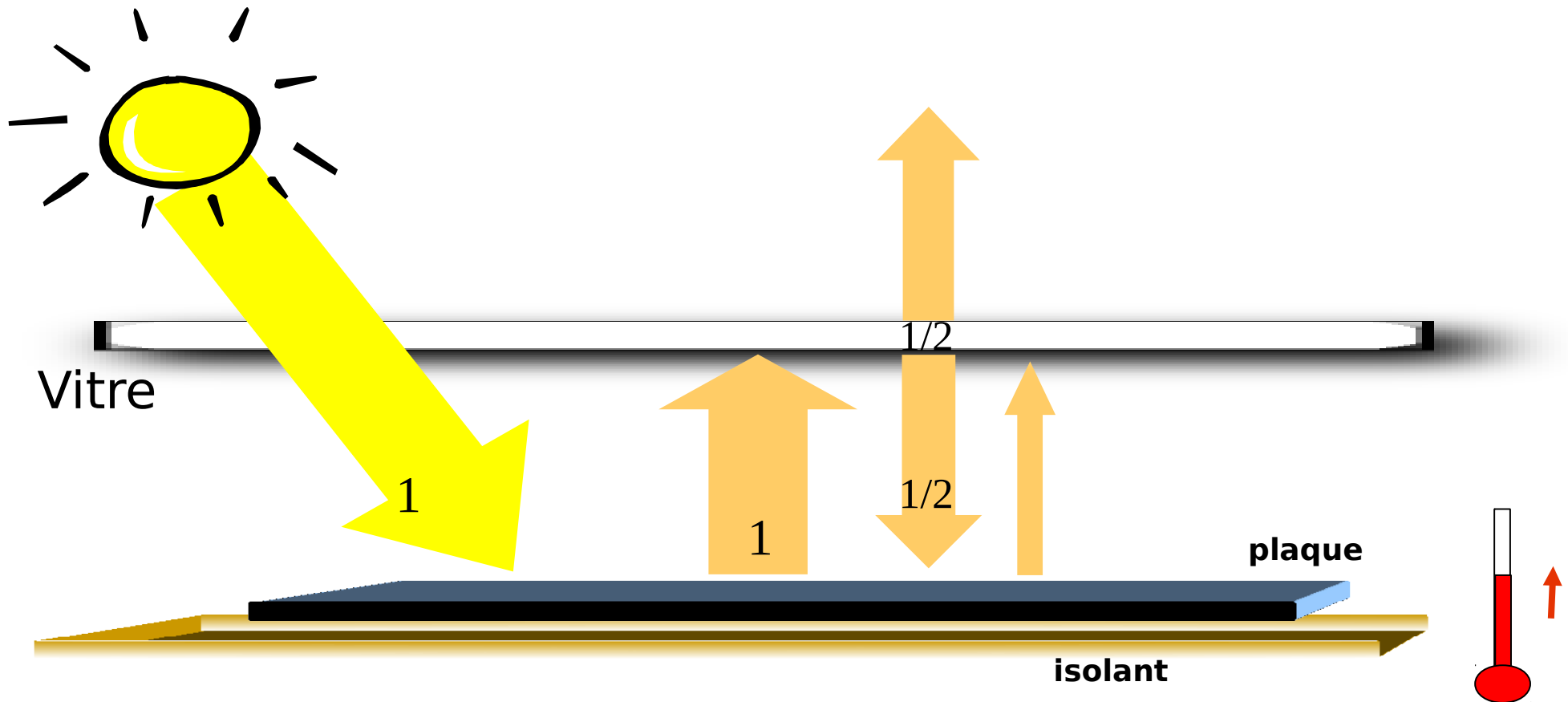
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

5) L'effet de serre



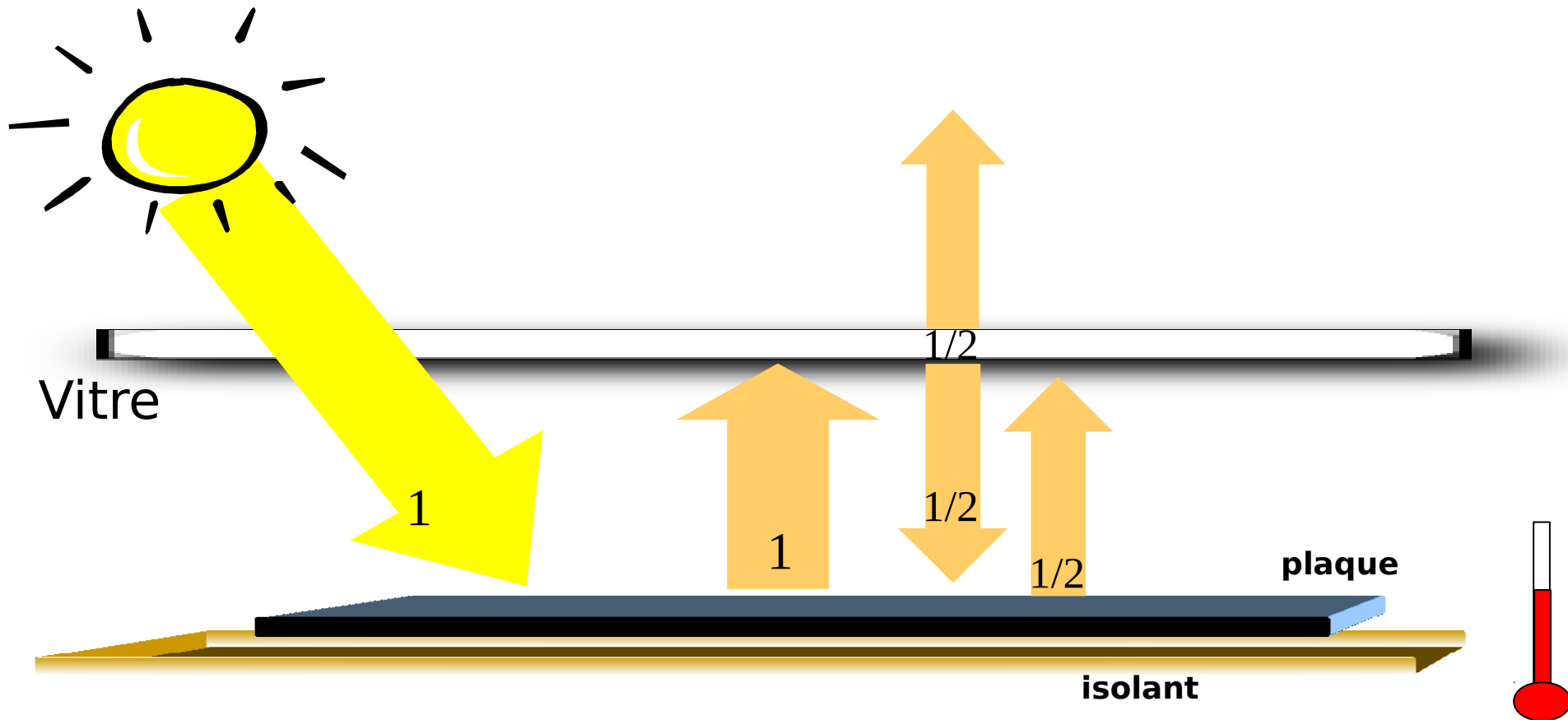
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

5) L'effet de serre



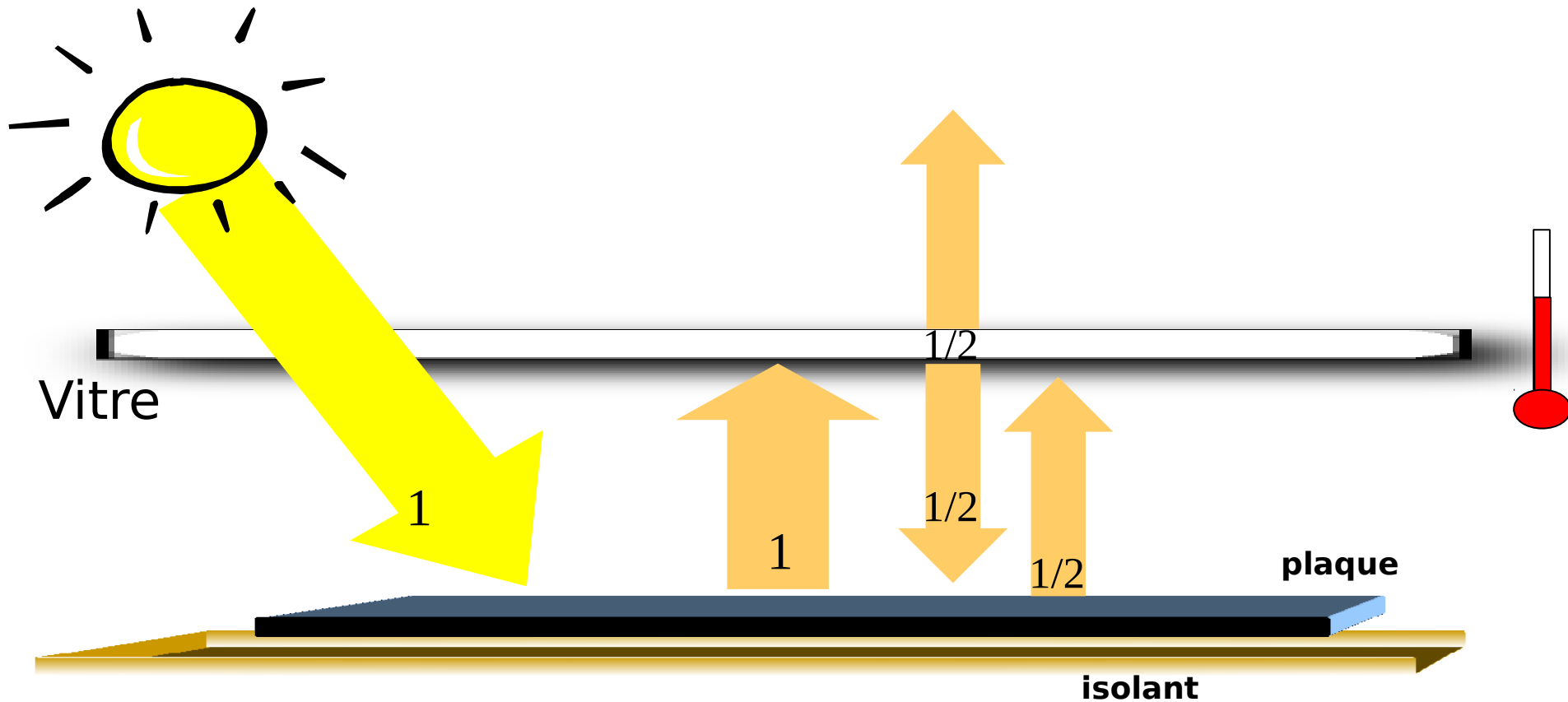
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

5) L'effet de serre



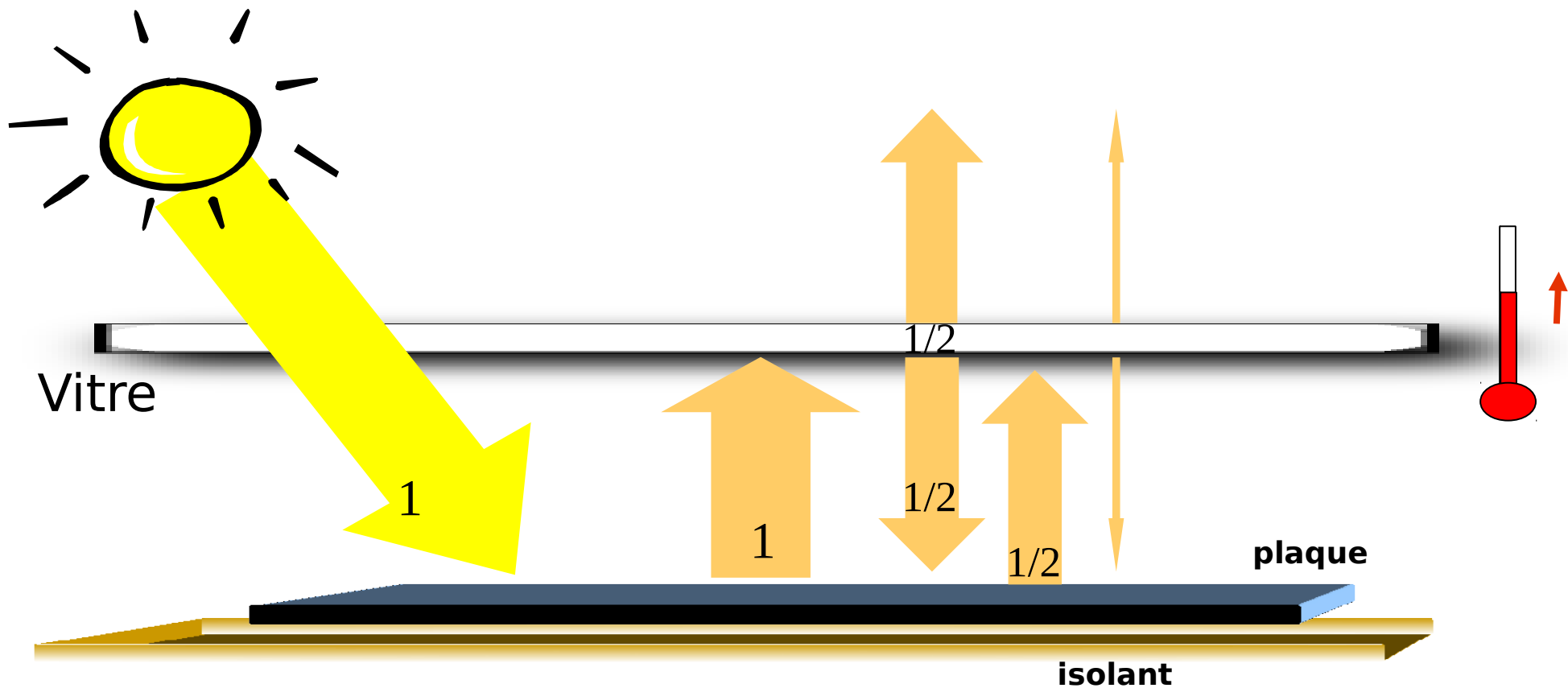
Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre.

5) L'effet de serre



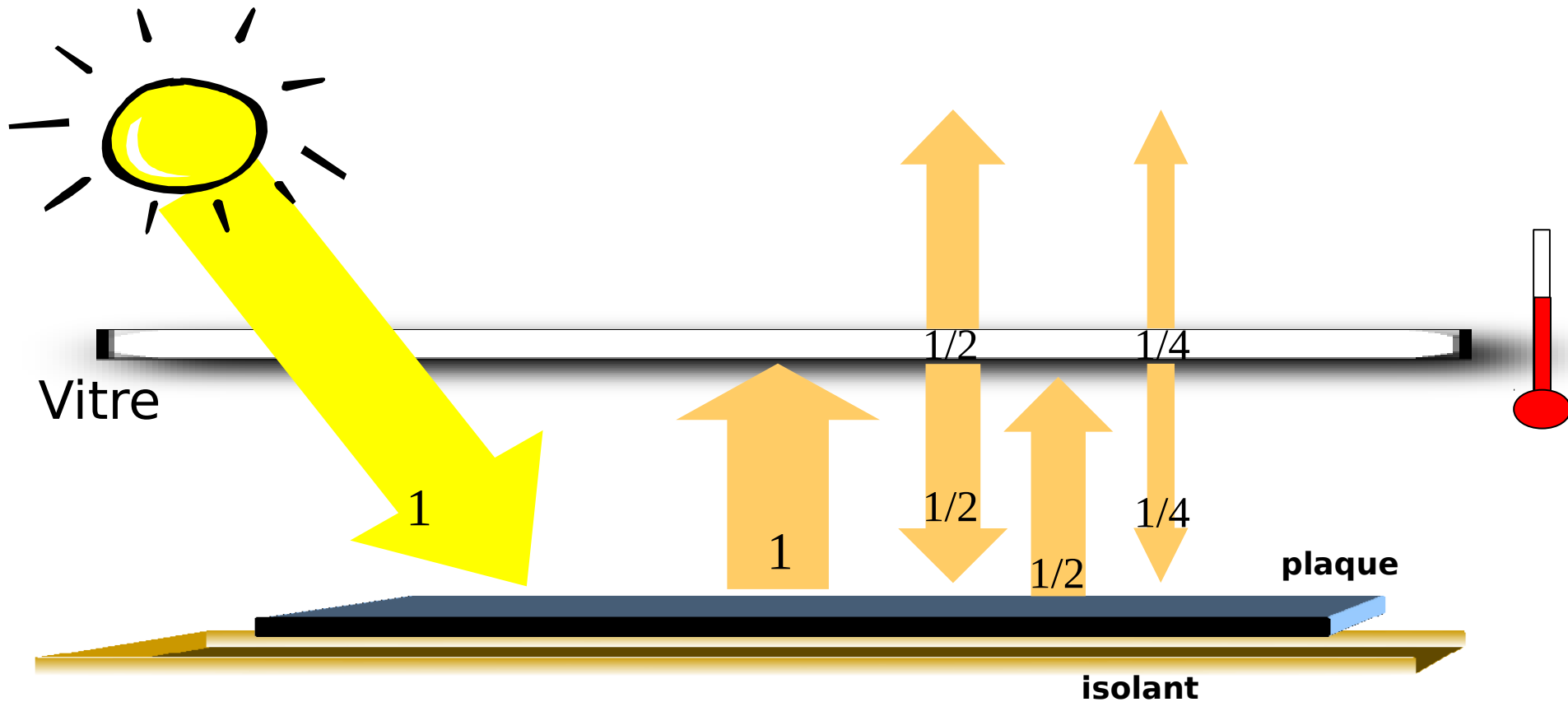
Ce rayonnement supplémentaire émis par la plaque est de nouveau absorbé par la vitre dont la température augmente encore.

5) L'effet de serre



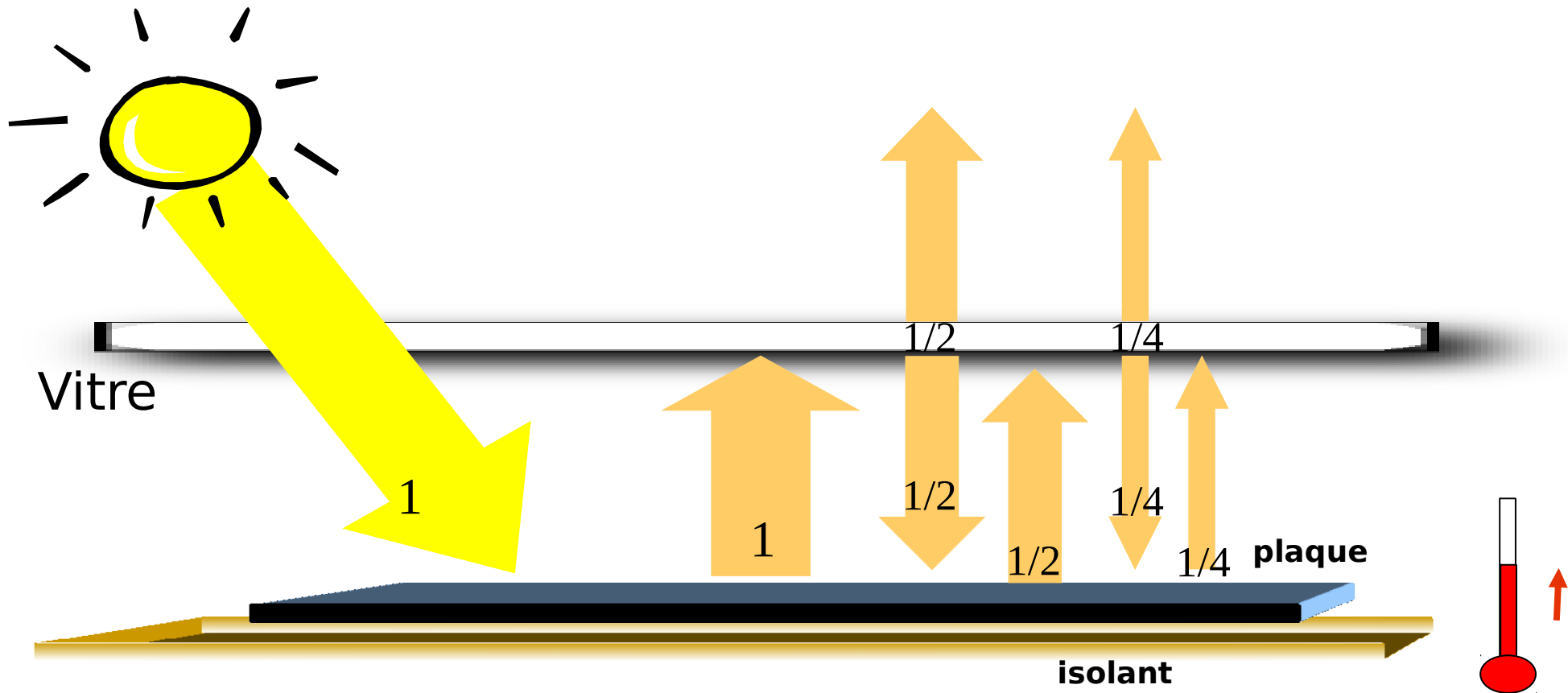
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge, moitié vers le haut, moitié vers le bas.

5) L'effet de serre



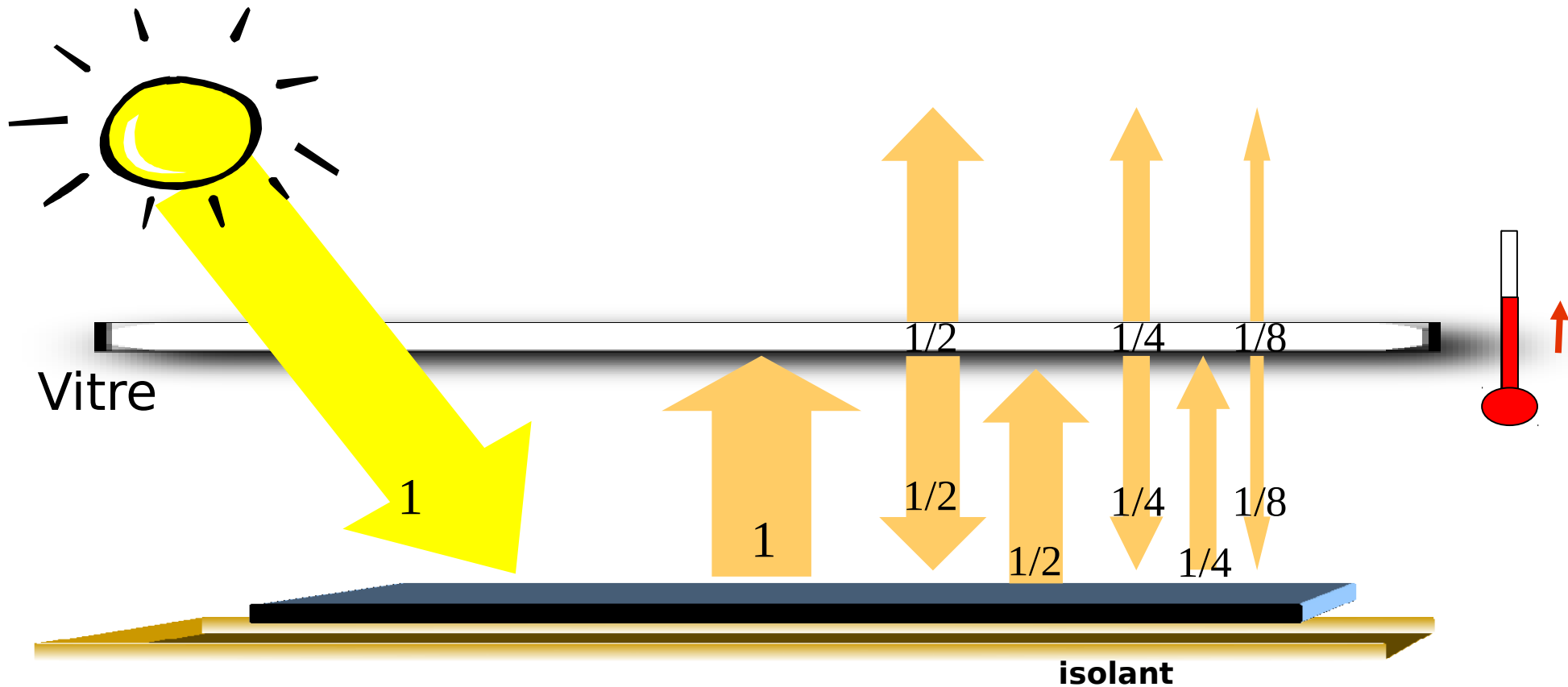
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

5) L'effet de serre



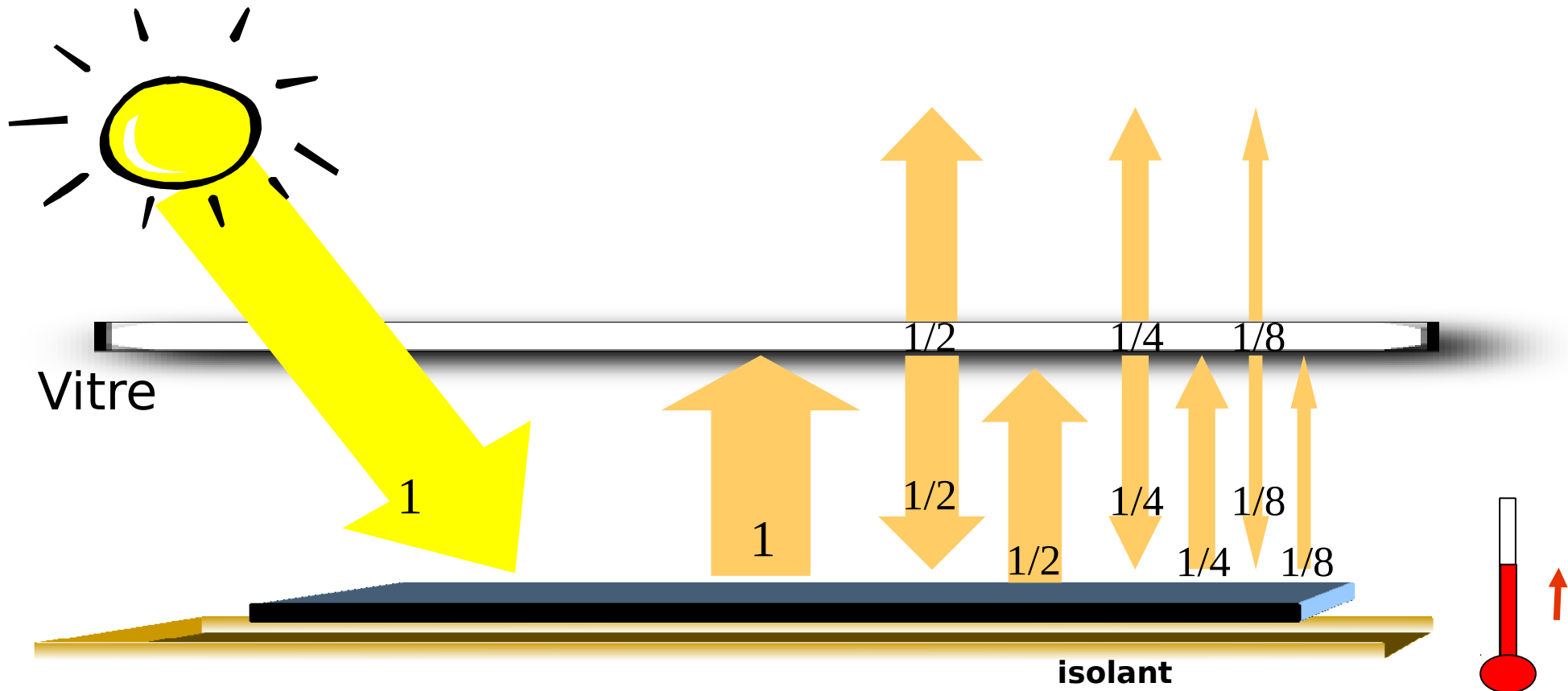
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

5) L'effet de serre



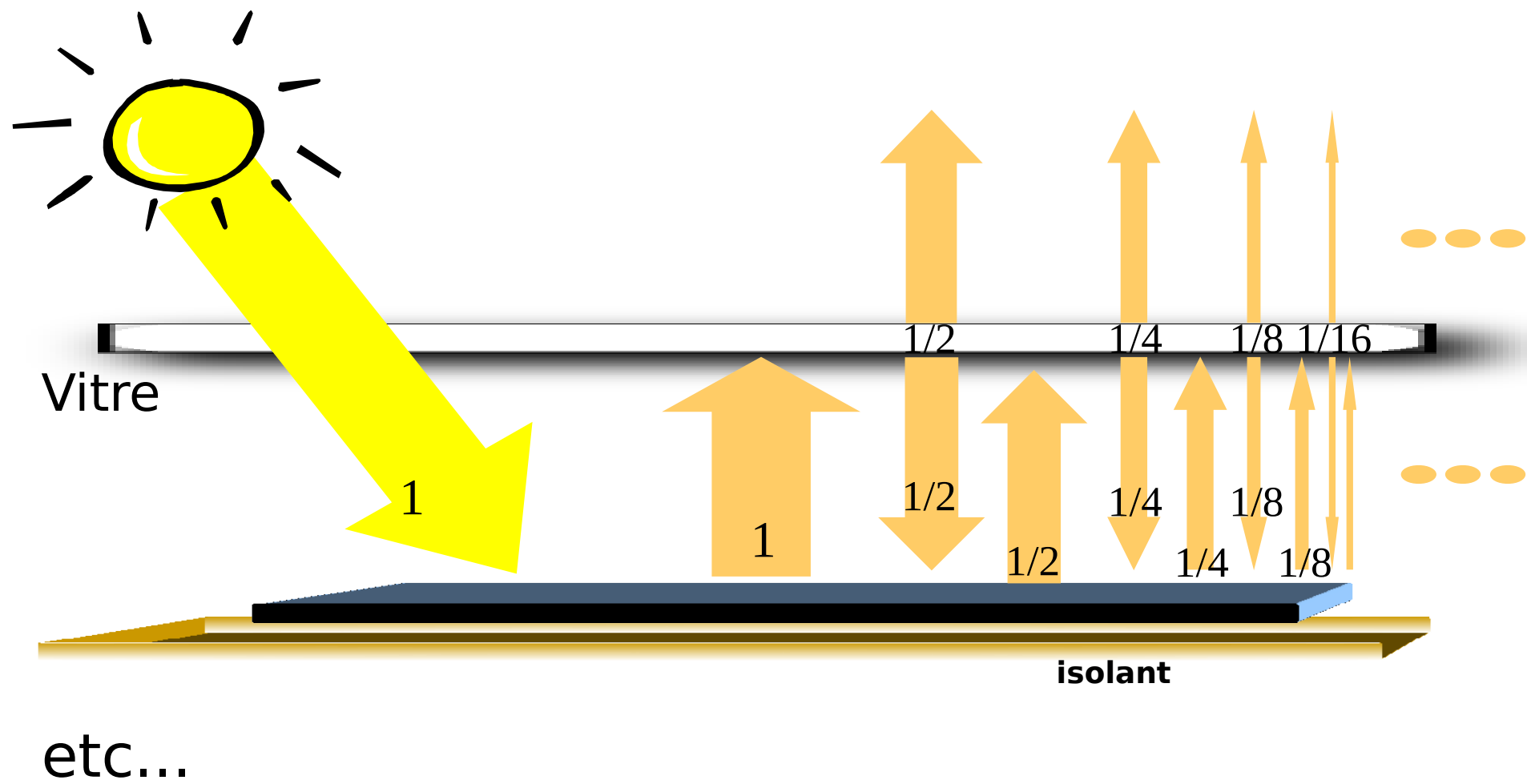
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

5) L'effet de serre

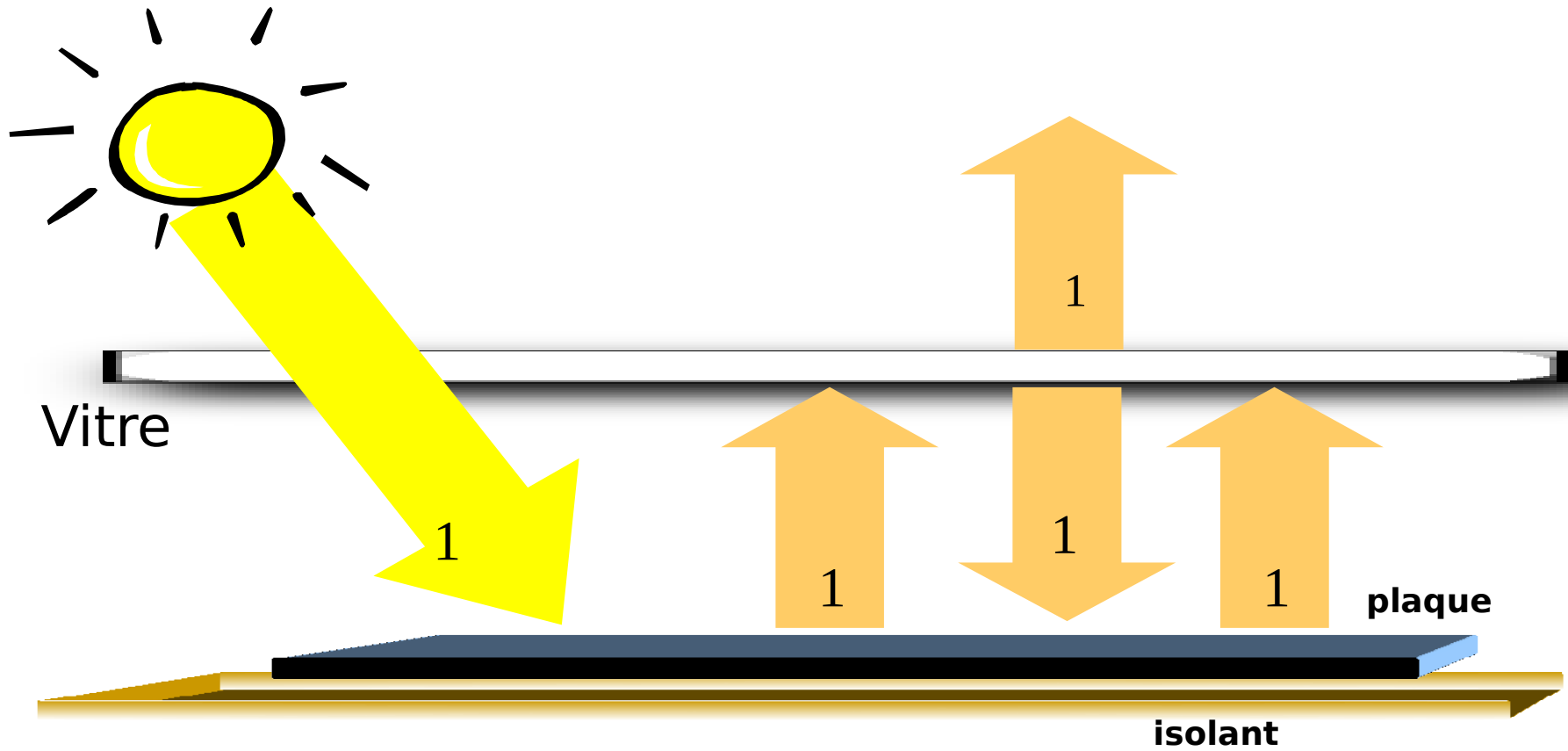


Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

5) L'effet de serre

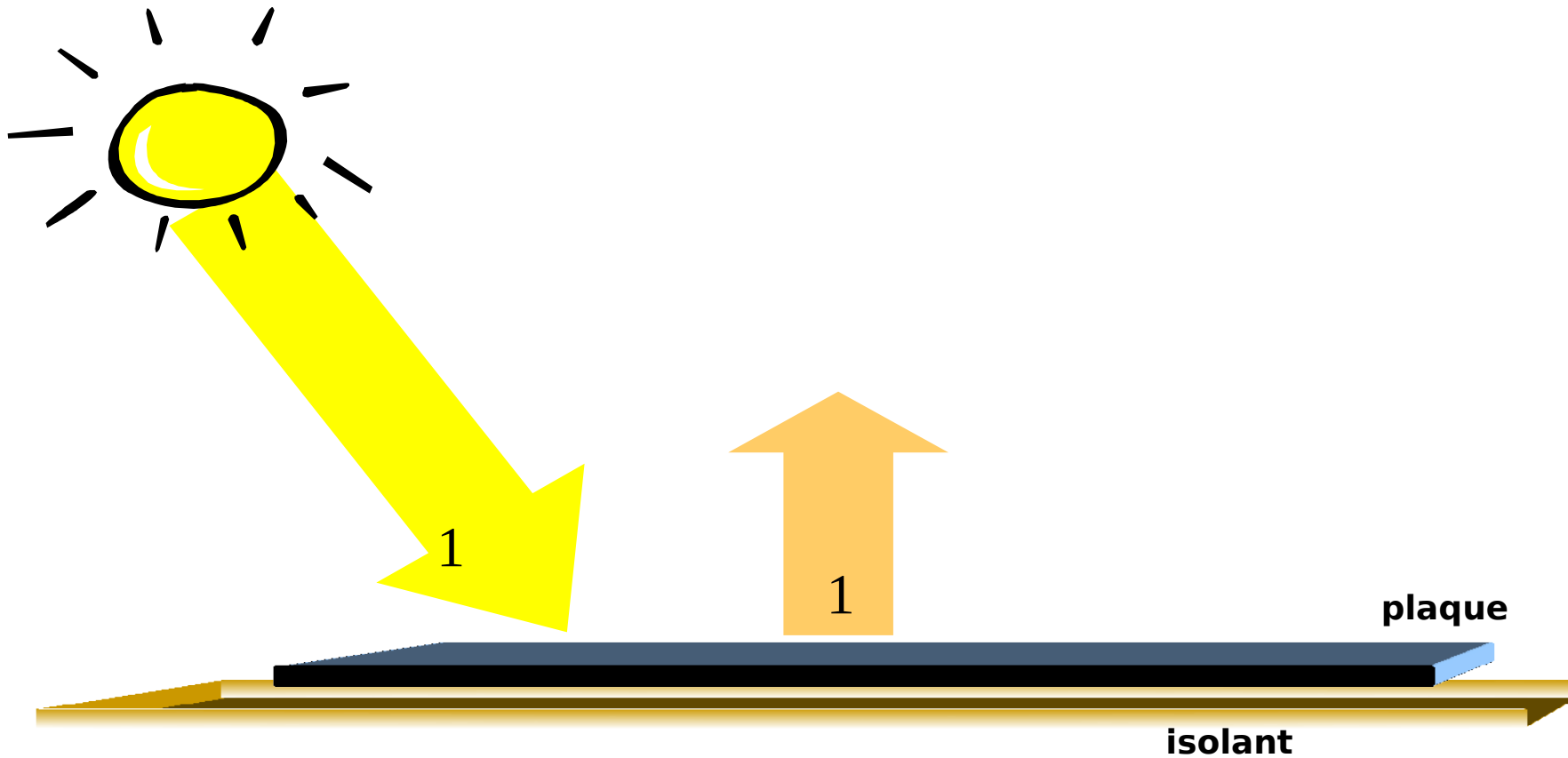


5) L'effet de serre



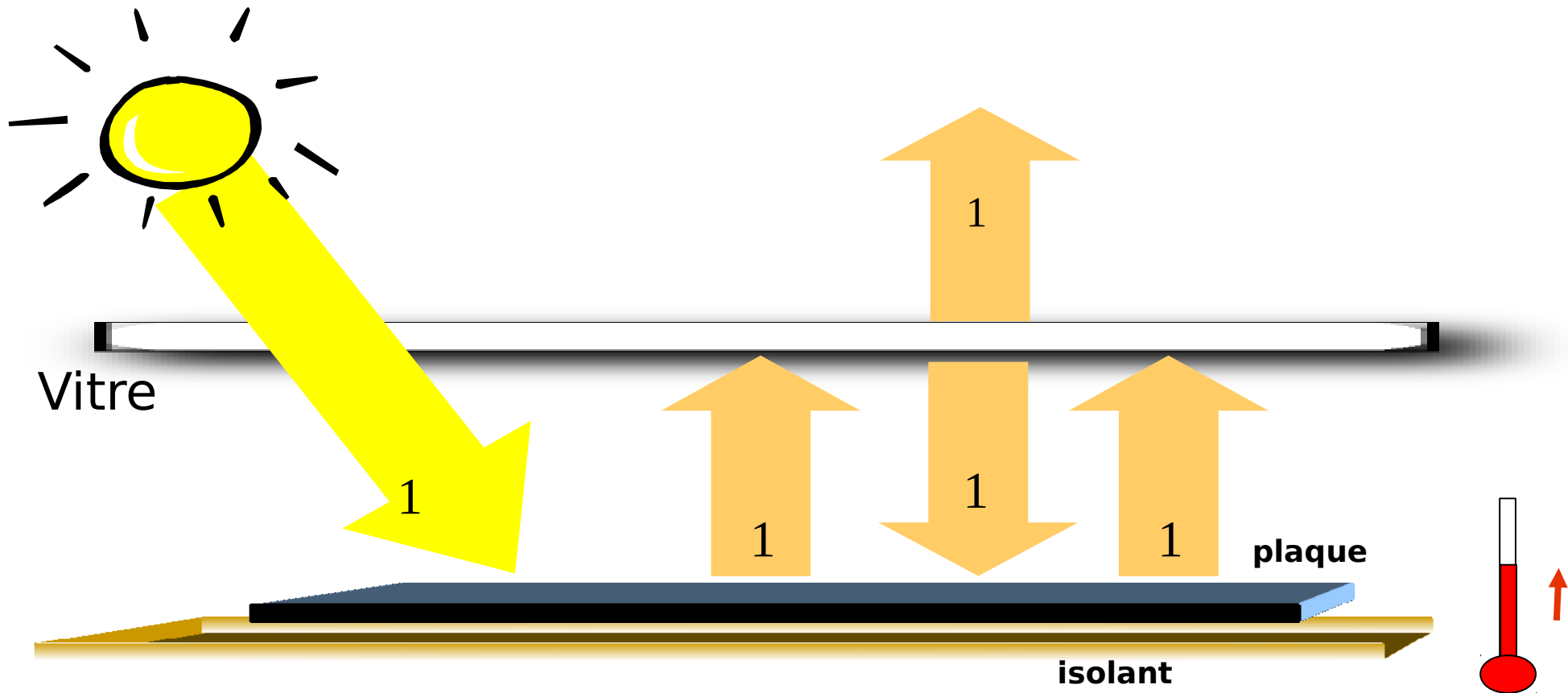
et si on fait la somme...

5) L'effet de serre



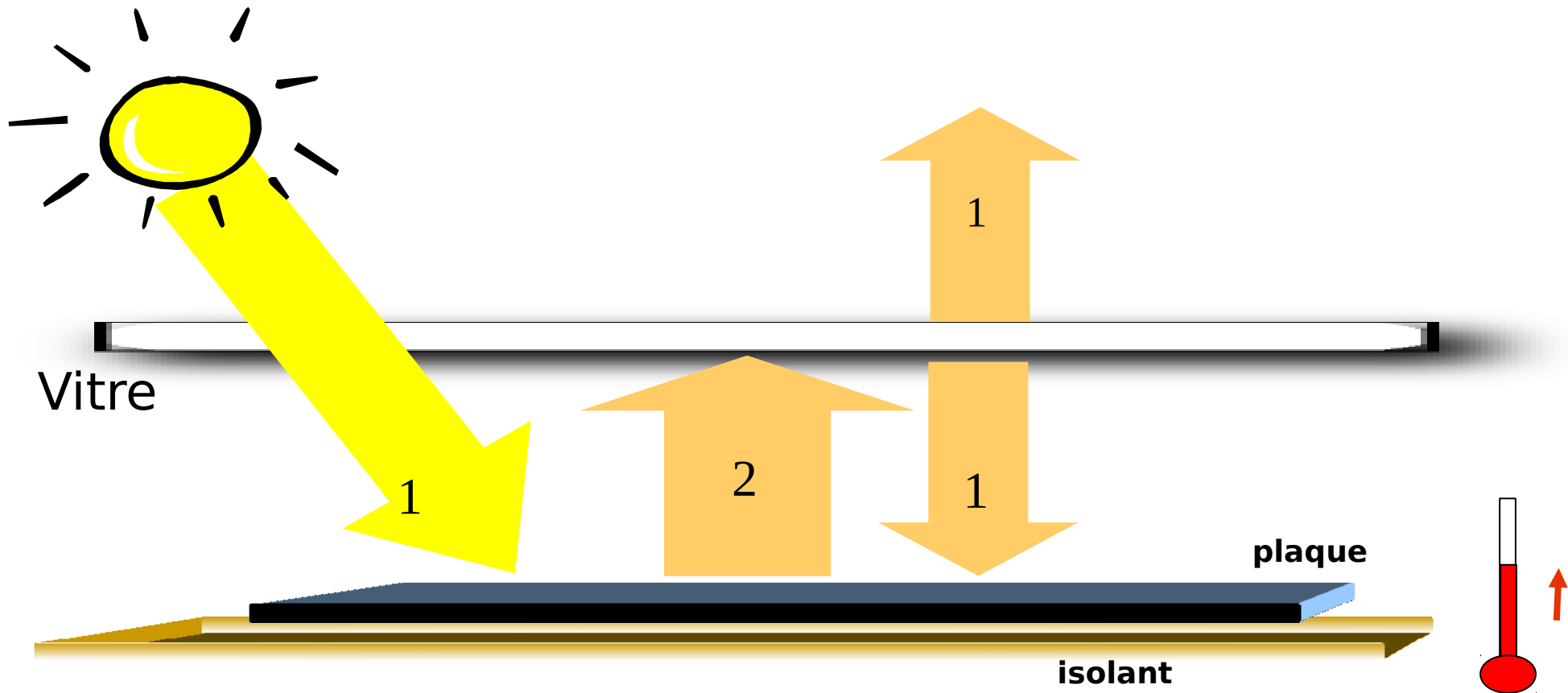
Si on résume le déroulement précédent, ...

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.

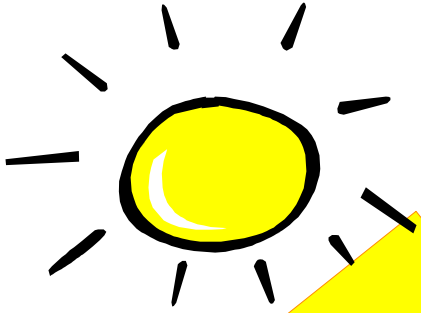
5) L'effet de serre

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

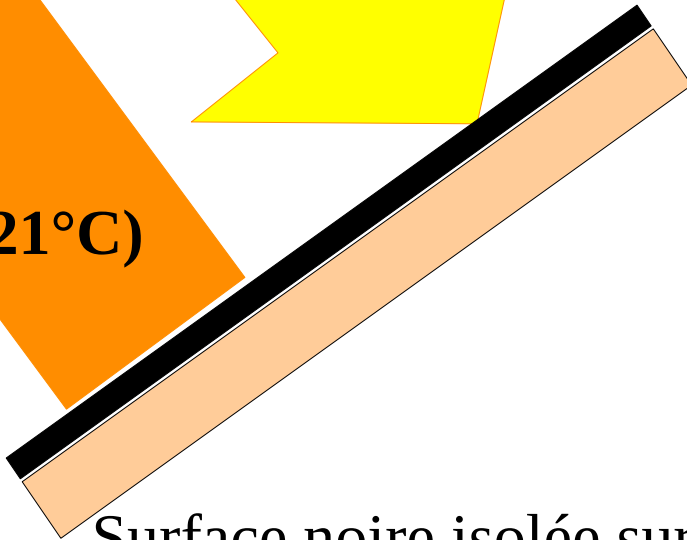
Dans la réalité les phénomènes sont plus compliqués (mouvement d'air), néanmoins notre exemple reste tout à fait valable pour comprendre les mécanismes de l'effet de serre.

Température d'équilibre d'une planète



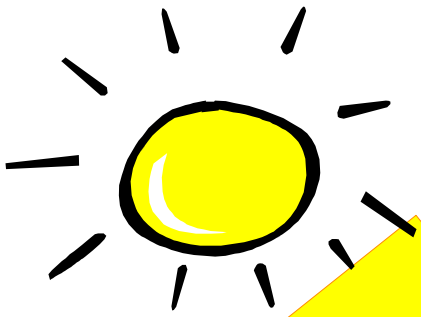
Flux solaire incident sur un **plan**: $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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



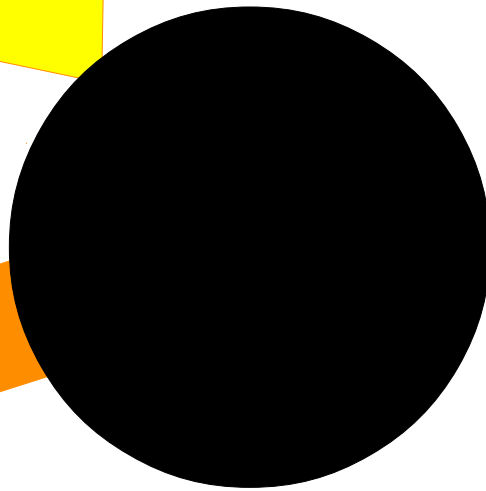
Surface noire isolée sur une face

Température d'équilibre d'une planète



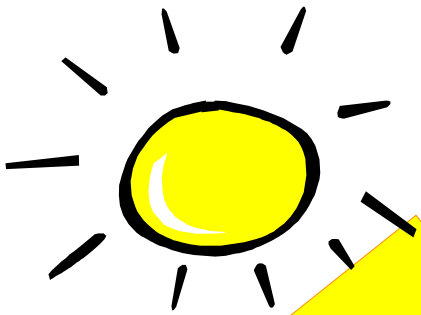
Flux solaire incident sur un **plan**: $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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

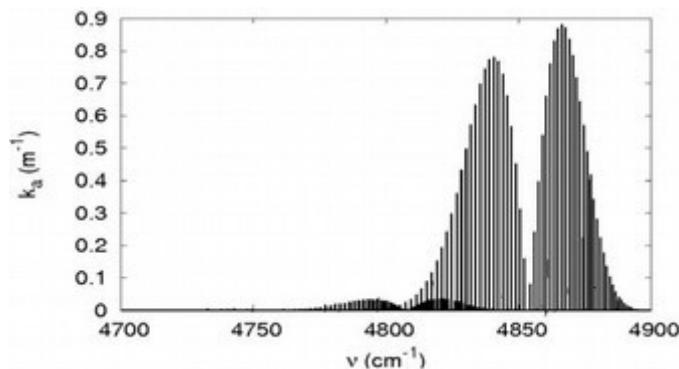
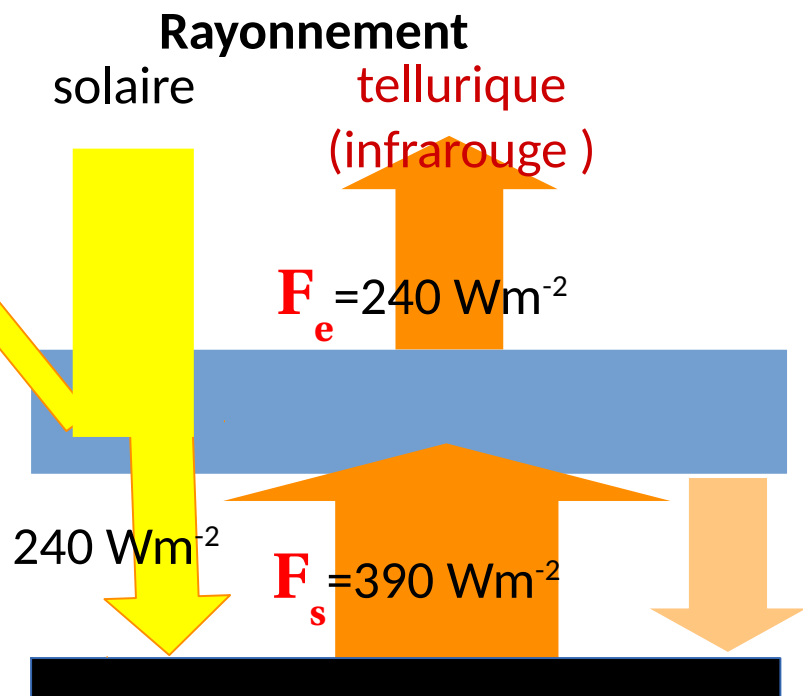


$T_s = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$

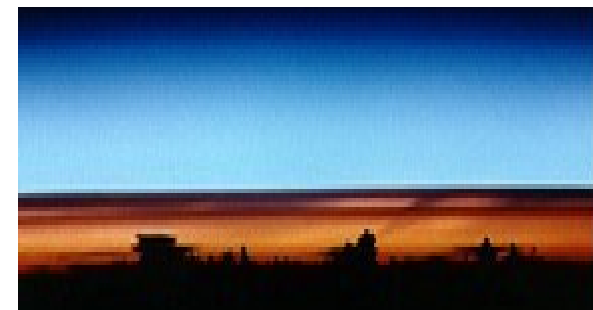
La température moyenne de la surface **de la Terre est de 15°C** environ.

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

Calcul de l'effet de serre



Propriétés radiatives



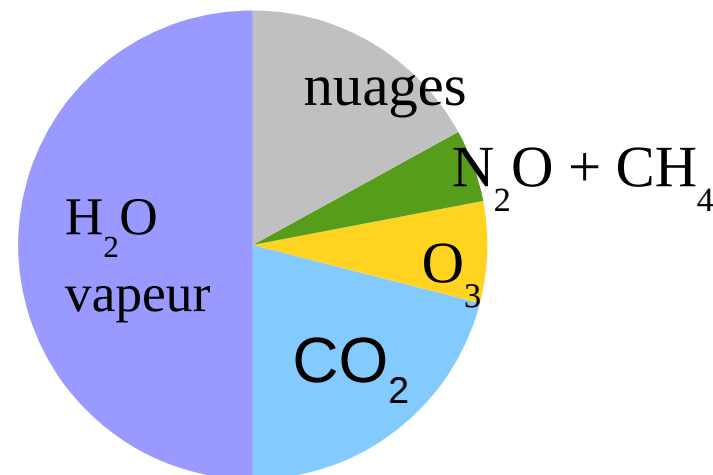
Profils atmosphériques

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

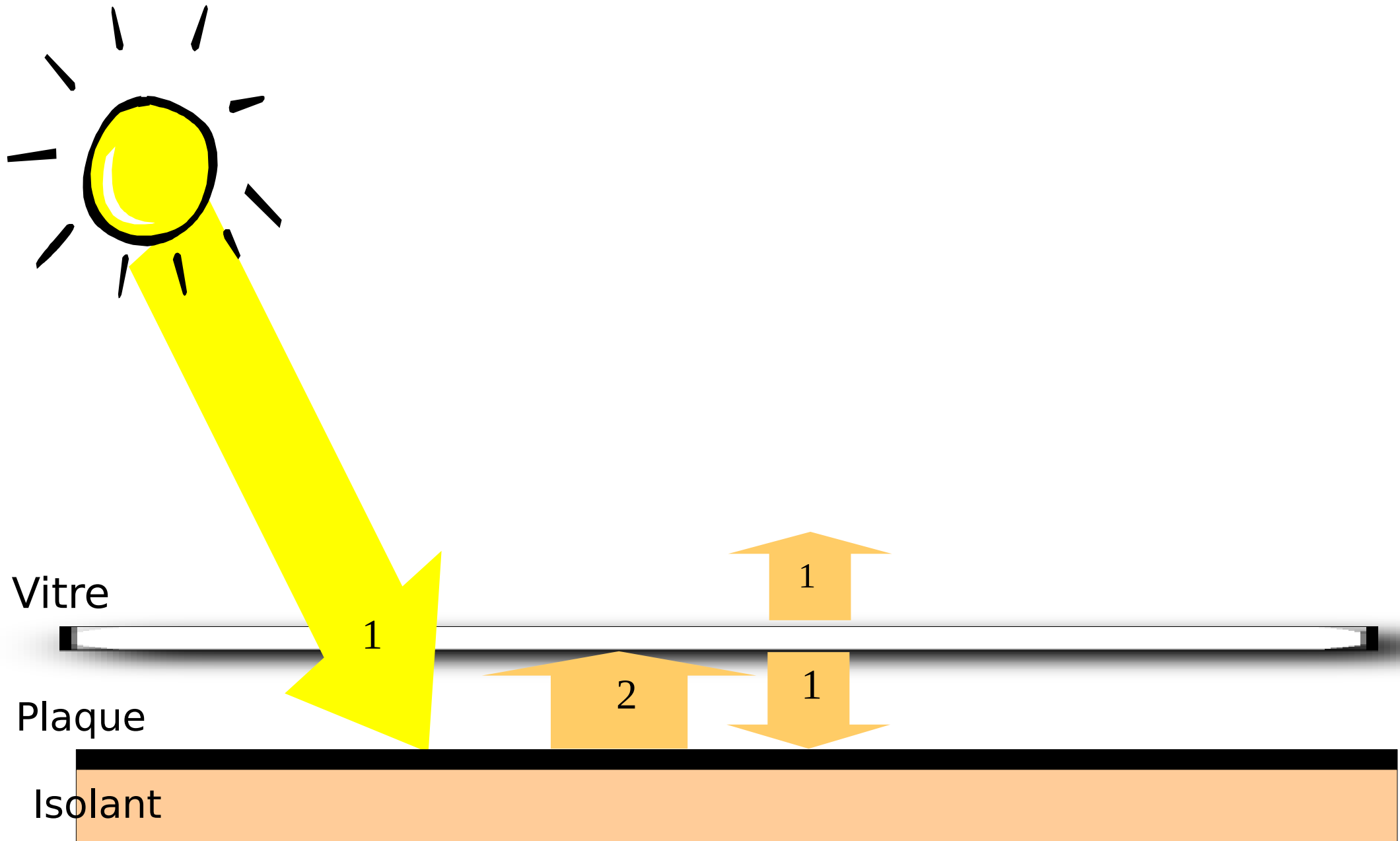
$$G = F_s - F_e$$

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

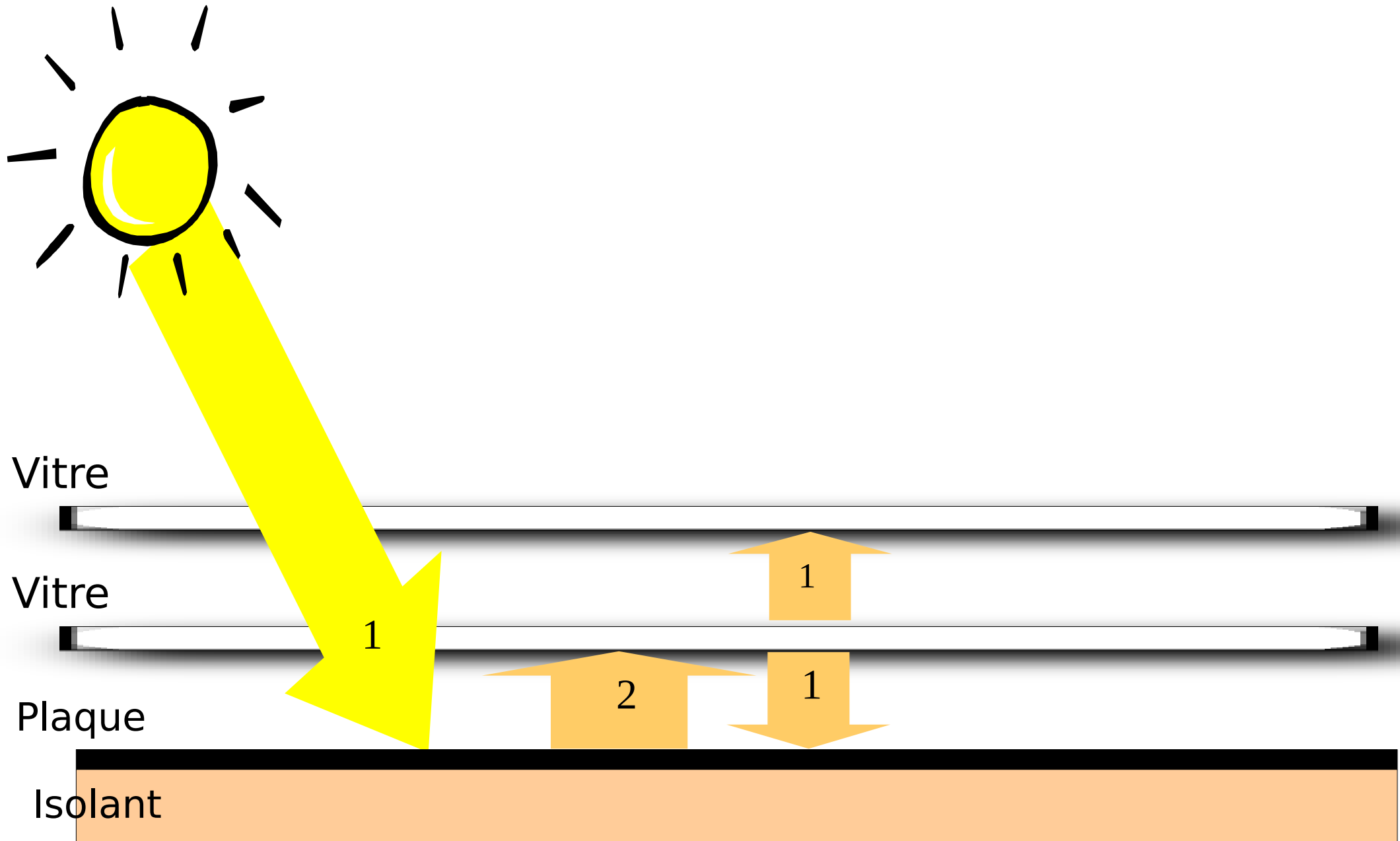
Total	150	
Vapeur d'eau	75	50
CO ₂	32	21
ozone	10	7
N ₂ O+CH ₄	8	5
Nuages	25	17



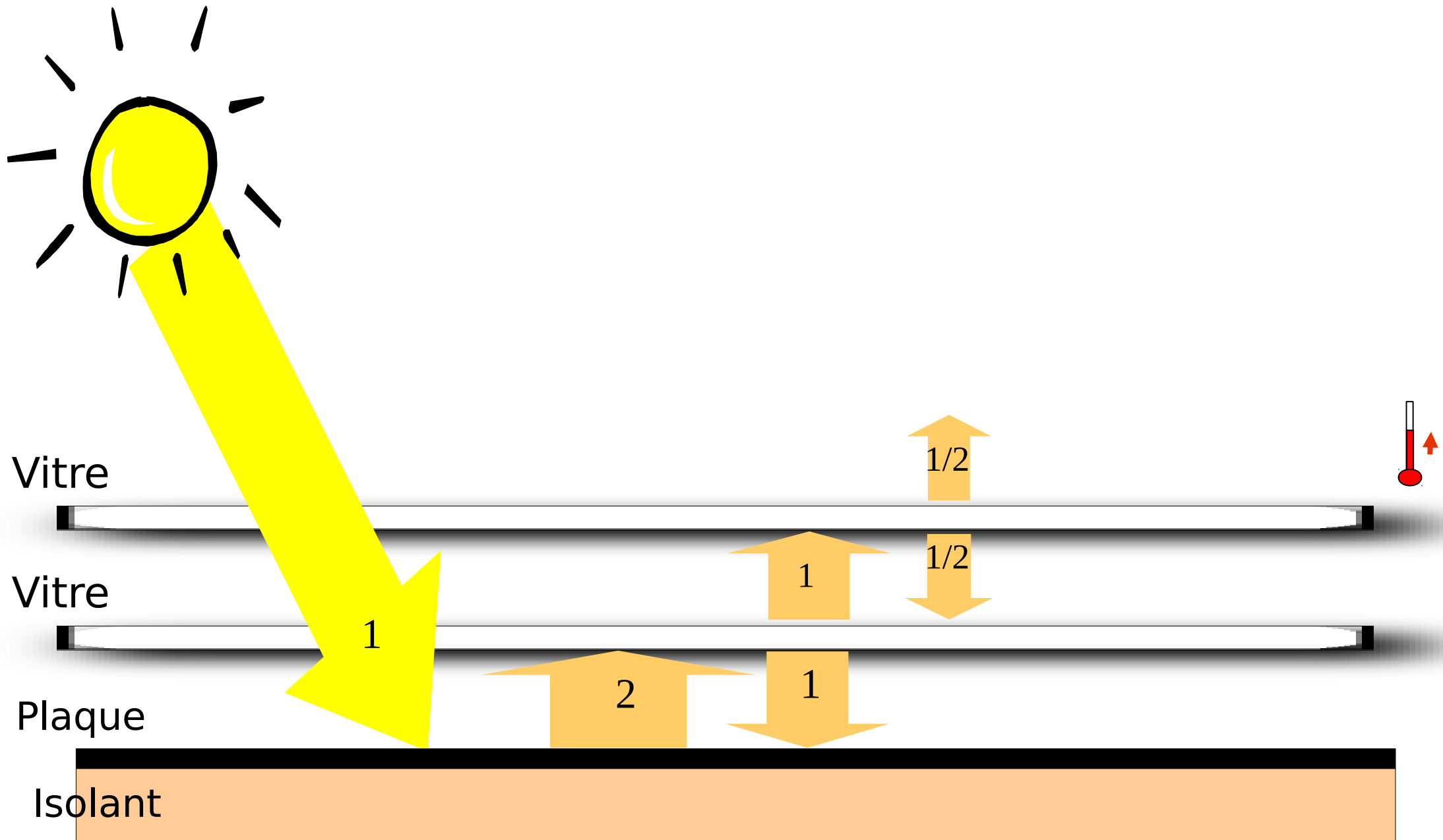
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



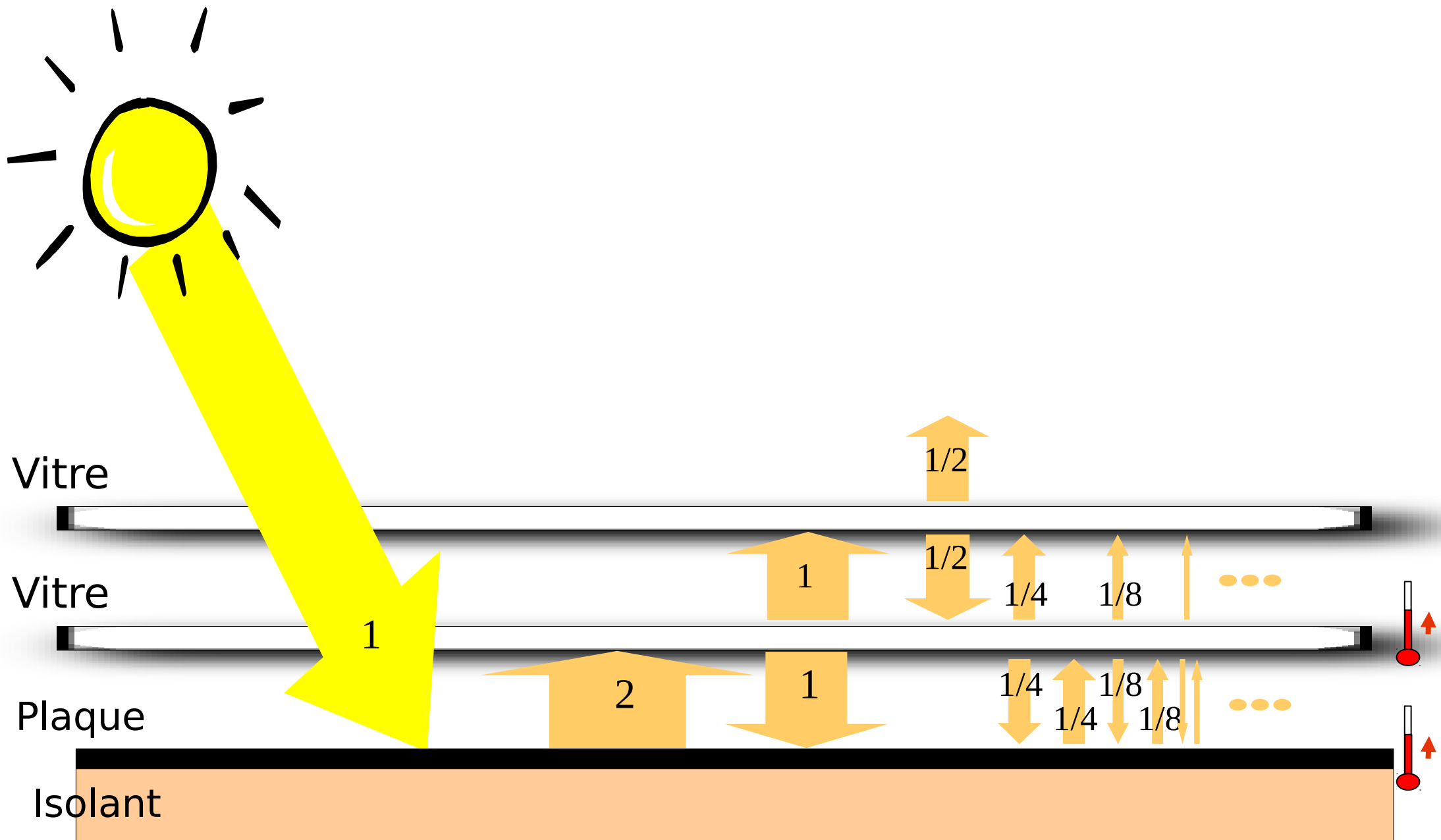
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



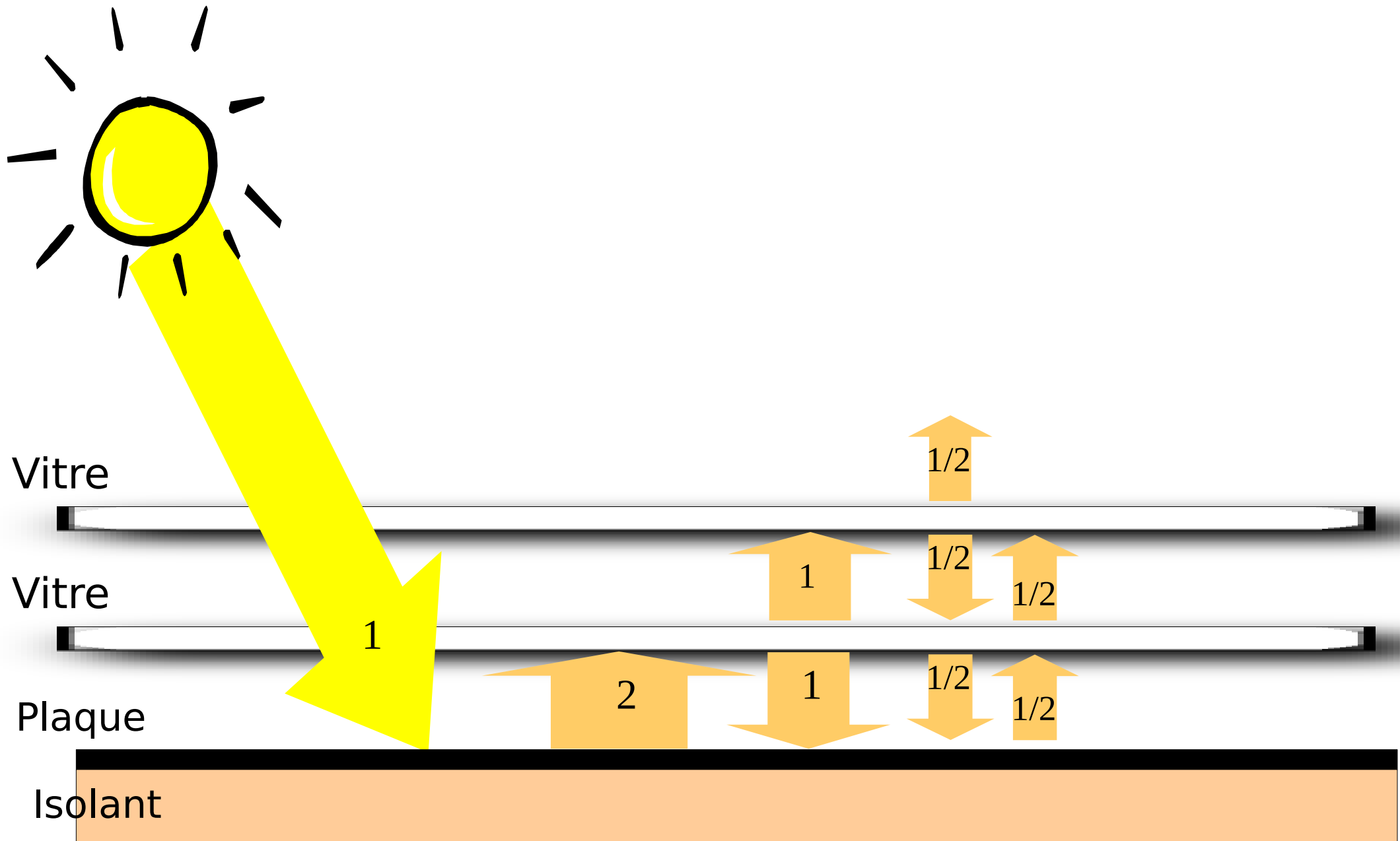
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



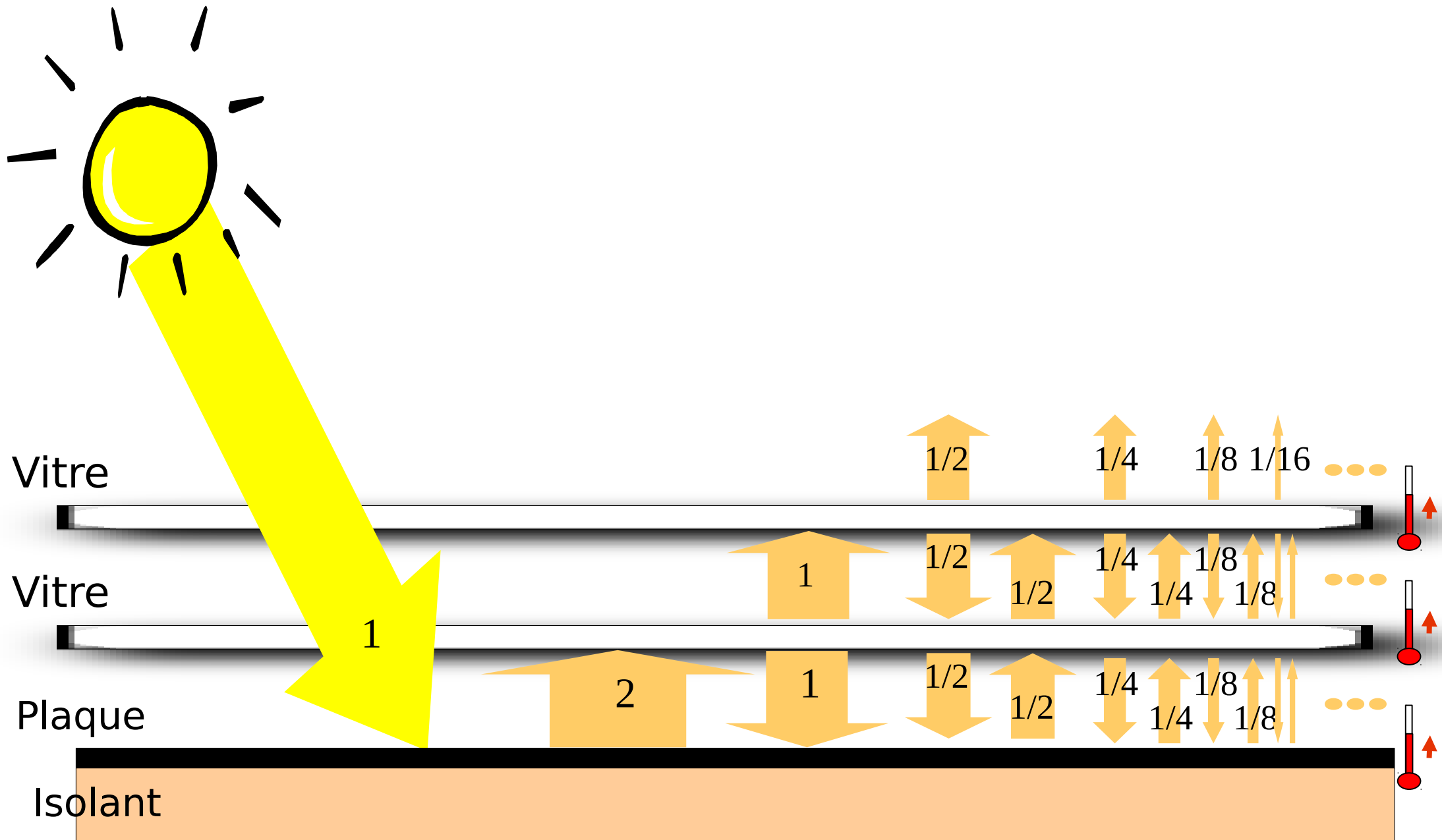
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



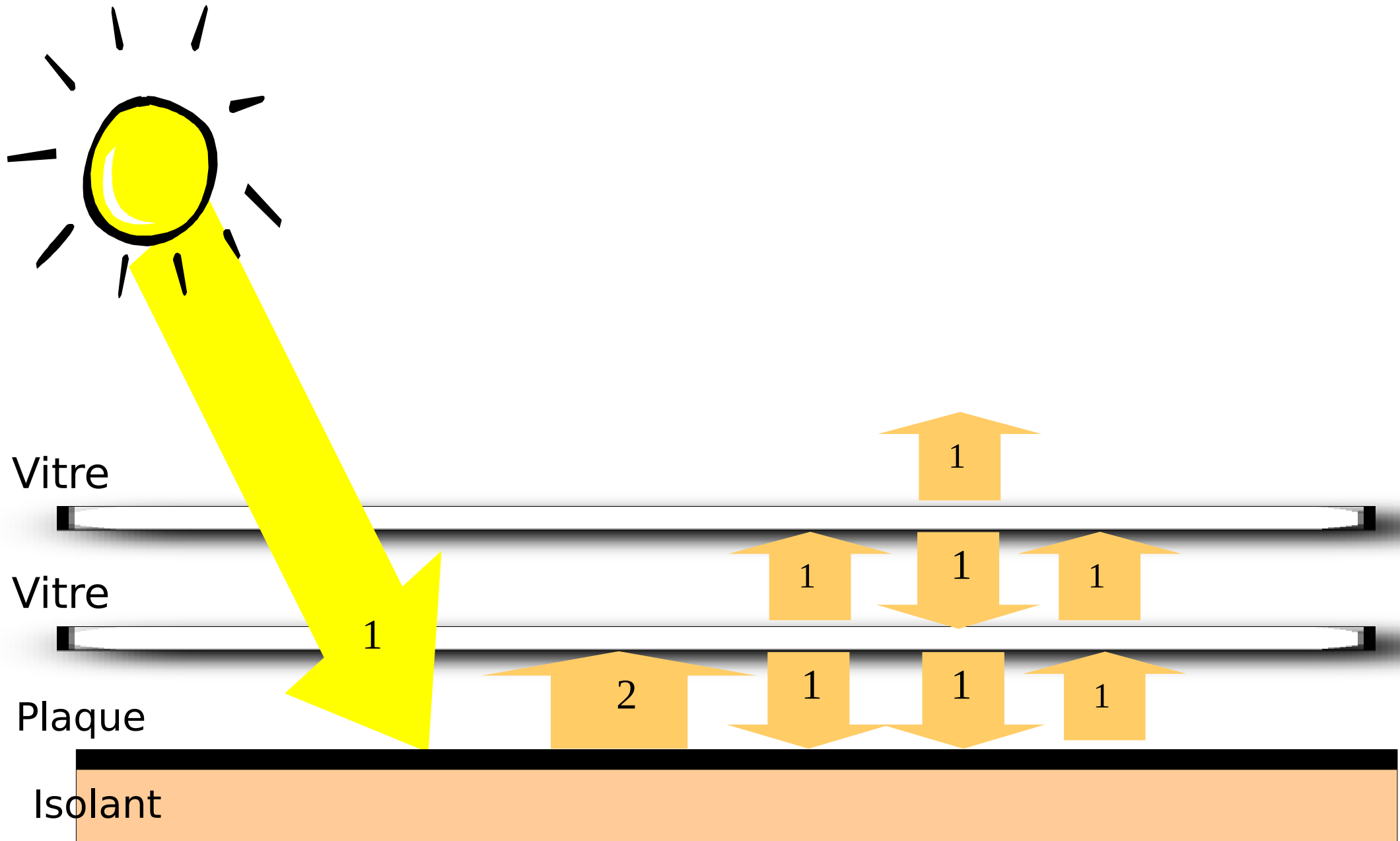
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



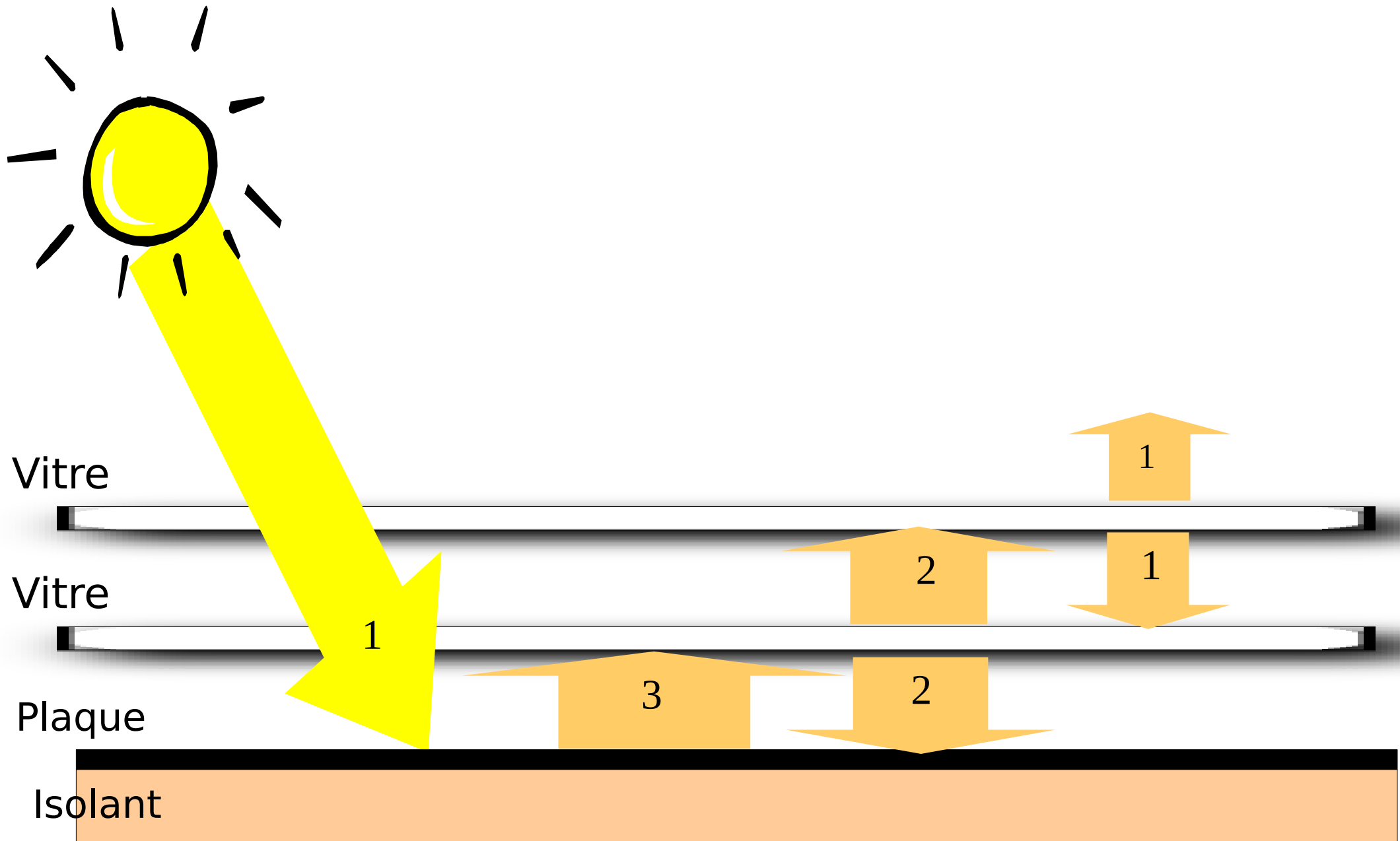
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



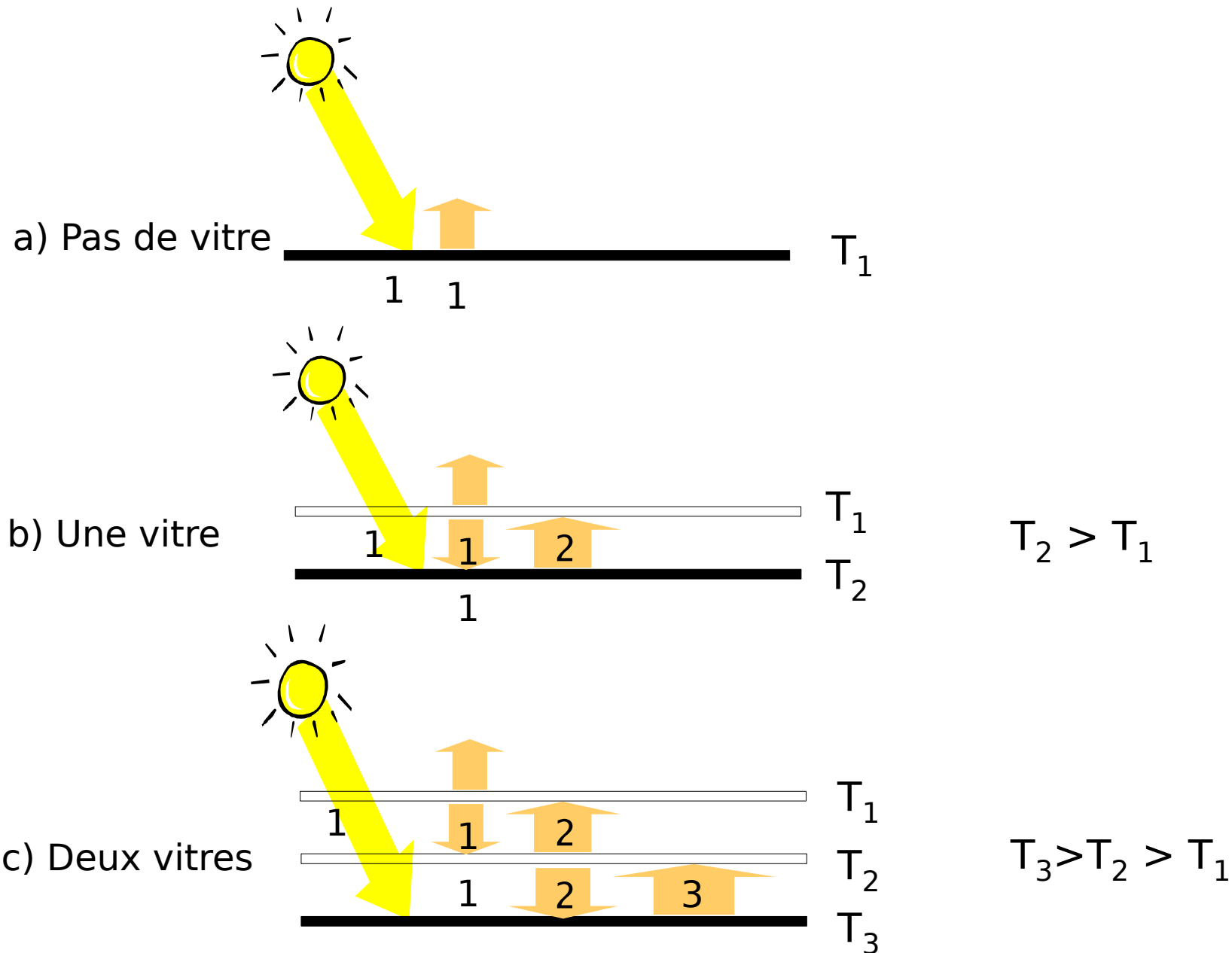
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



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

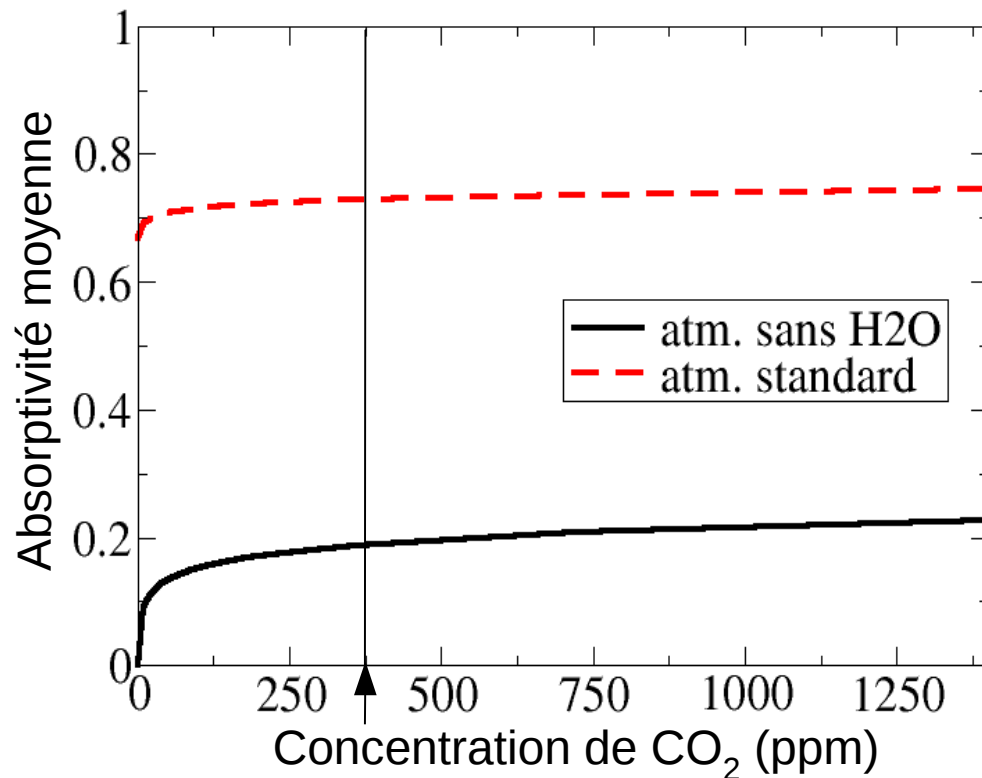


6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?

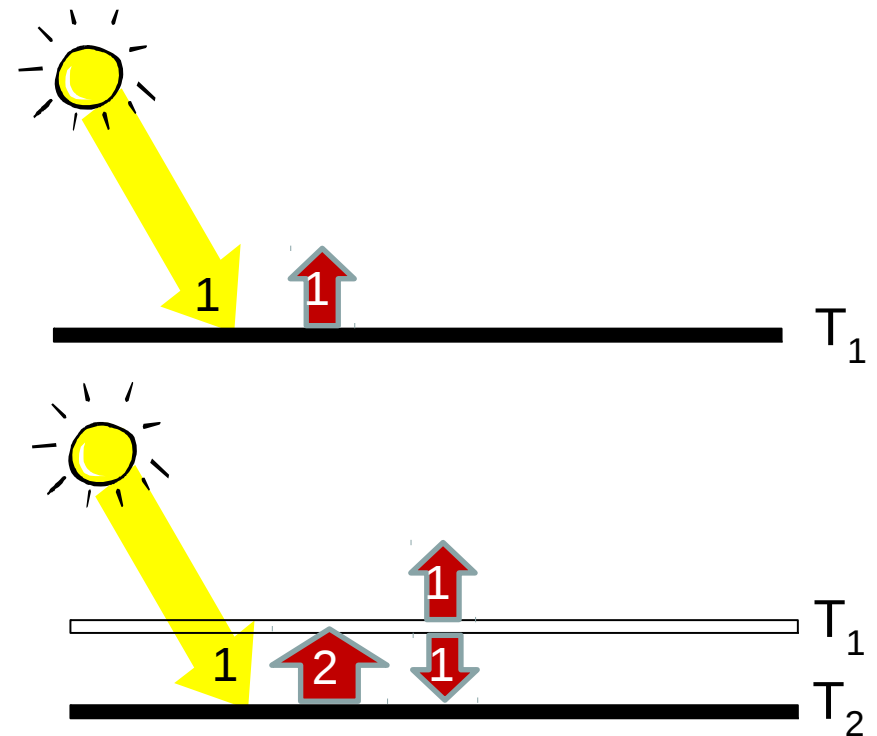


Accroissement de CO_2 et effet de serre

Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO_2 , pour différentes valeurs de H_2O



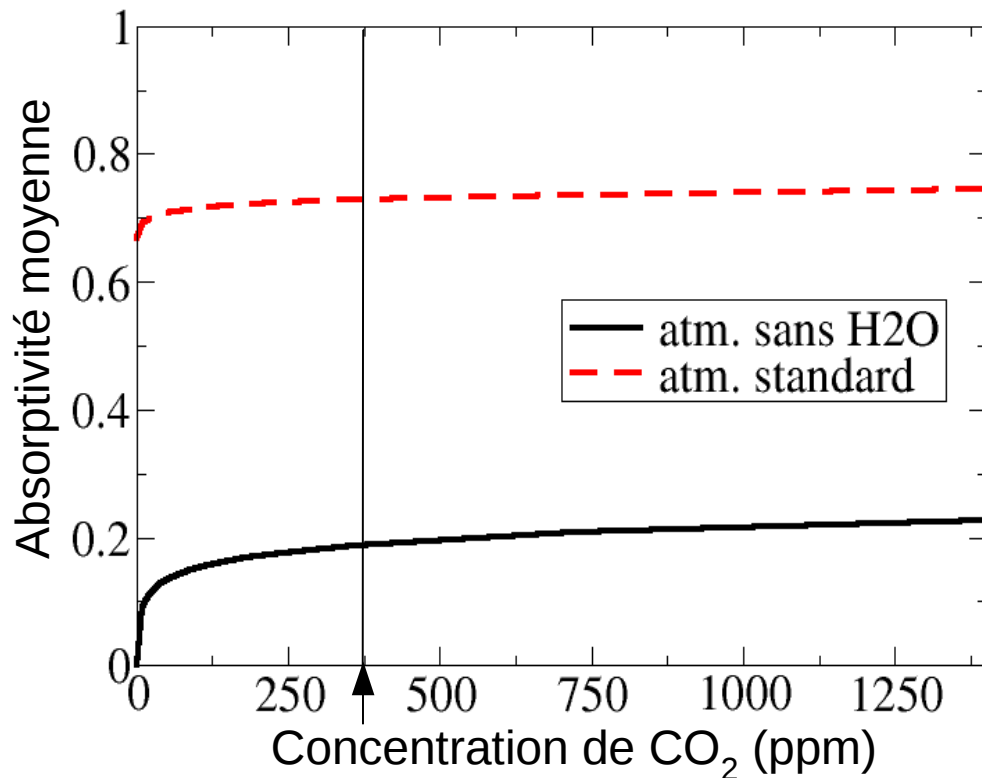
L'analogie de l'effet de serre



A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO_2 ?

Accroissement de CO₂ et effet de serre

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

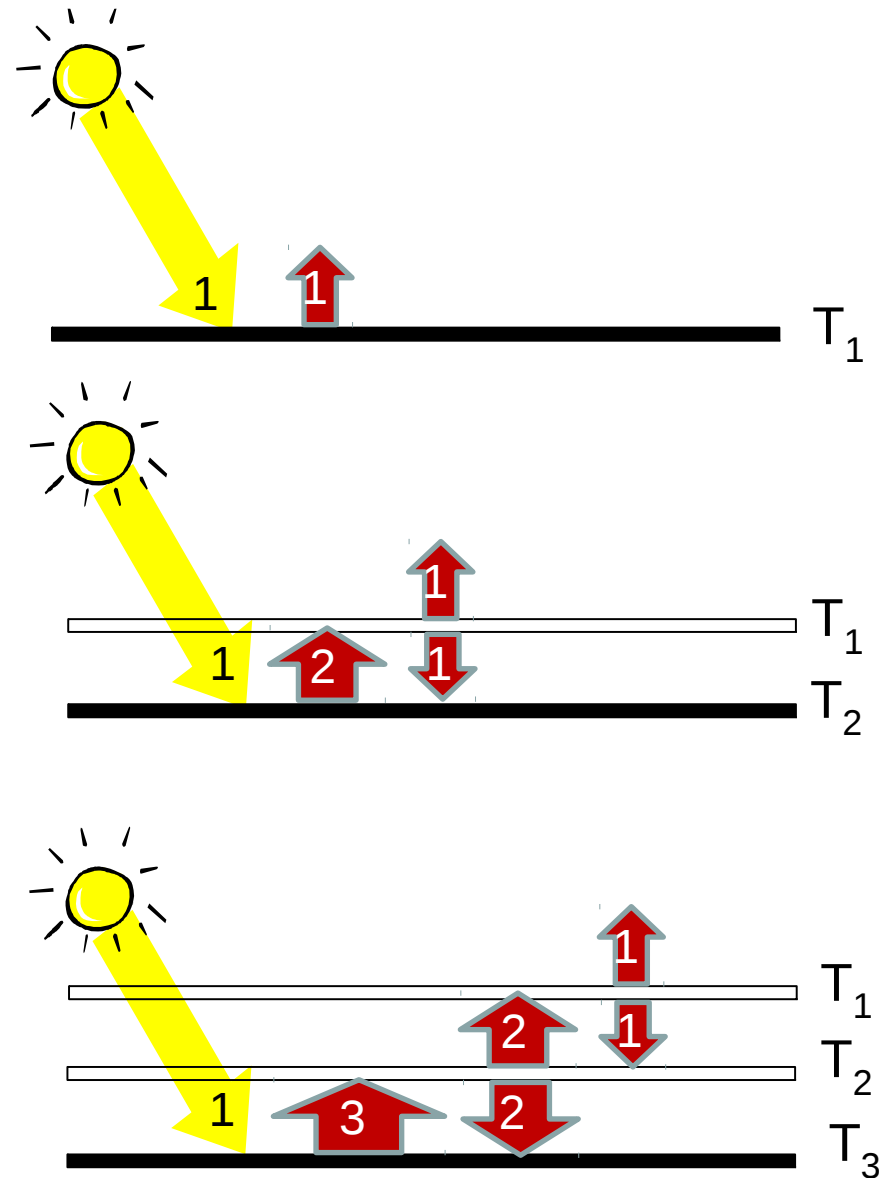


A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO₂?

NON!

(Dufresne Treiner 2012)

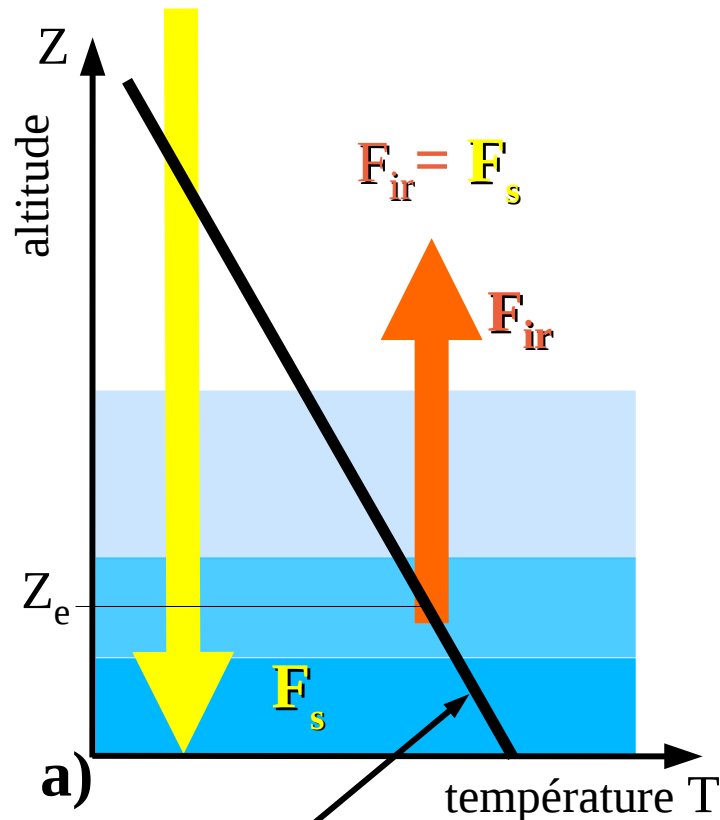
L'analogie de l'effet de serre



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

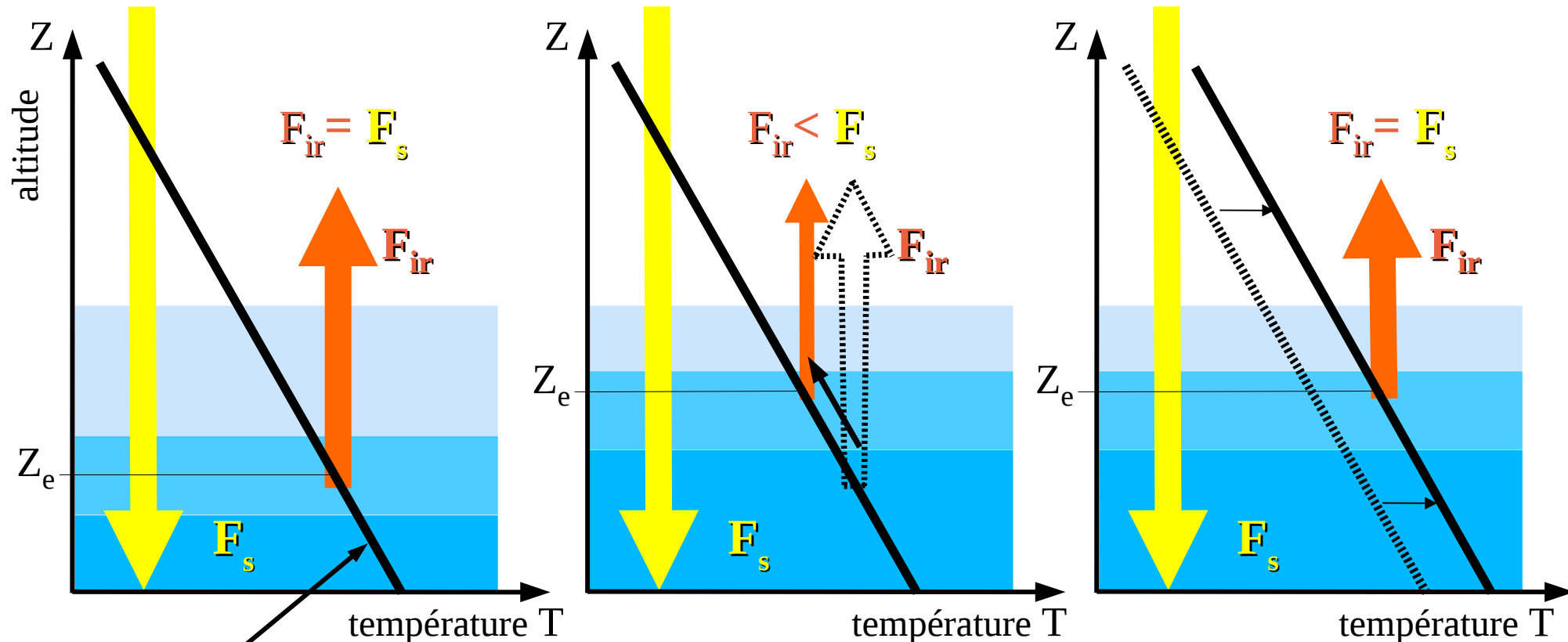
- Haute atmosphère: peu d'émission et peu d'absorption du rayonnement IR
- Moyenne atmosphère: les photons émis vers le haut atteignent l'espace
- Basse atmosphère: les photons émis vers le haut sont absorbés et n'atteignent pas l'espace

dT/dz fixé
par convection

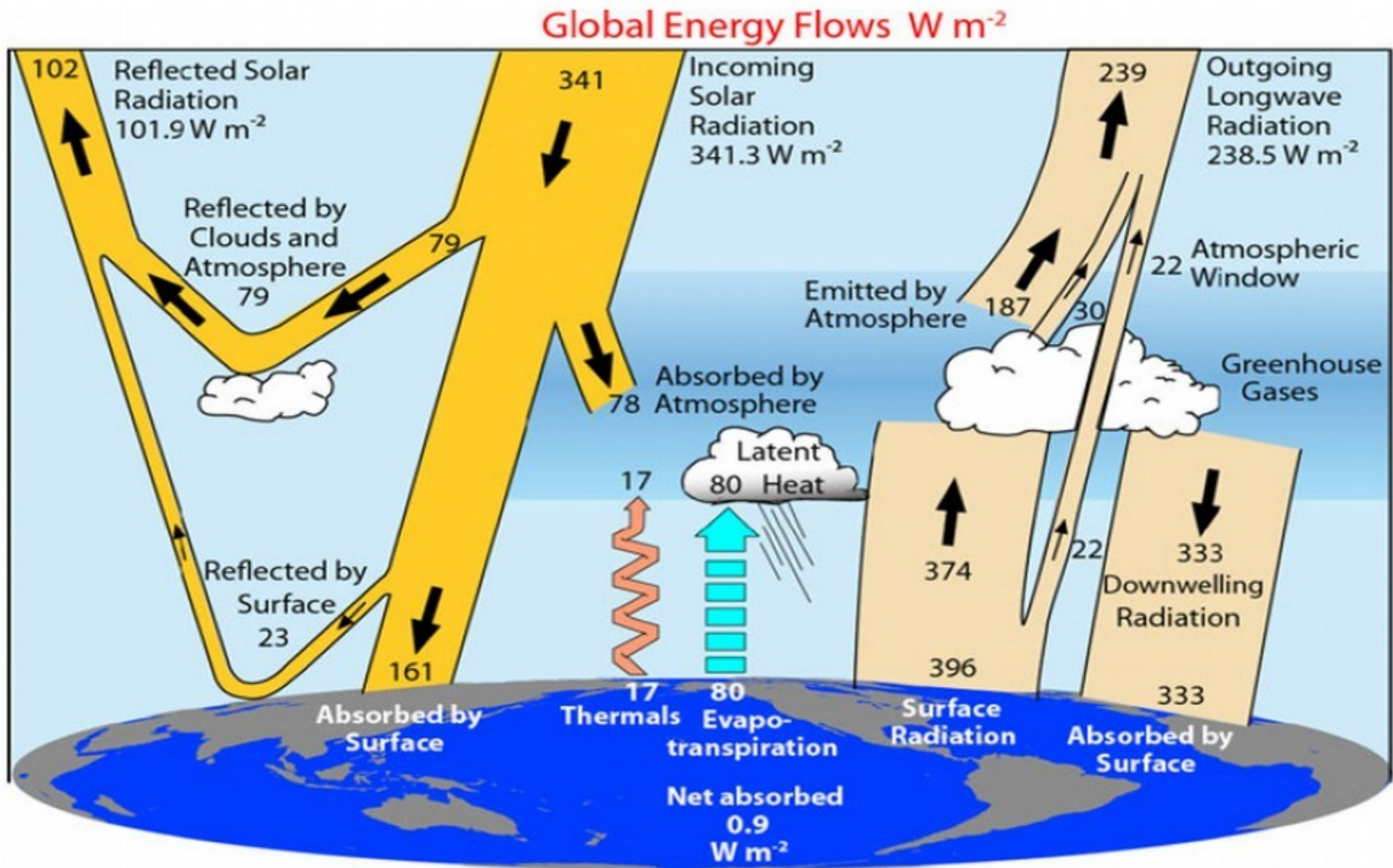
Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net F_s

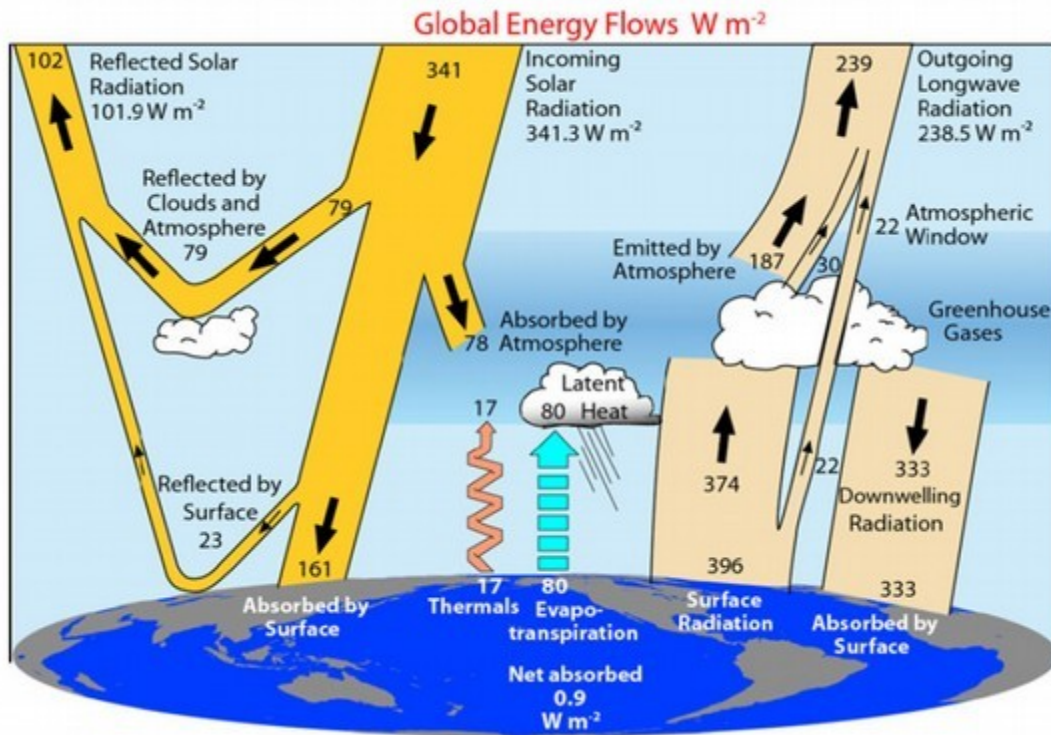
Rayonnement IR sortant F_{ir}



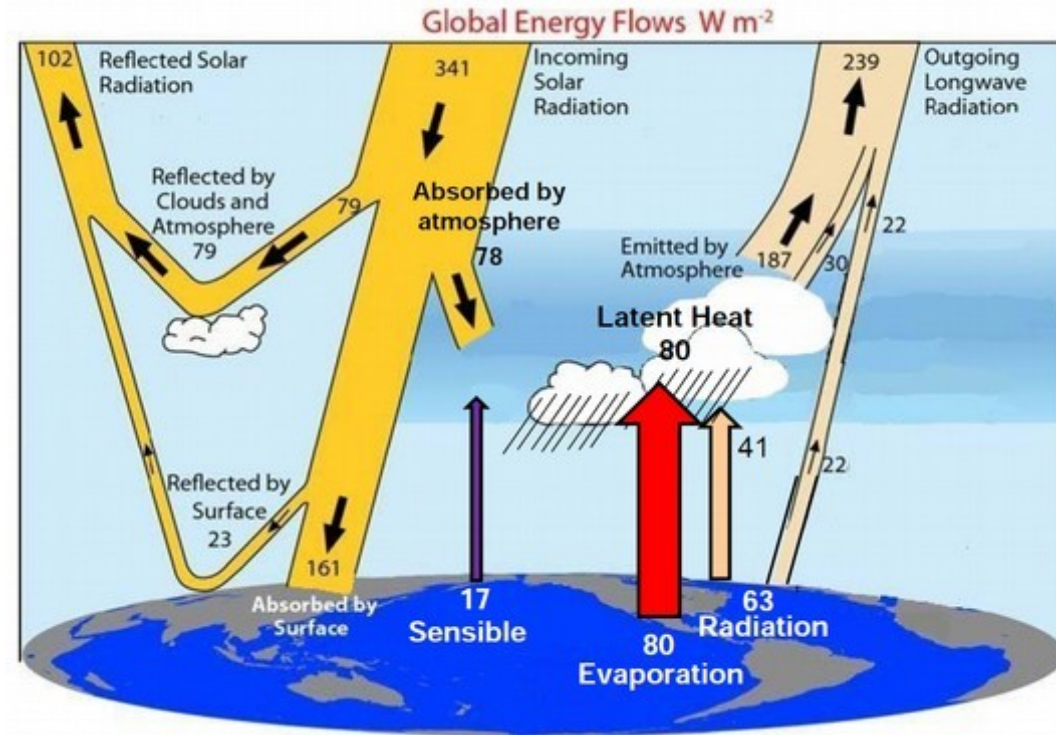
Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



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 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

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 :

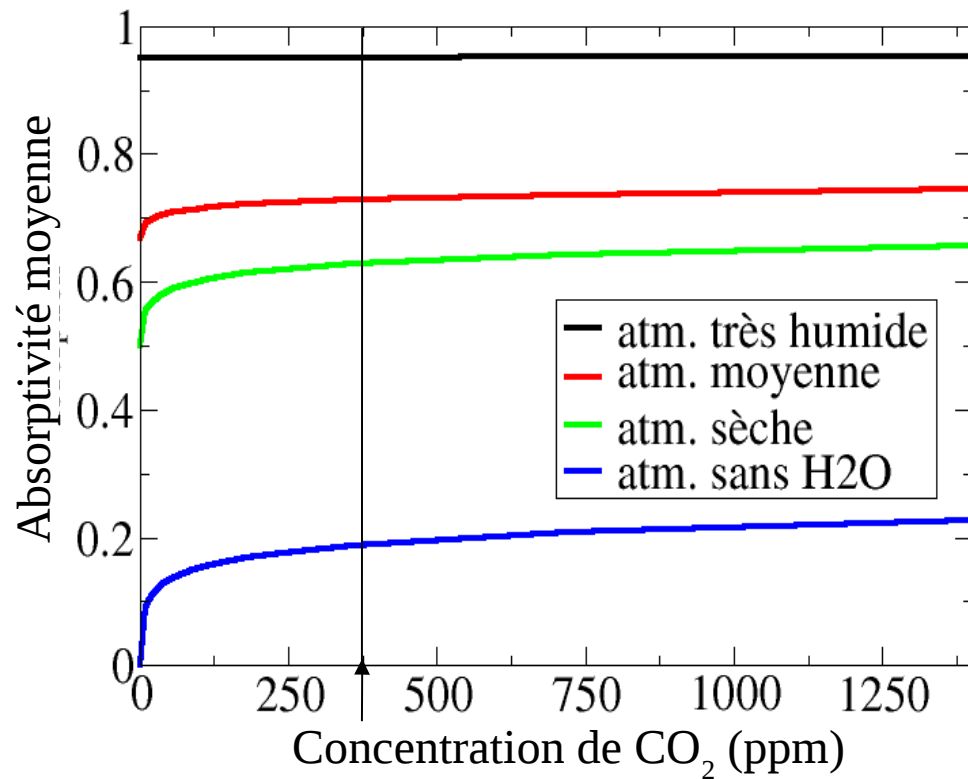
- L'effet de serre atmosphérique: plus subtil qu'on ne le croit! Dufresne J.-L., J. Treiner, La météorologie, No. 72, pp. 31-41, février 2011.
<http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/39839>



Merci de votre attention

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

