



# Les modèles utilisés en sciences du climat

Jean-Yves Grandpeix (& Jean-Louis Dufresne)

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

Cette présentation : [www.lmd.jussieu.fr/~jyg/MNHN2015/jyg.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jyg/MNHN2015/jyg.pdf)

# Plan

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**

# Physique du climat : l'effet de serre

1) L'émission de rayonnement

2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

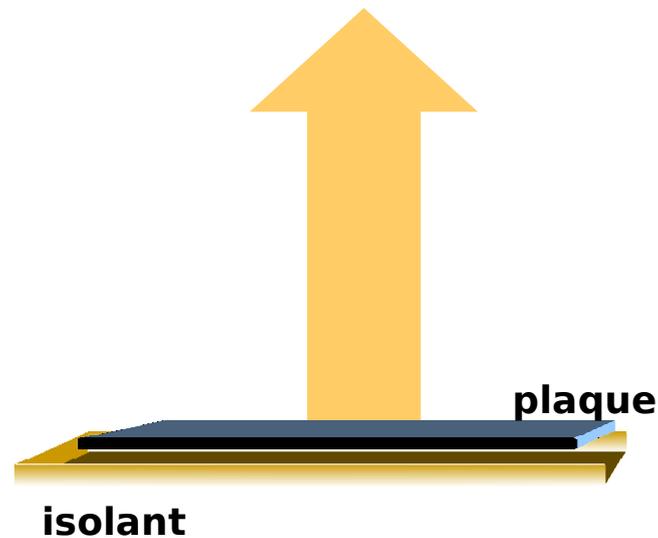
3) L'équilibre énergétique

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

5) L'effet de serre

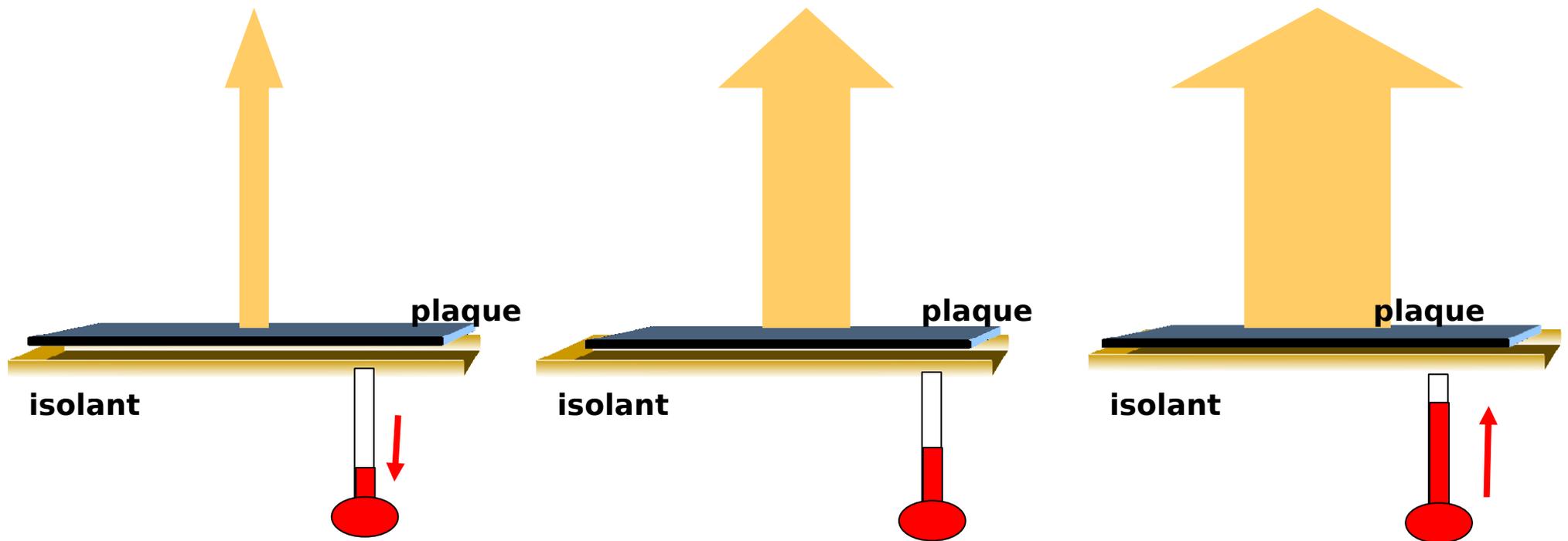
6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?

# 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

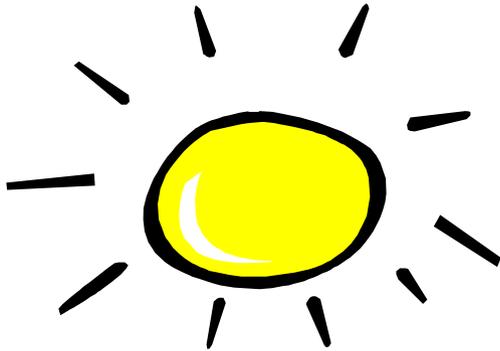


*b) Plus la température du corps est élevée, plus l'énergie perdue est élevée*

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

a) Si la température de l'objet est 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



Soleil :  
 $T = 6000^{\circ}\text{C}$



Lampe à filament :  
 $T = 2500^{\circ}\text{C}$



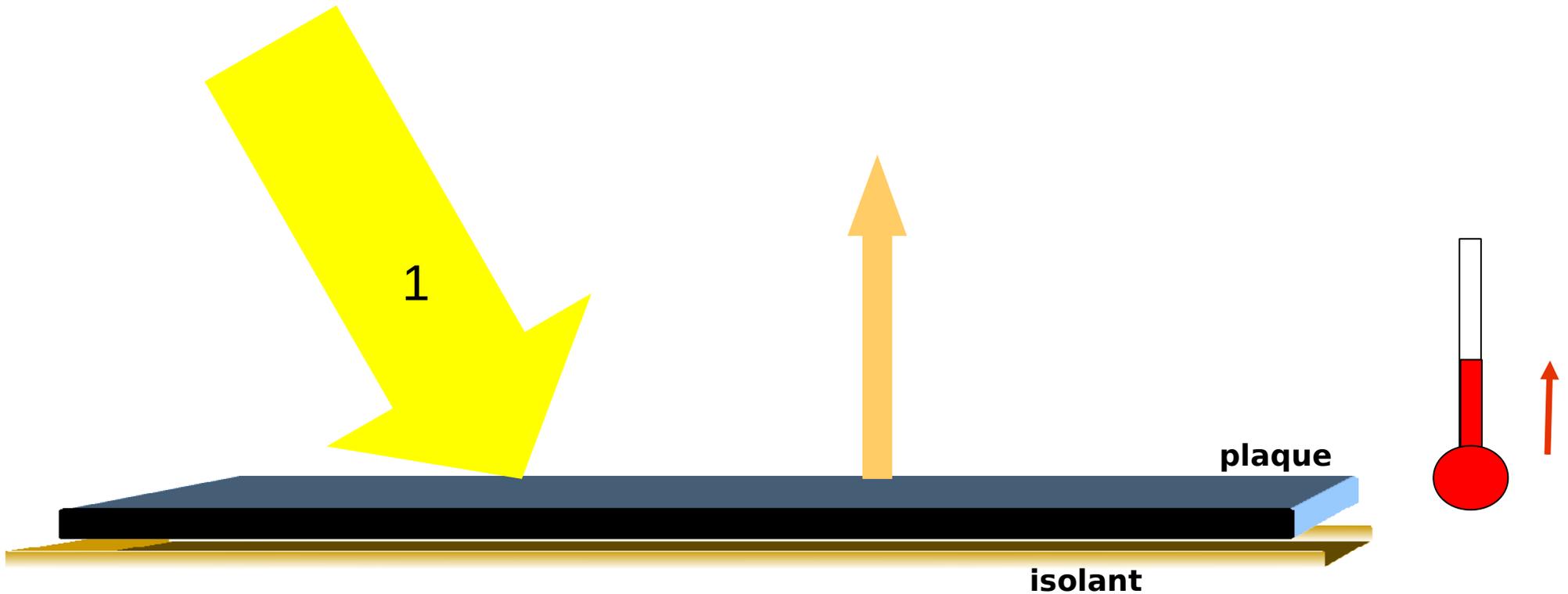
Lave de volcan  
 $T = 1000^{\circ}\text{C}$

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

b) Si la température de l'objet est inférieure à  $700^{\circ}\text{C}$ , le rayonnement émis par l'objet nous est invisible :

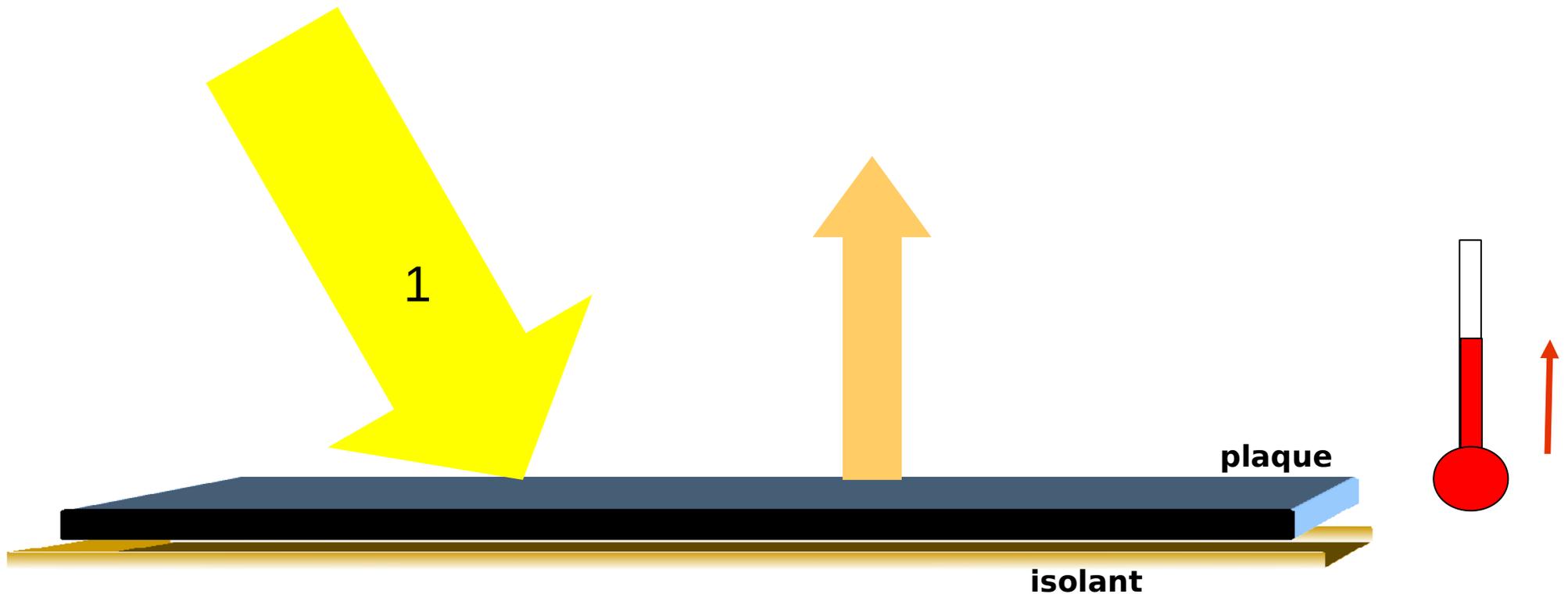
C'est le rayonnement infrarouge

### 3) L'équilibre énergétique



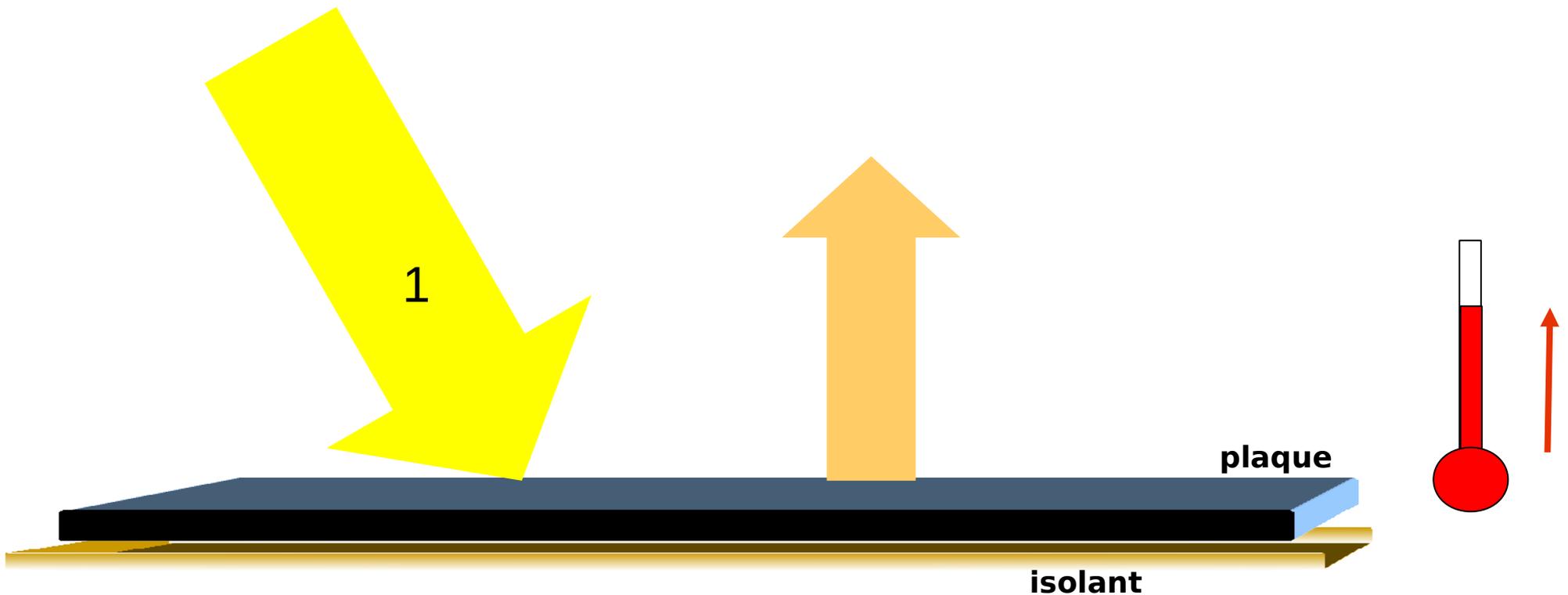
- Si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



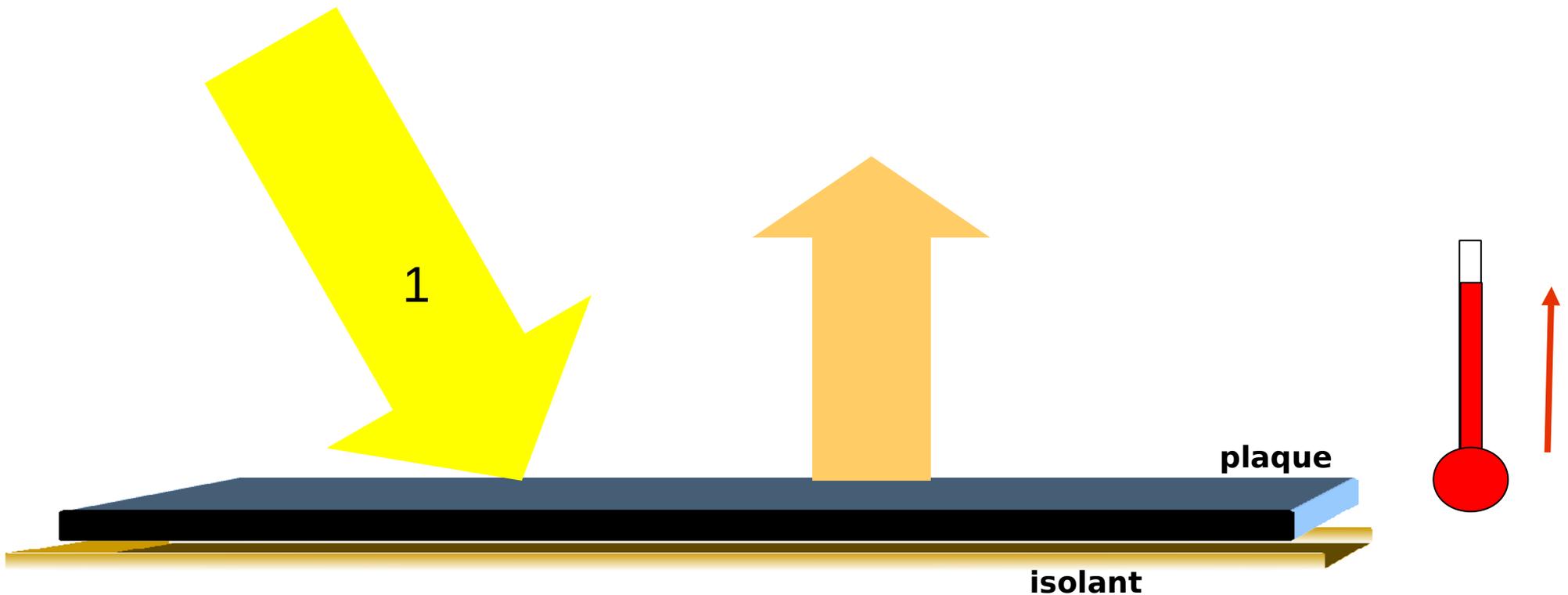
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



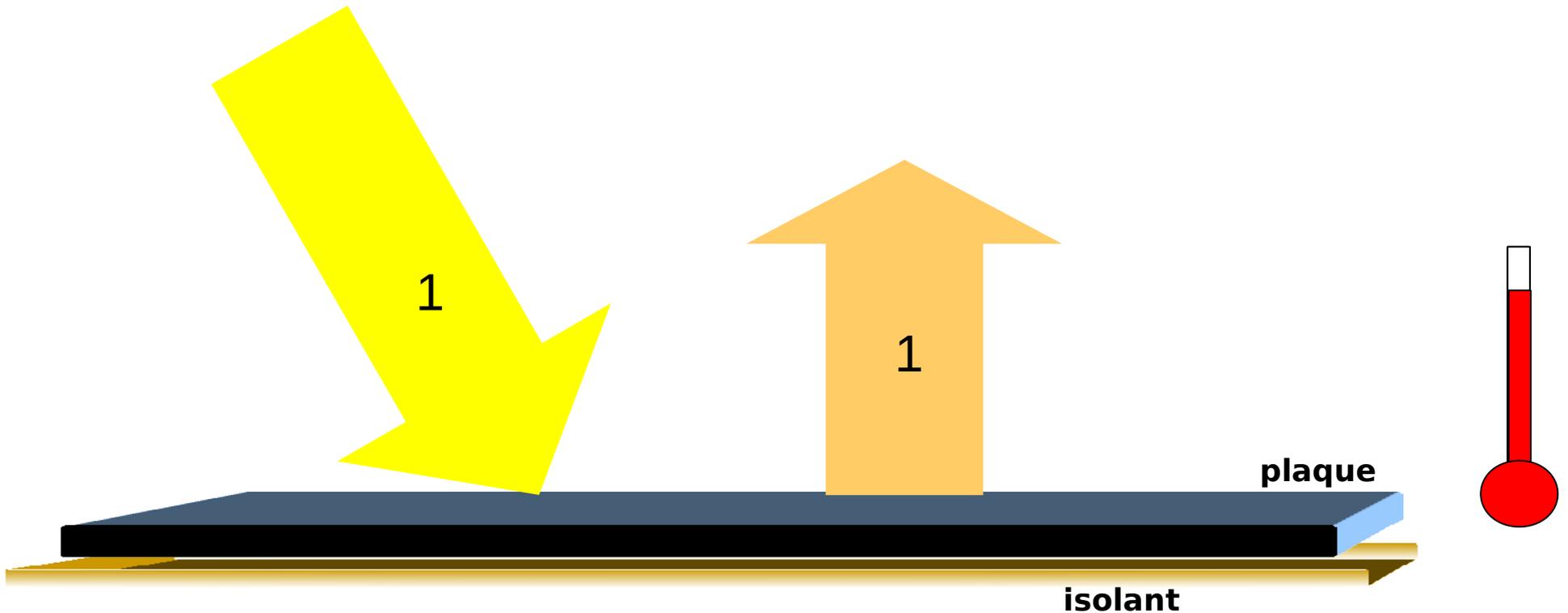
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



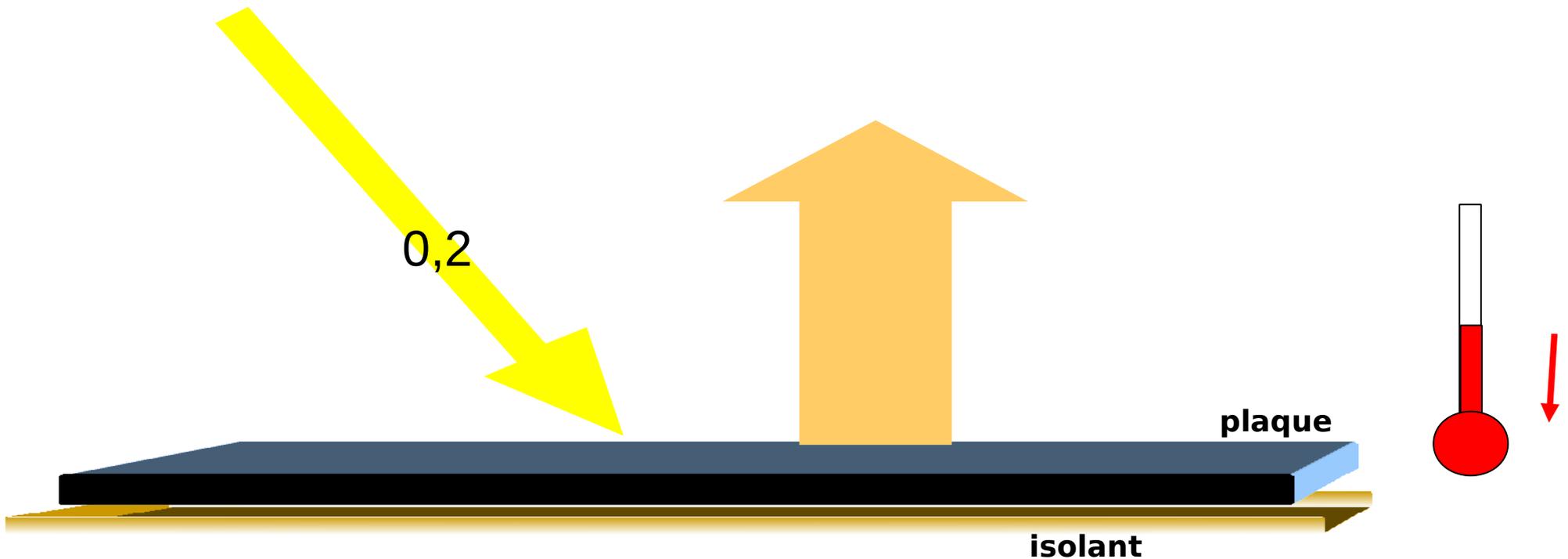
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



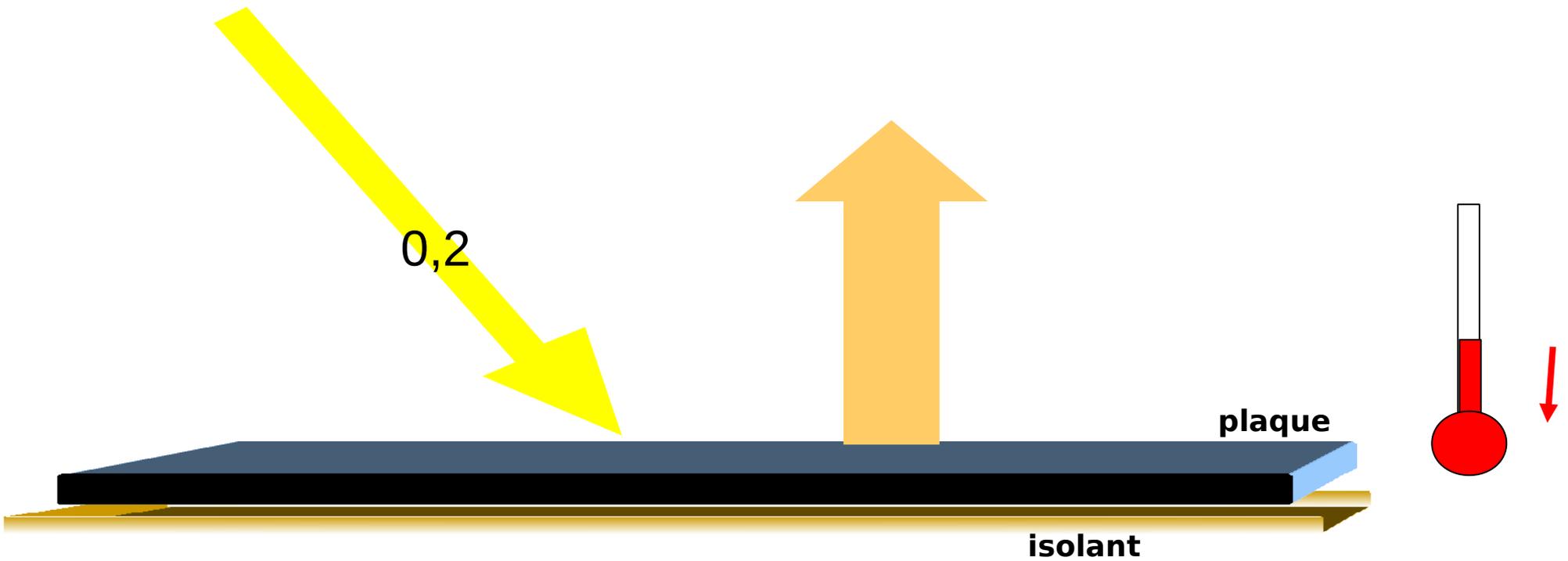
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

### 3) L'équilibre énergétique

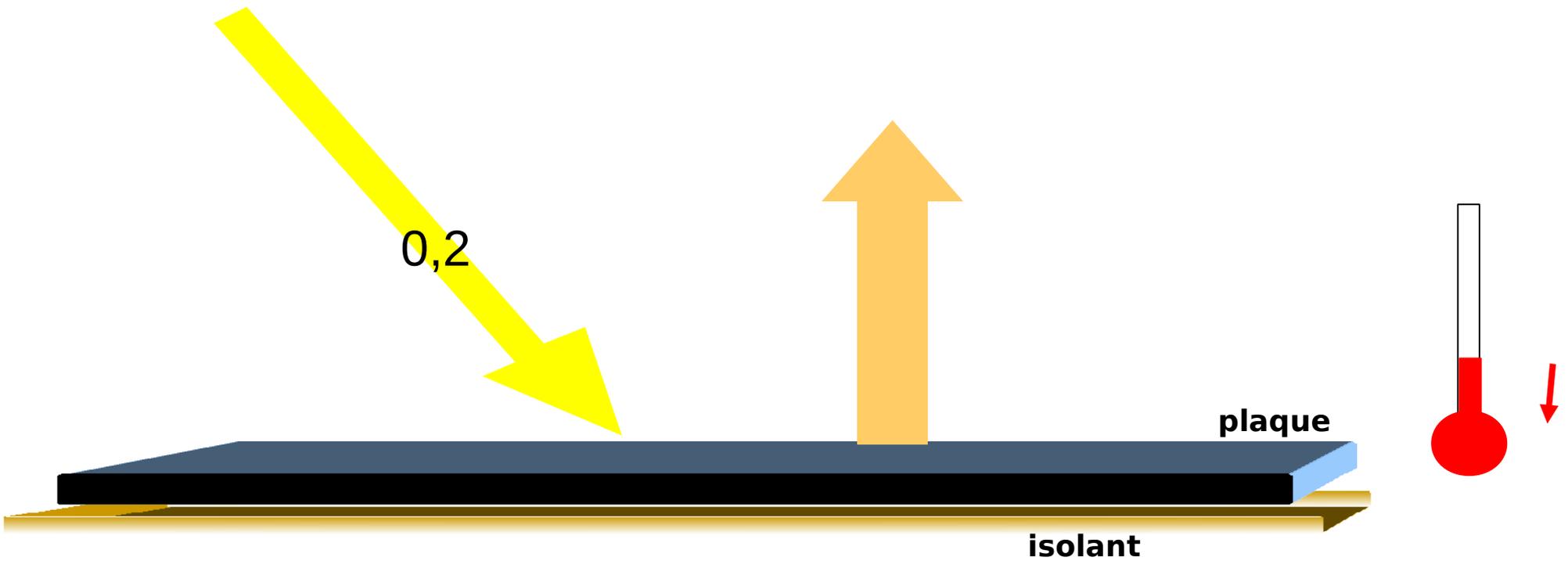


- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

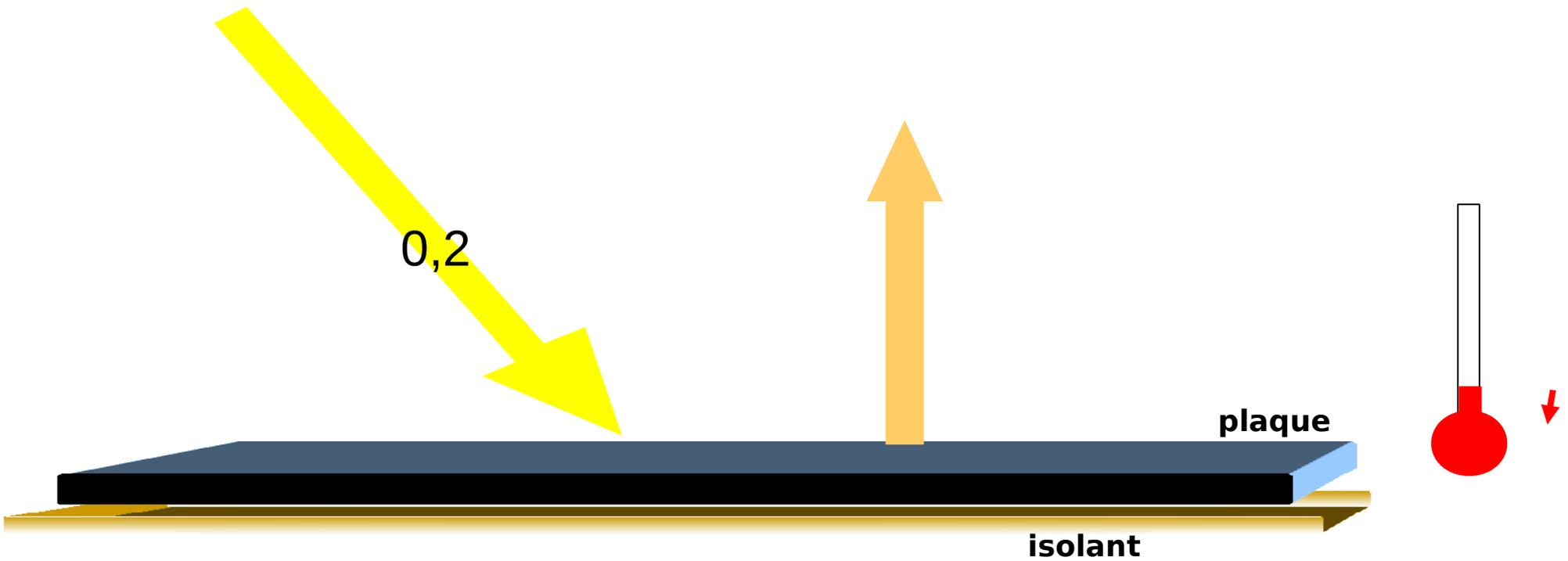
### 3) L'équilibre énergétique



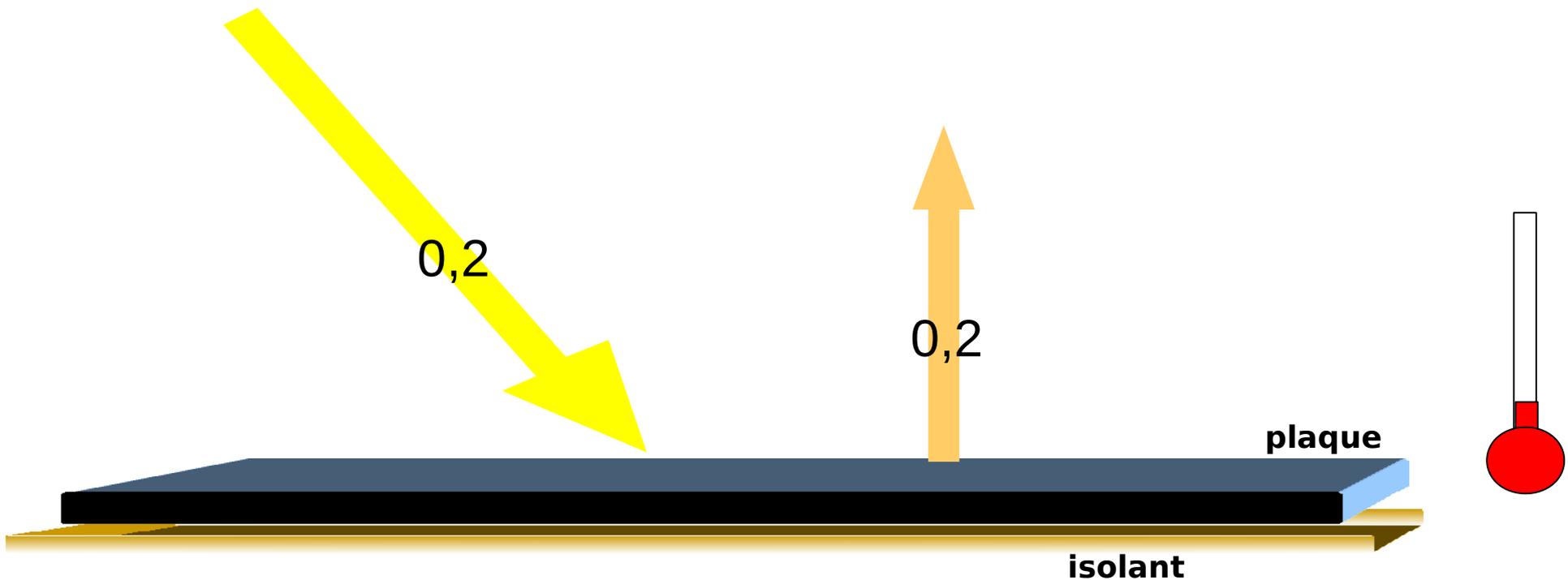
### 3) L'équilibre énergétique



### 3) L'équilibre énergétique

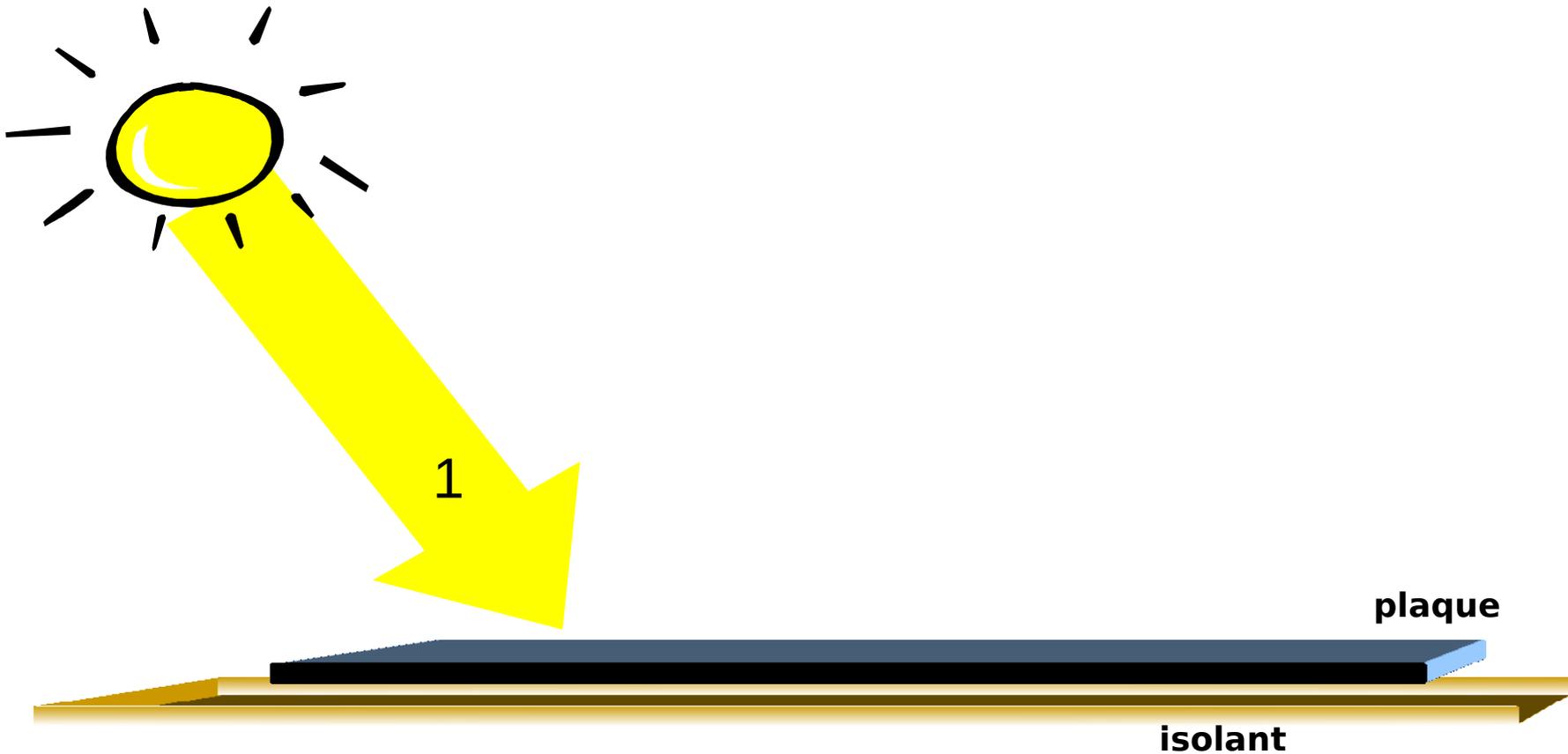


### 3) L'équilibre énergétique



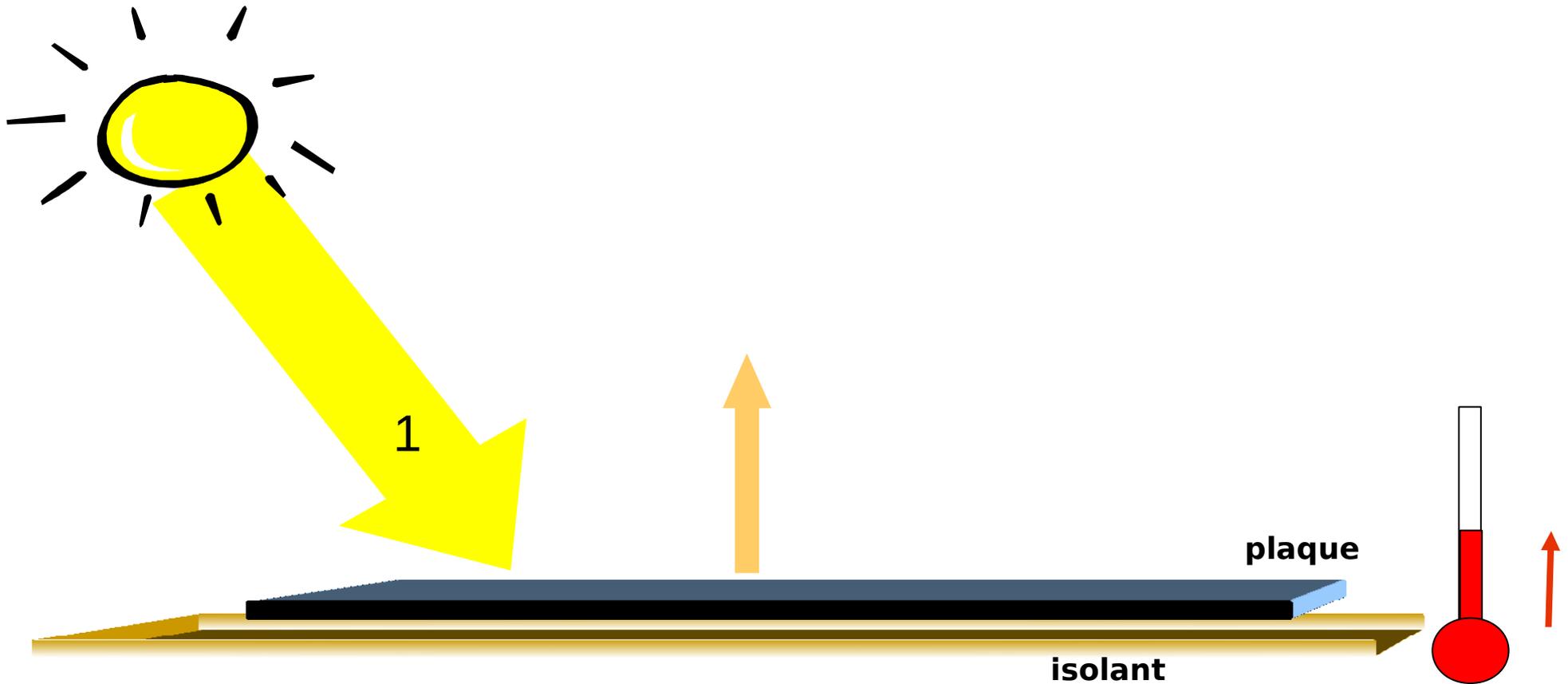
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

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



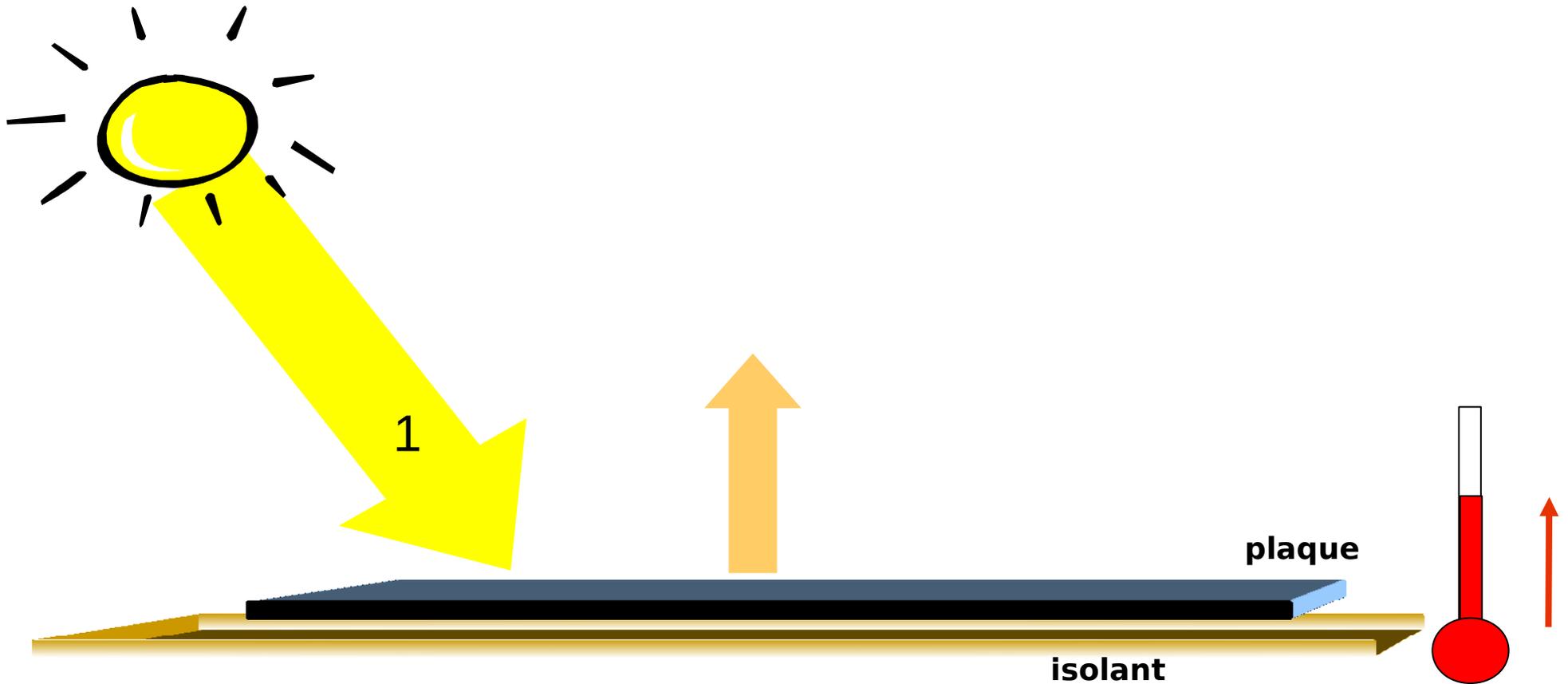
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.

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



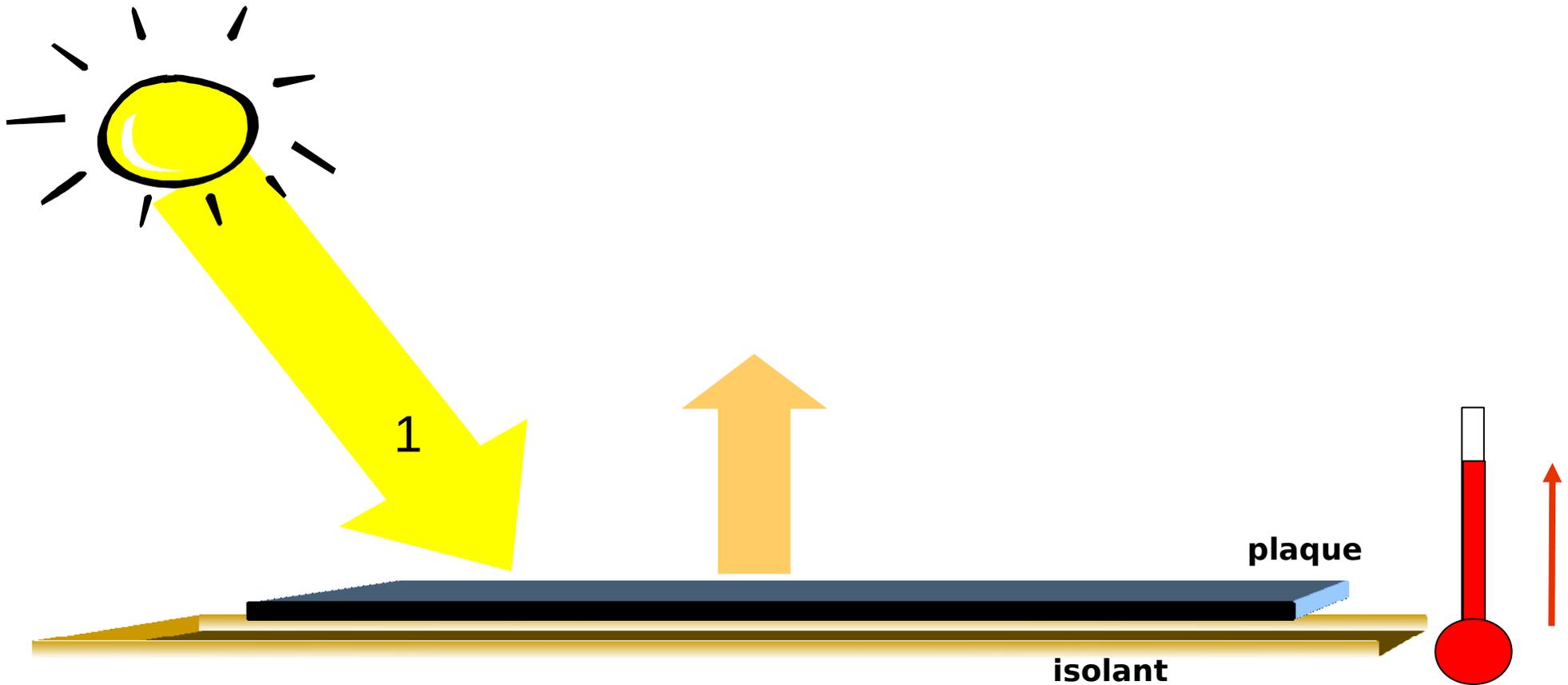
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



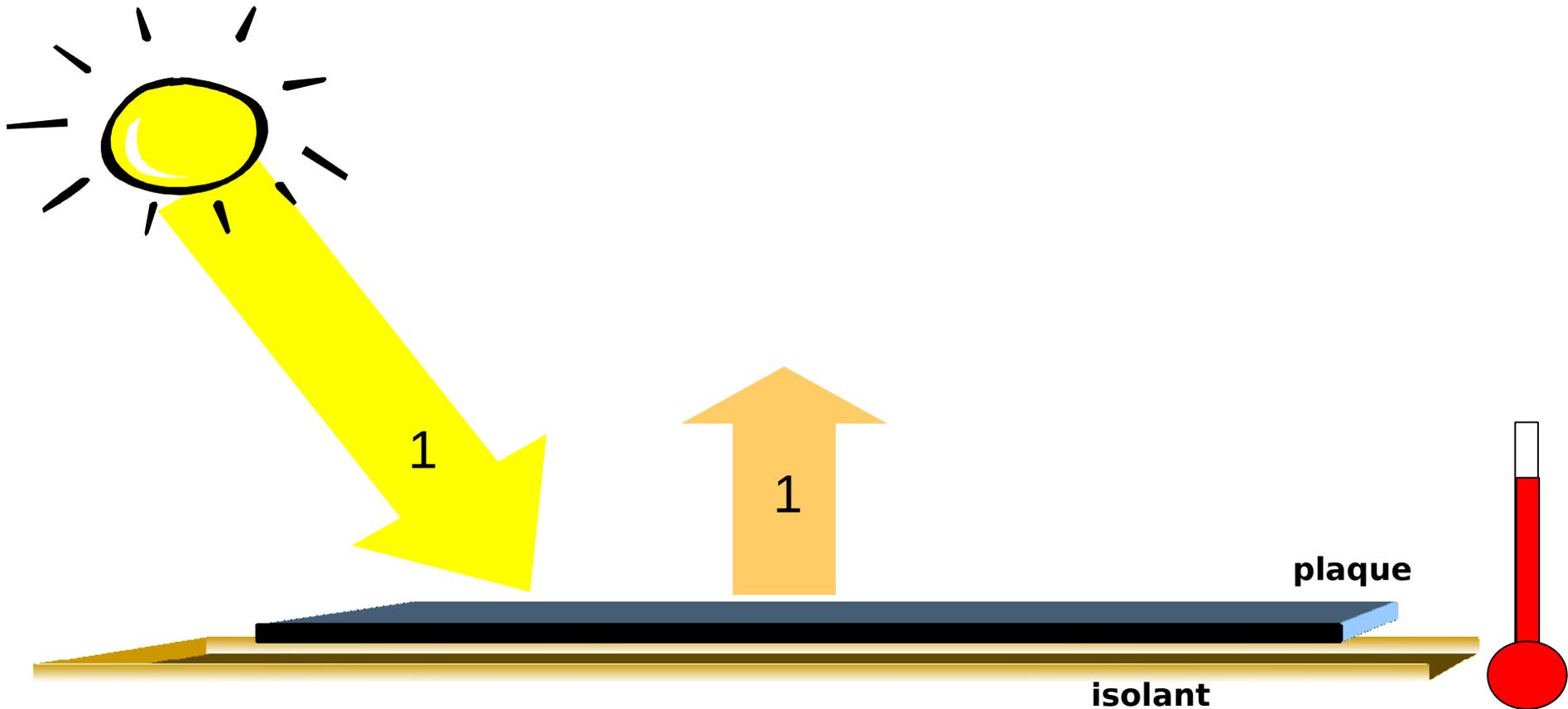
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



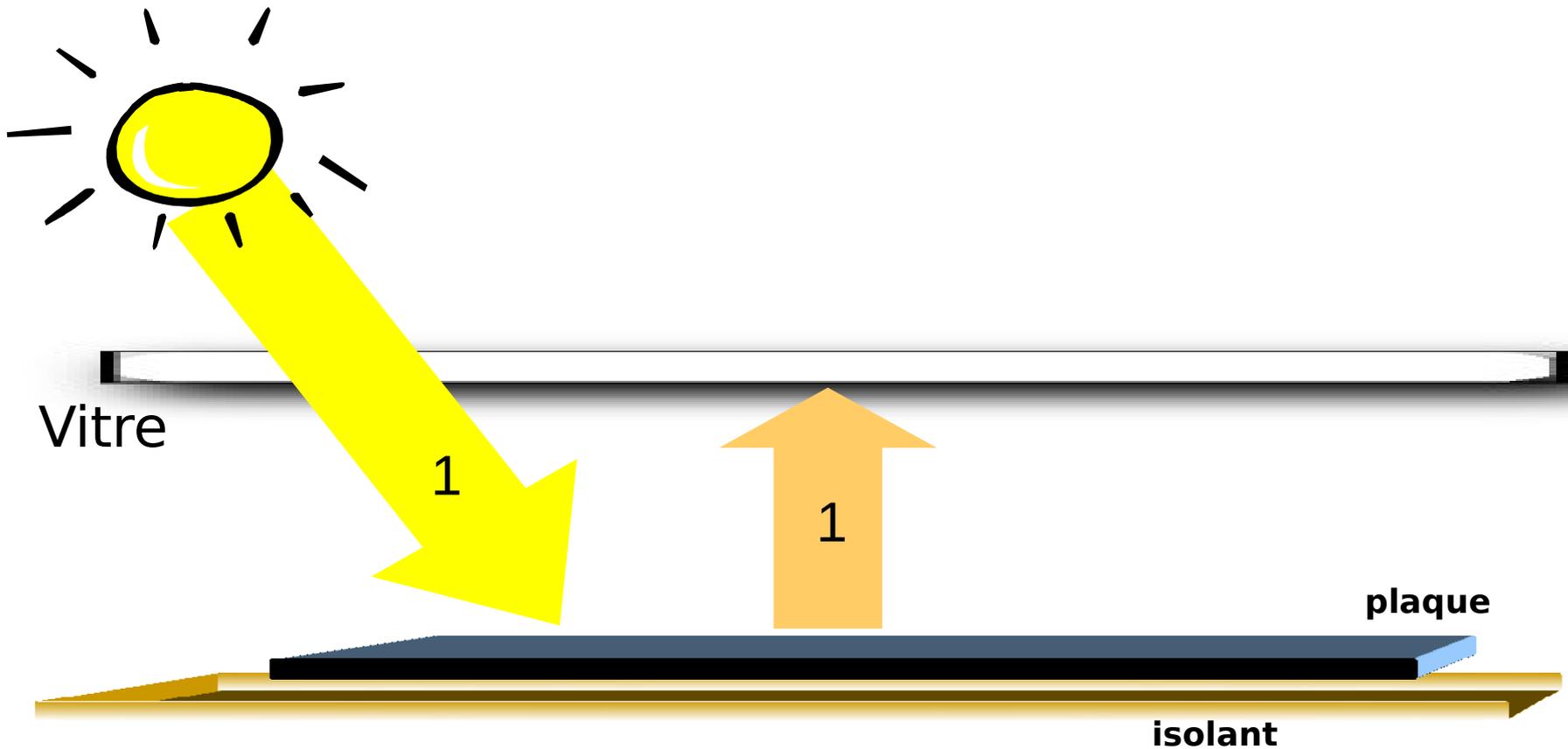
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



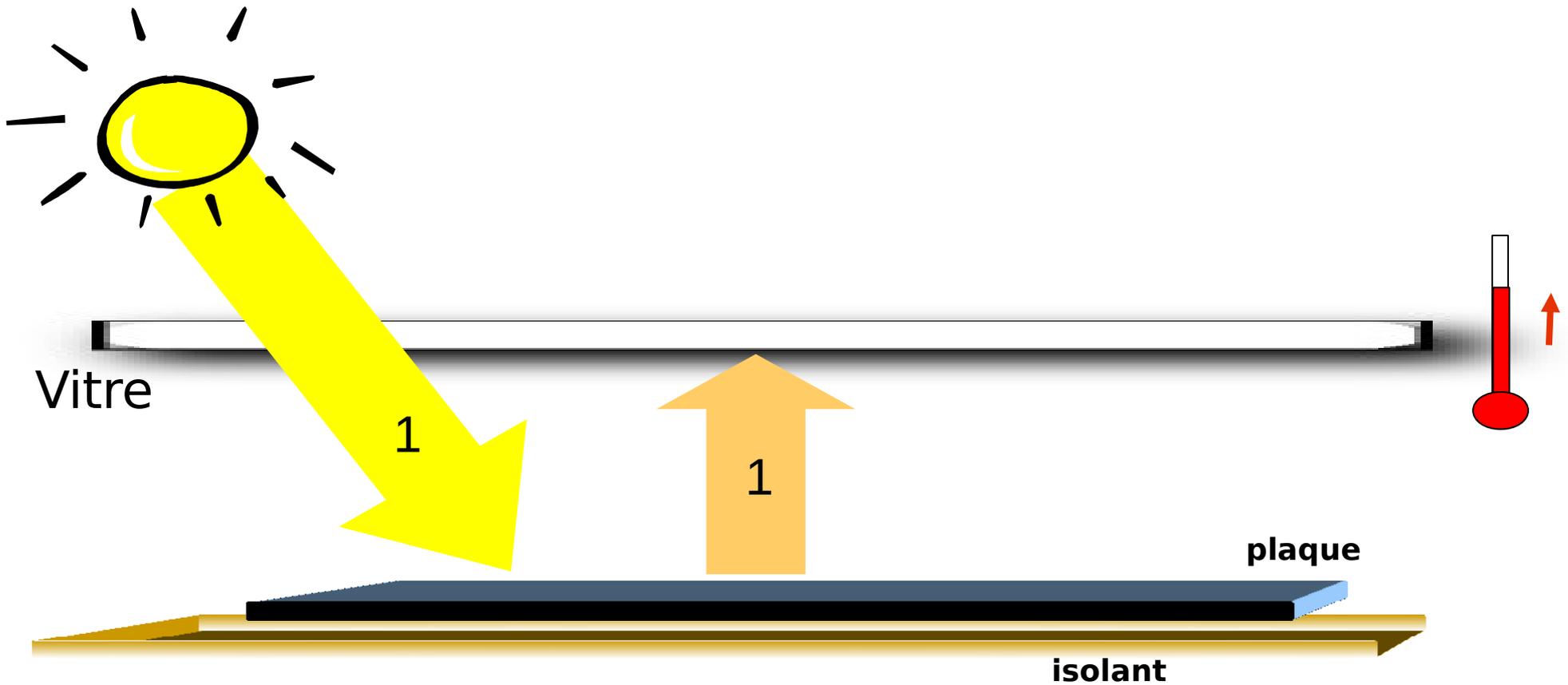
c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.

## 5) L'effet de serre



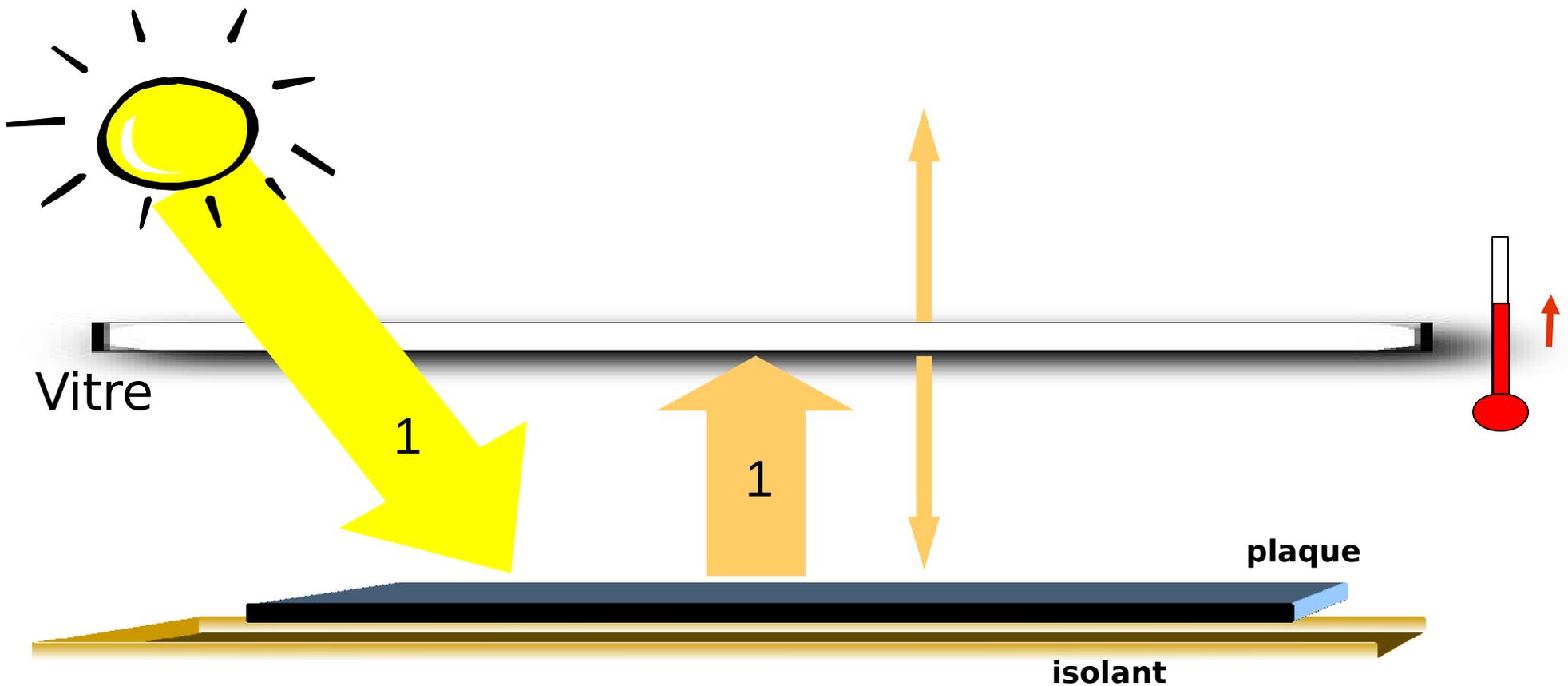
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



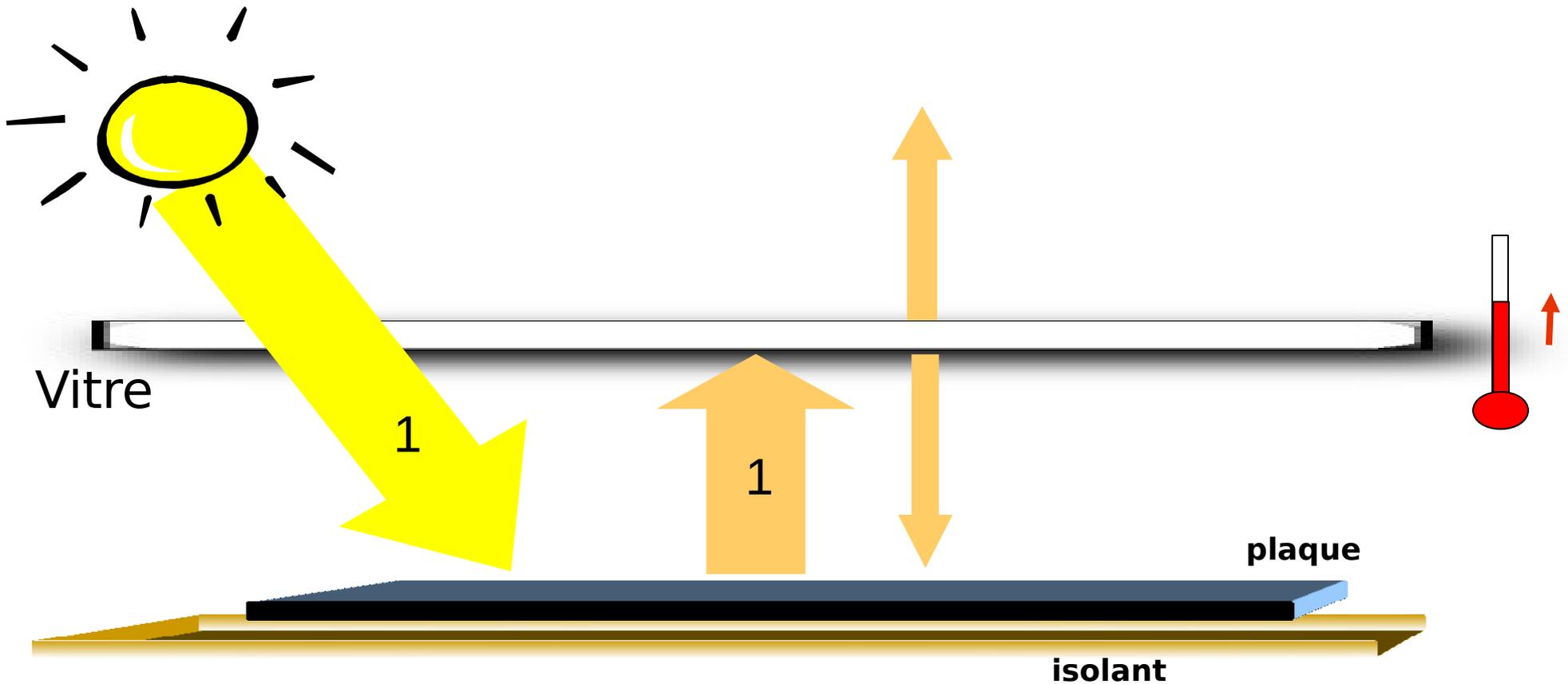
L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

## 5) L'effet de serre



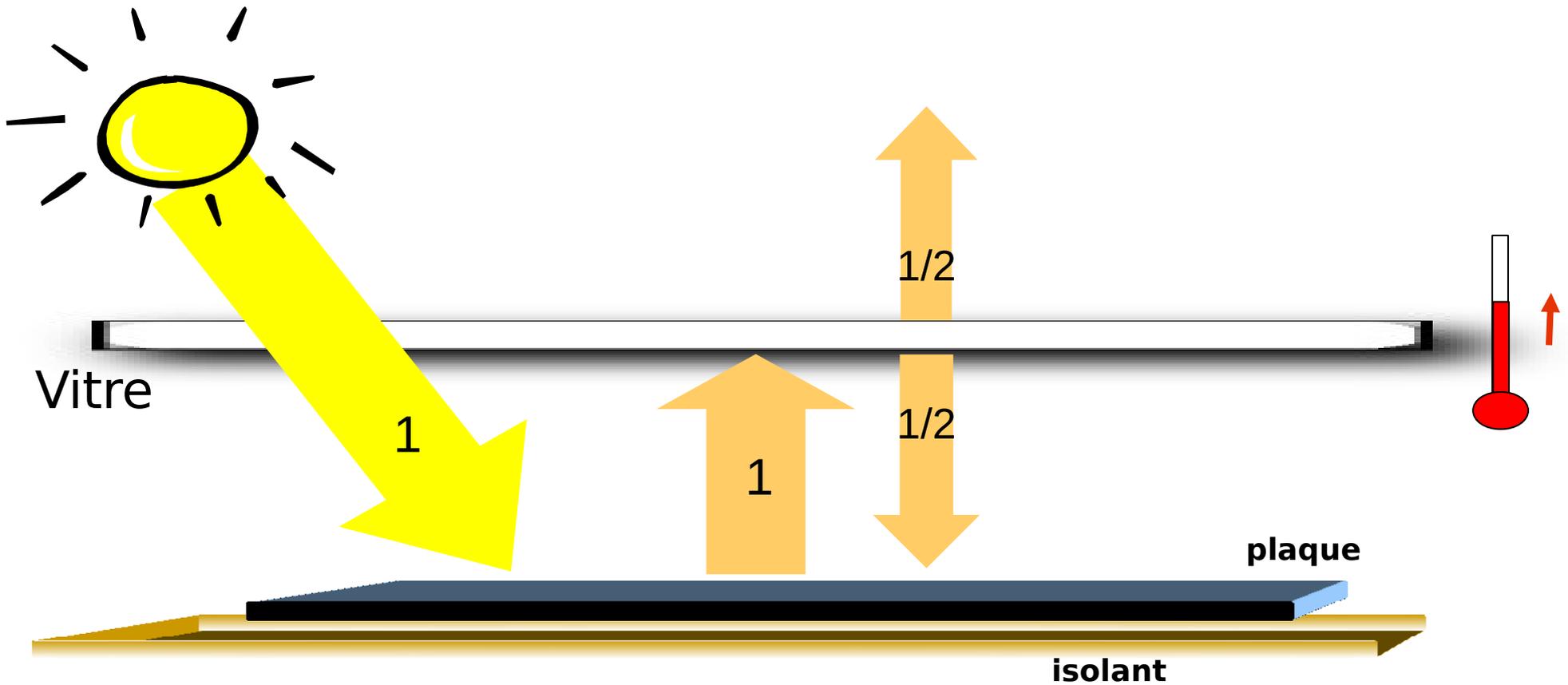
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



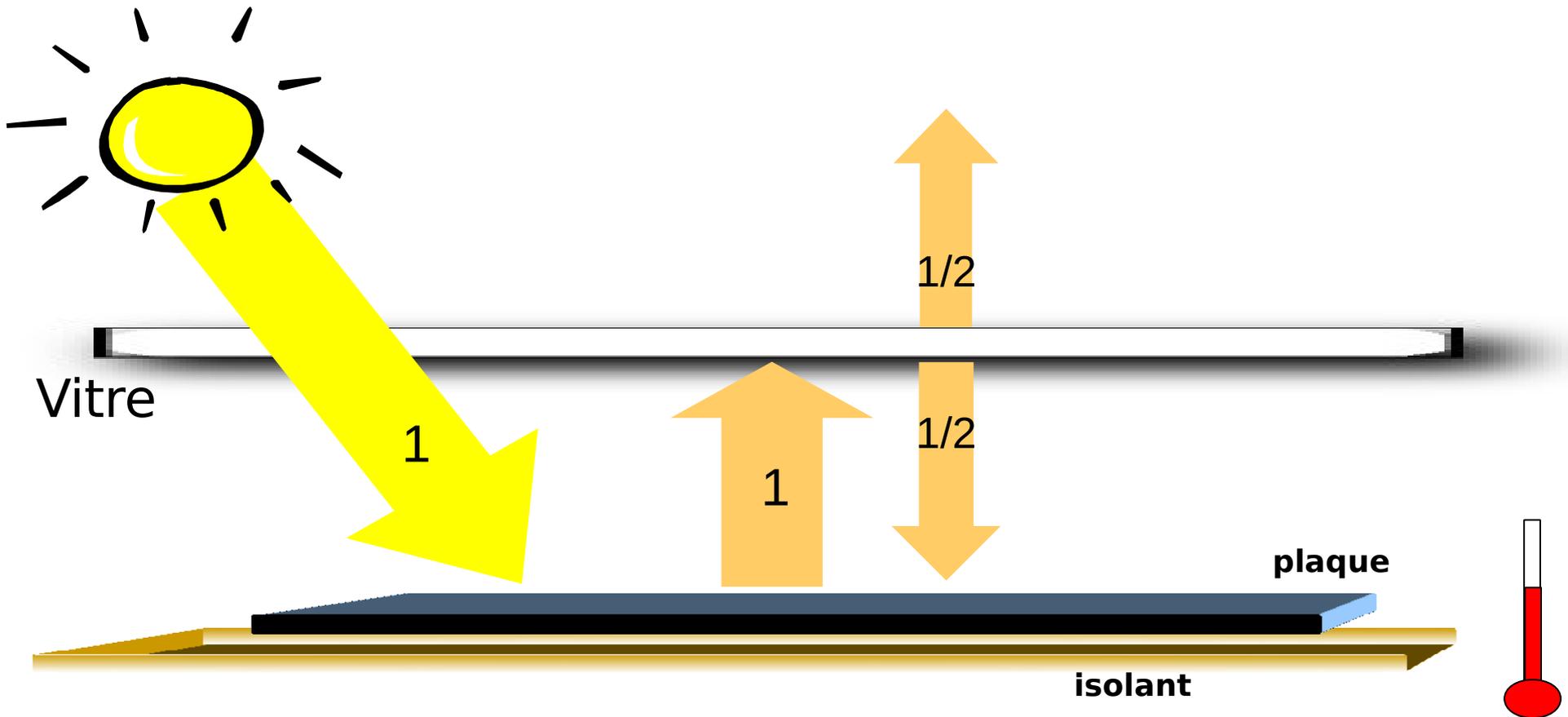
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



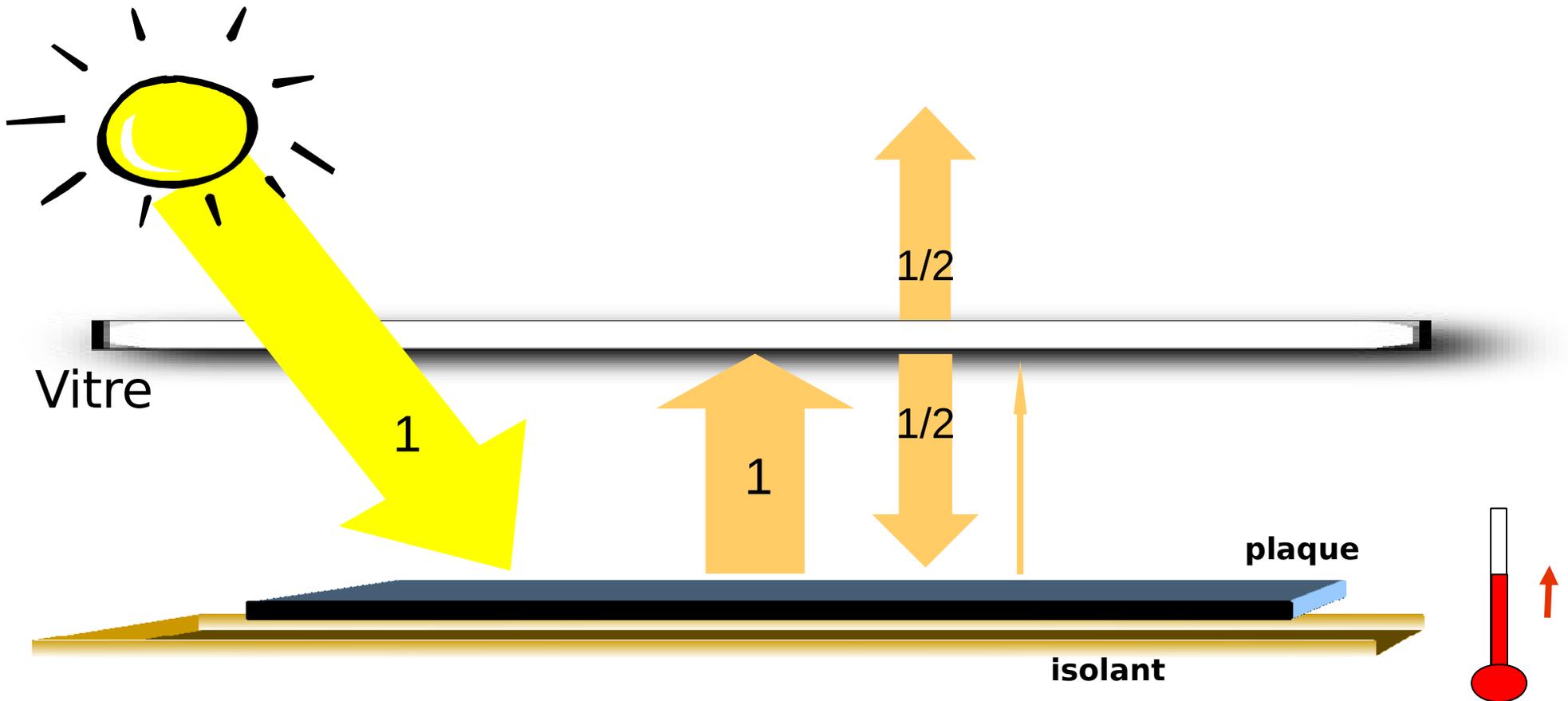
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



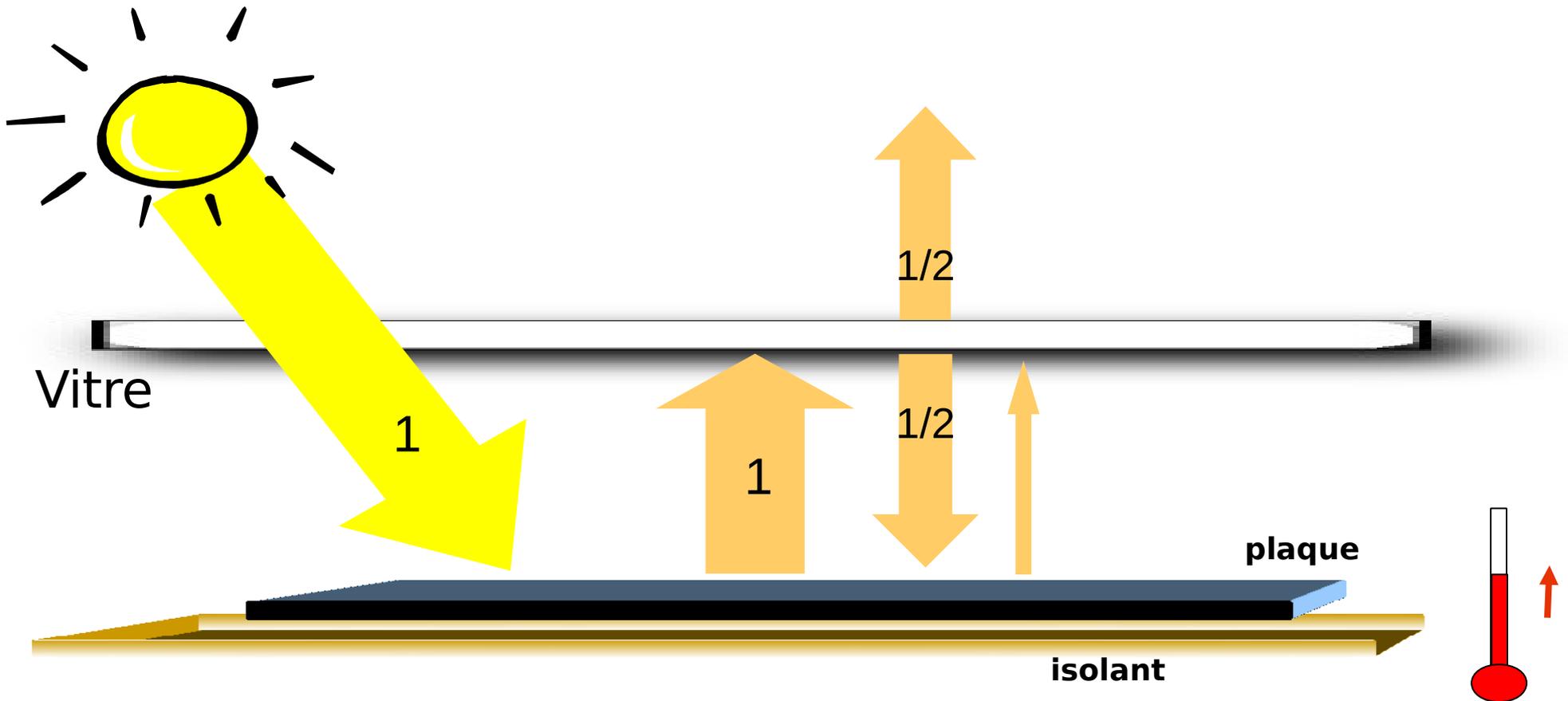
Le rayonnement infrarouge émis par la vitre vers le bas est absorbé par la plaque.

## 5) L'effet de serre



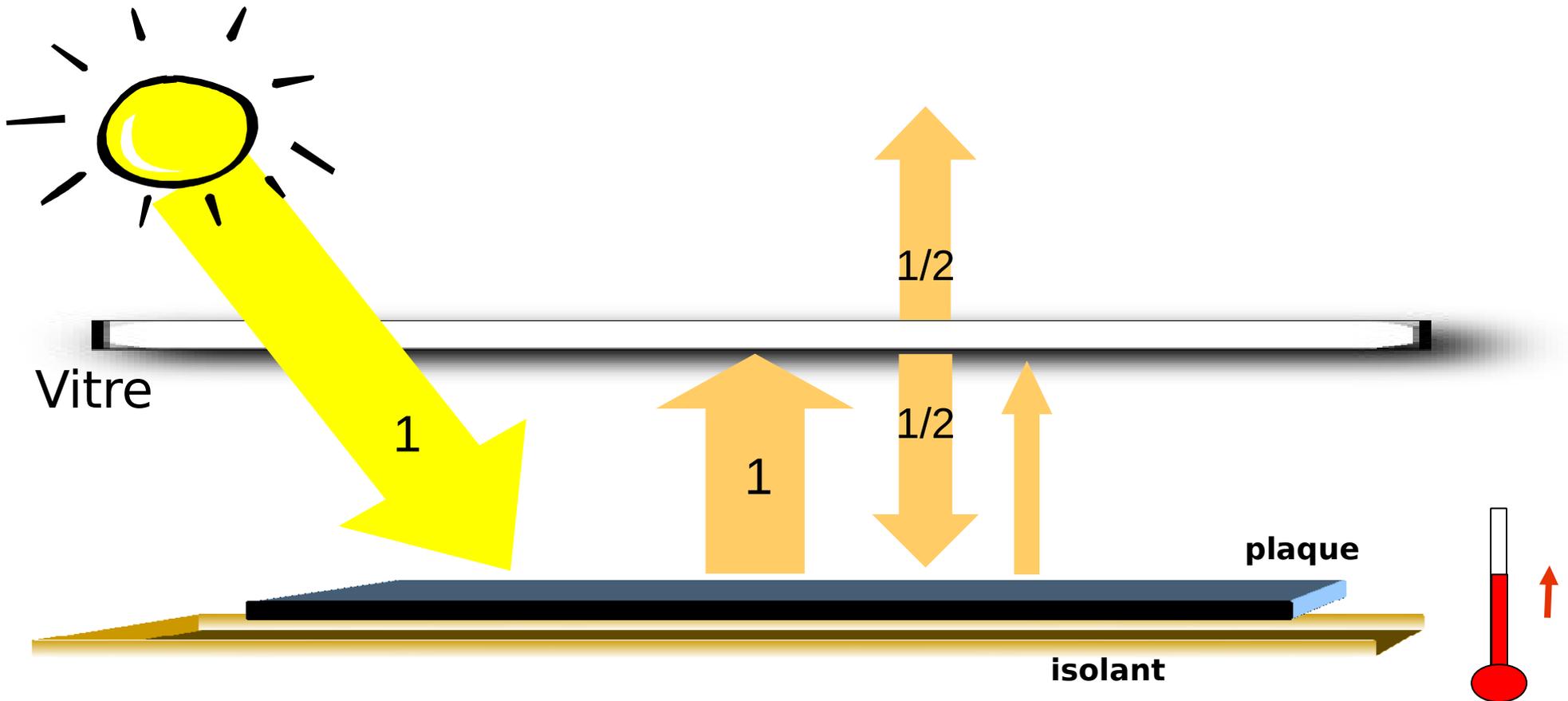
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



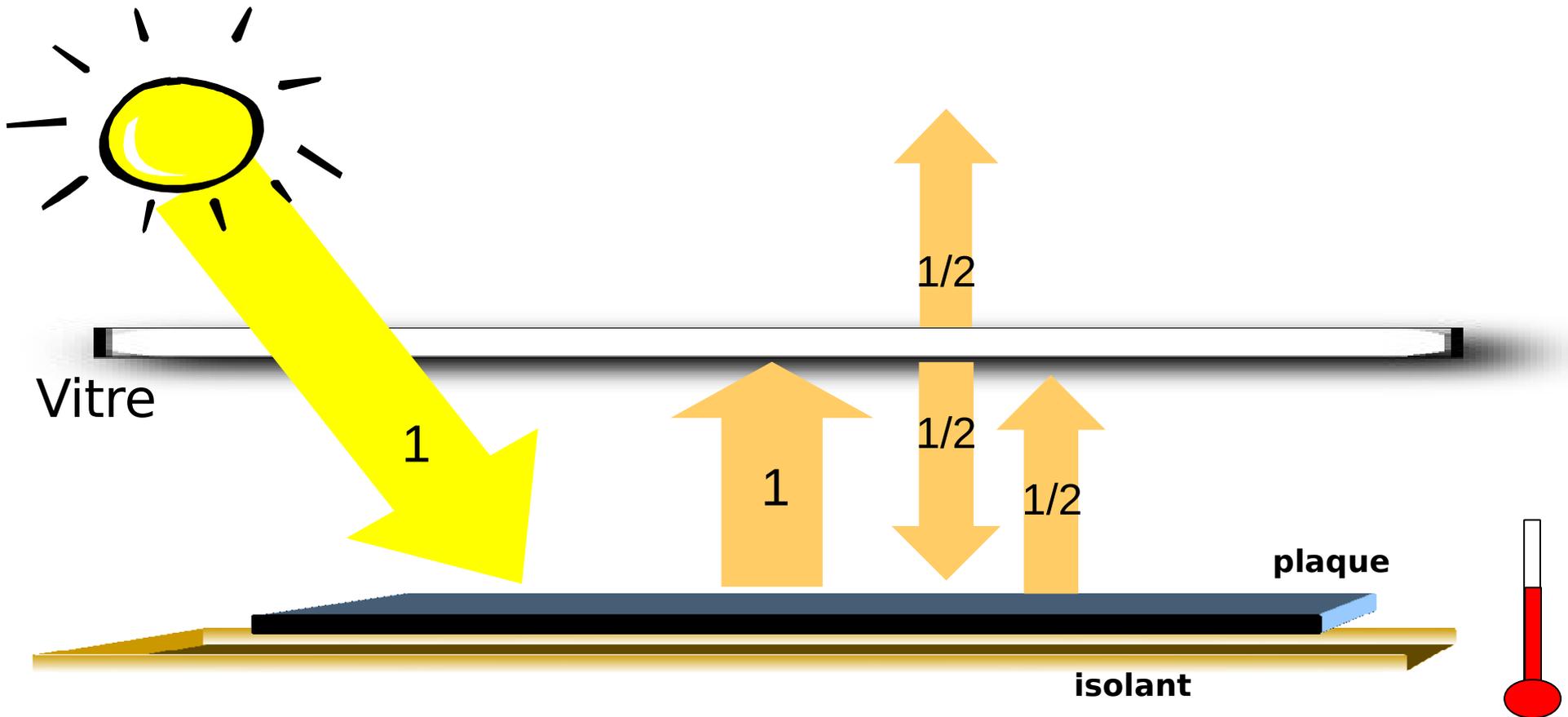
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



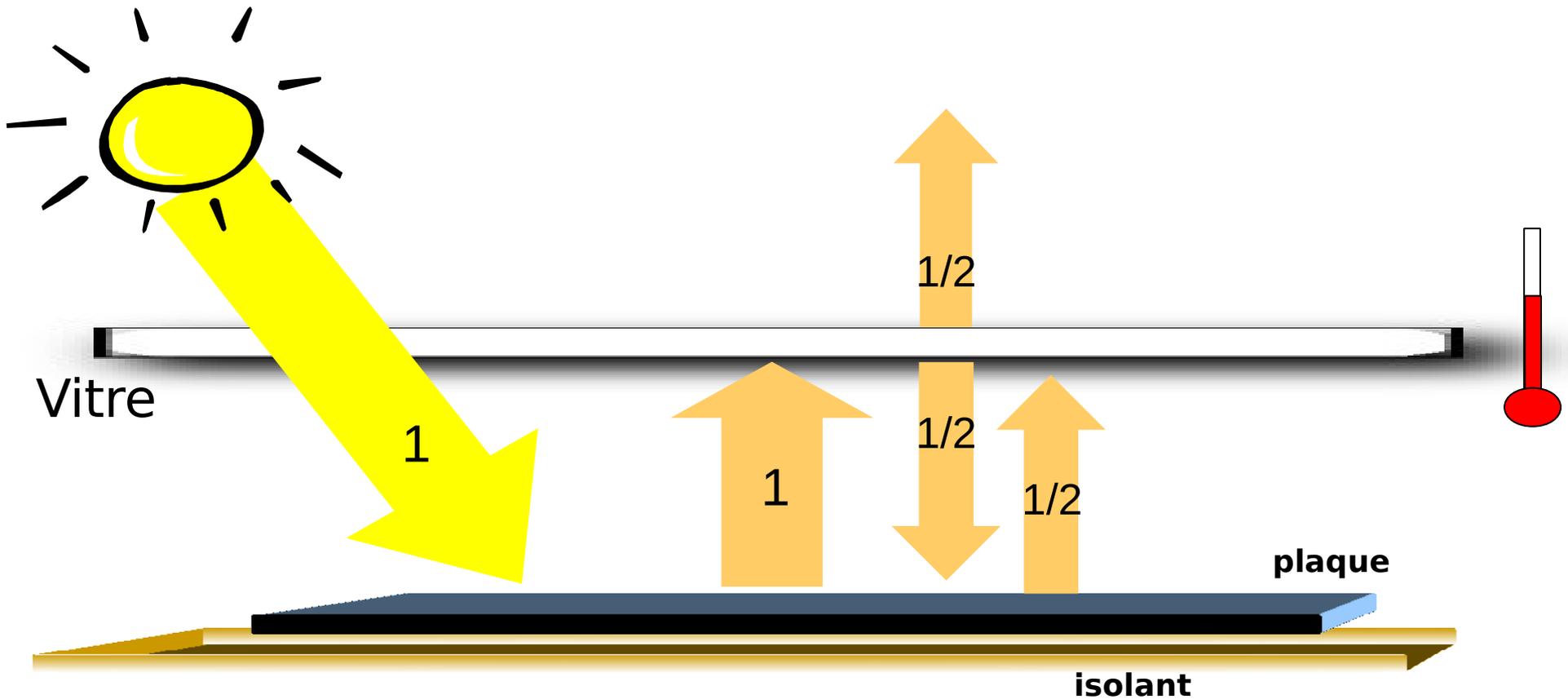
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



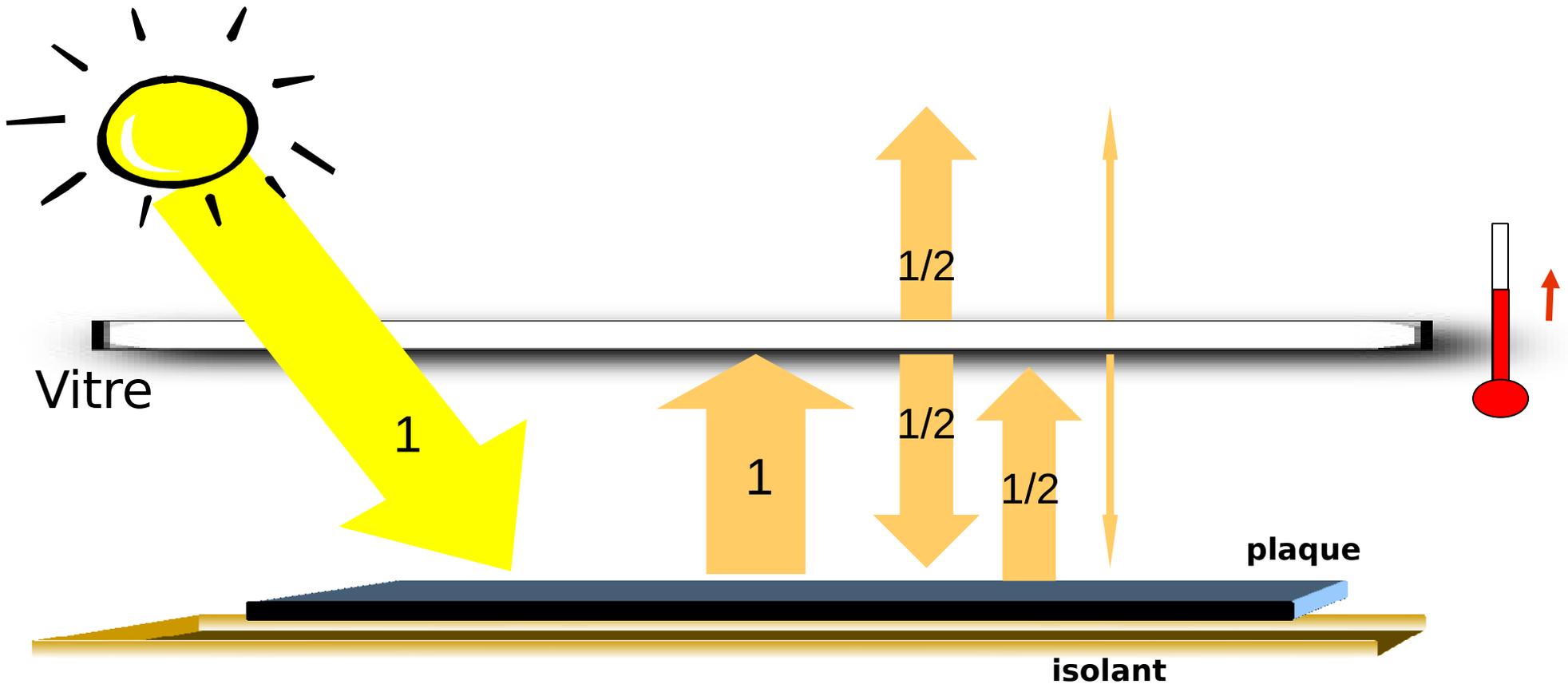
Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre.

## 5) L'effet de serre



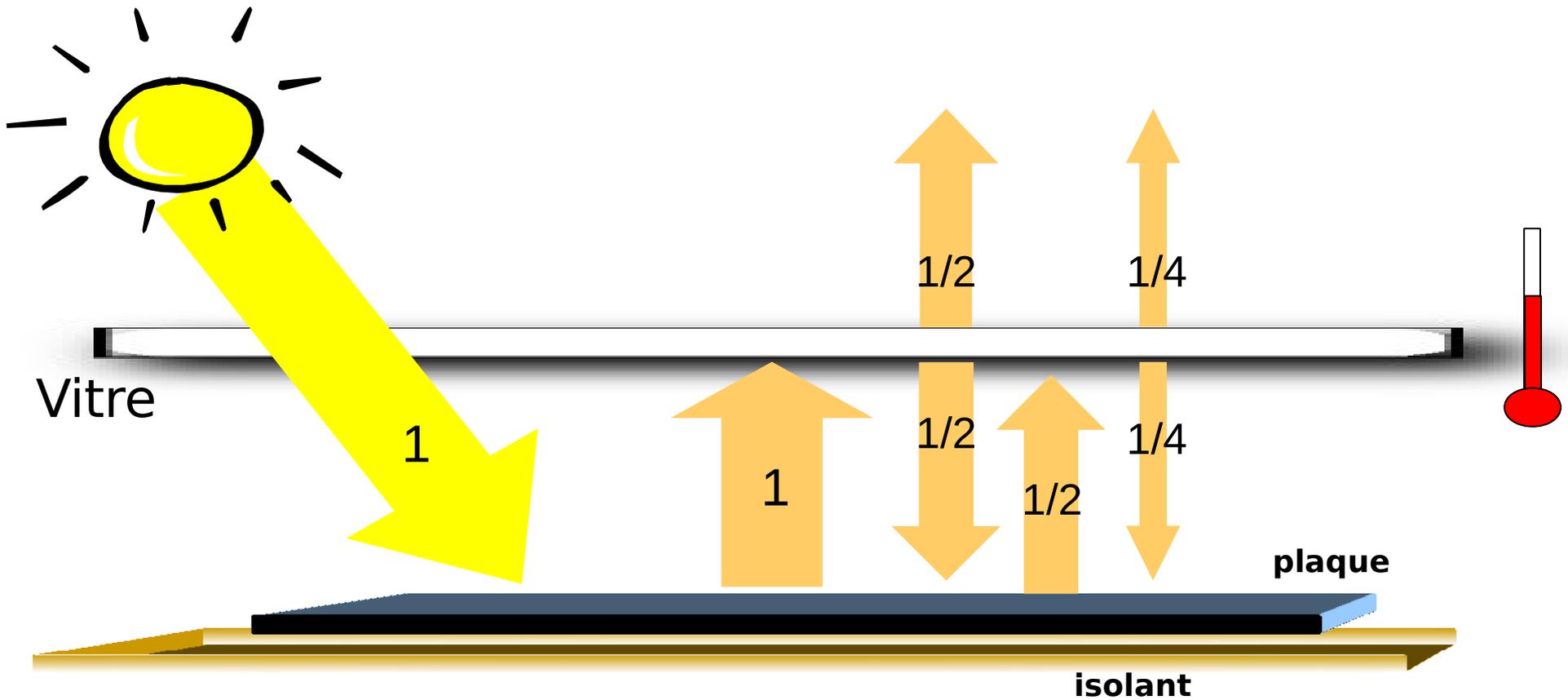
Ce rayonnement supplémentaire émis par la plaque est de nouveau absorbé par la vitre dont la température augmente encore.

## 5) L'effet de serre



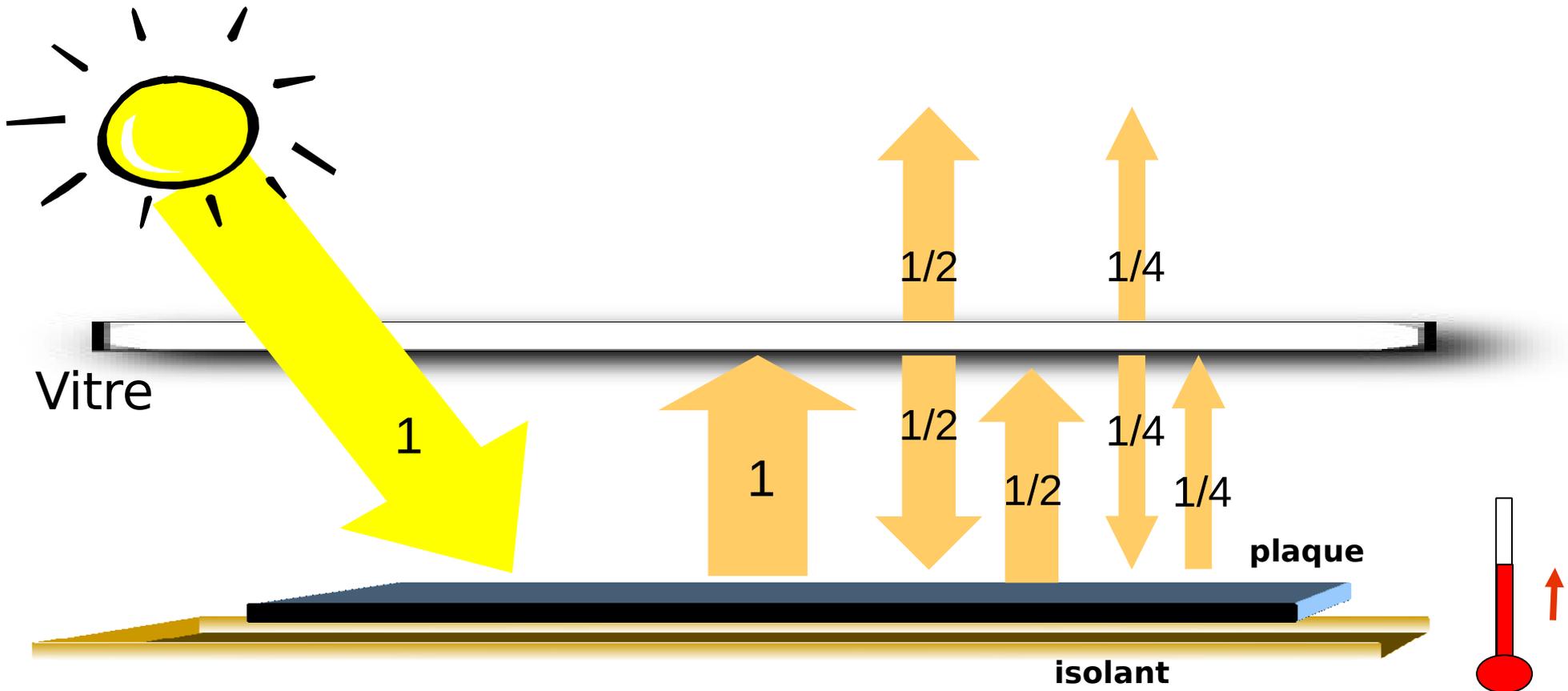
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge, moitié vers le haut, moitié vers le bas.

## 5) L'effet de serre



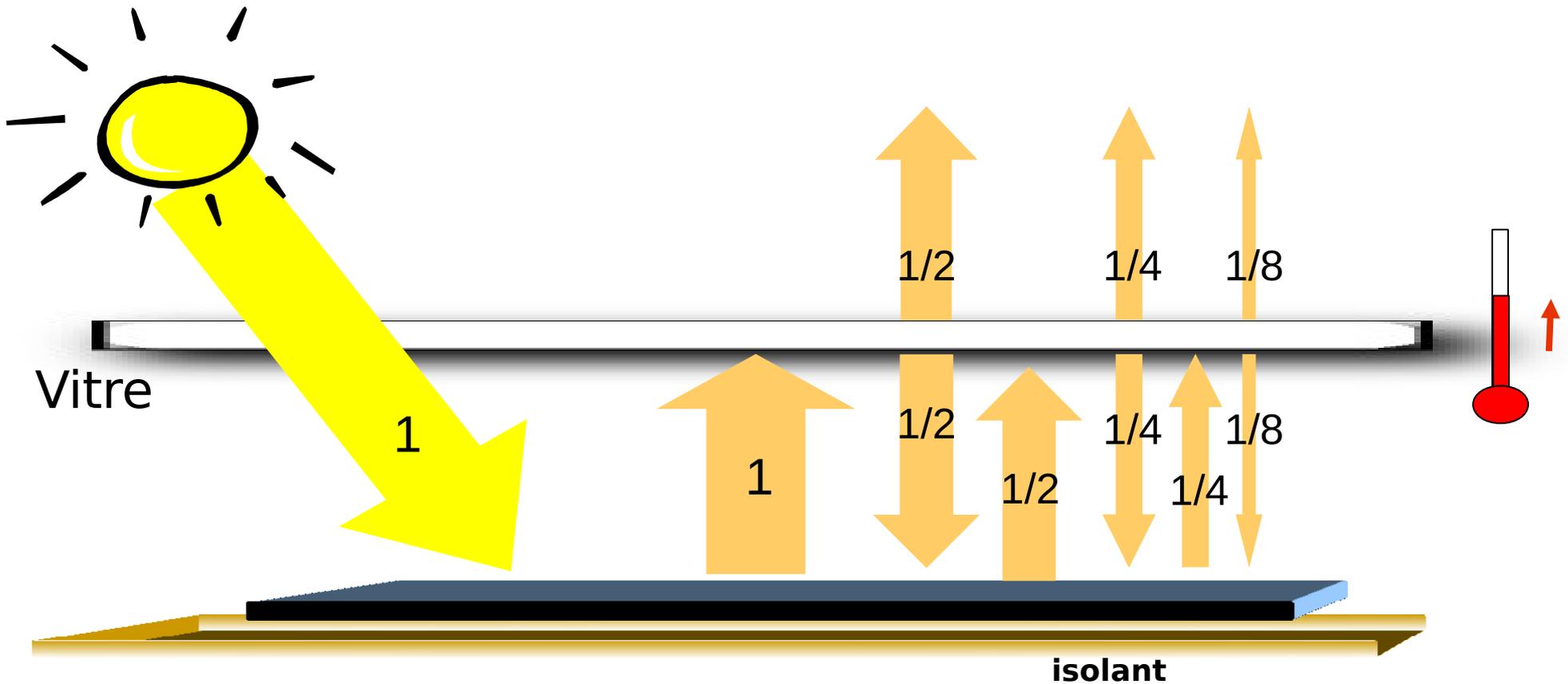
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



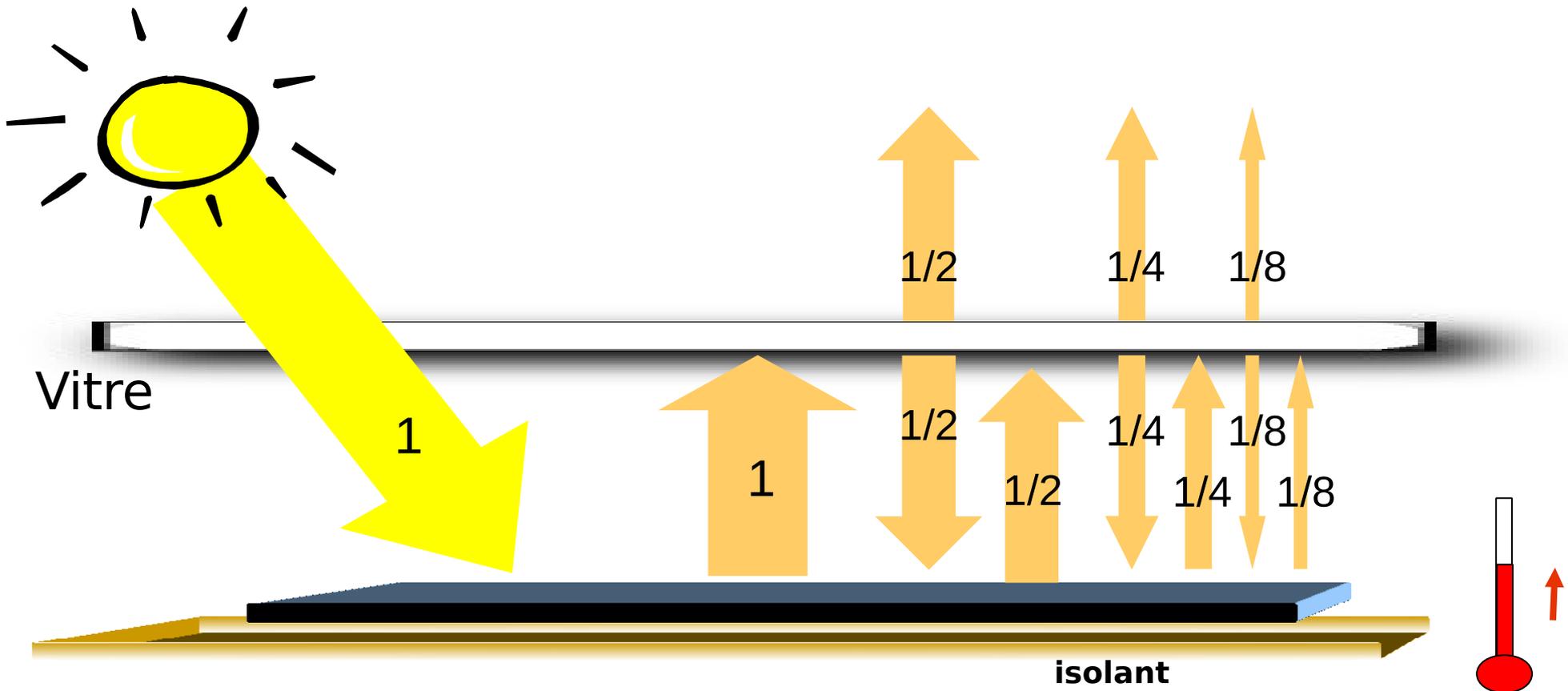
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



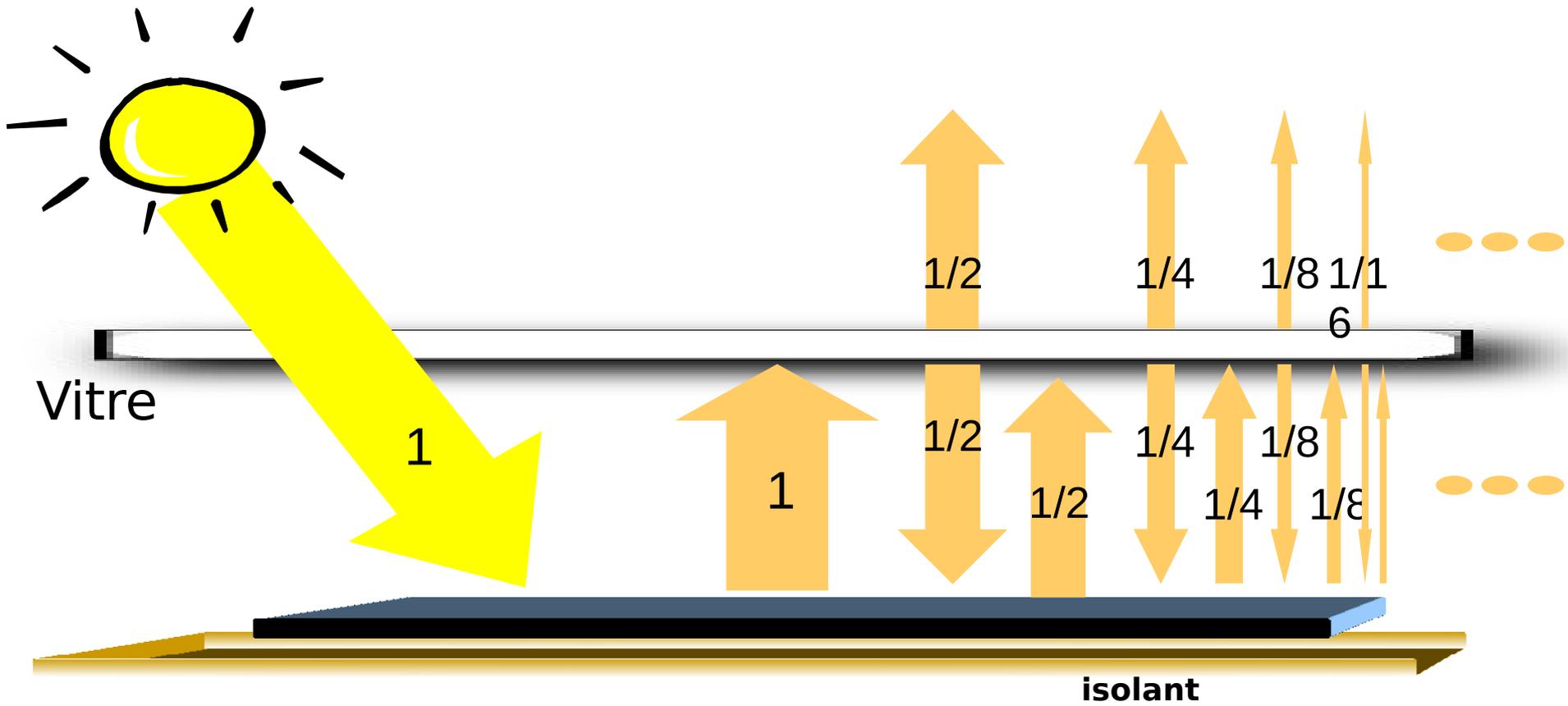
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



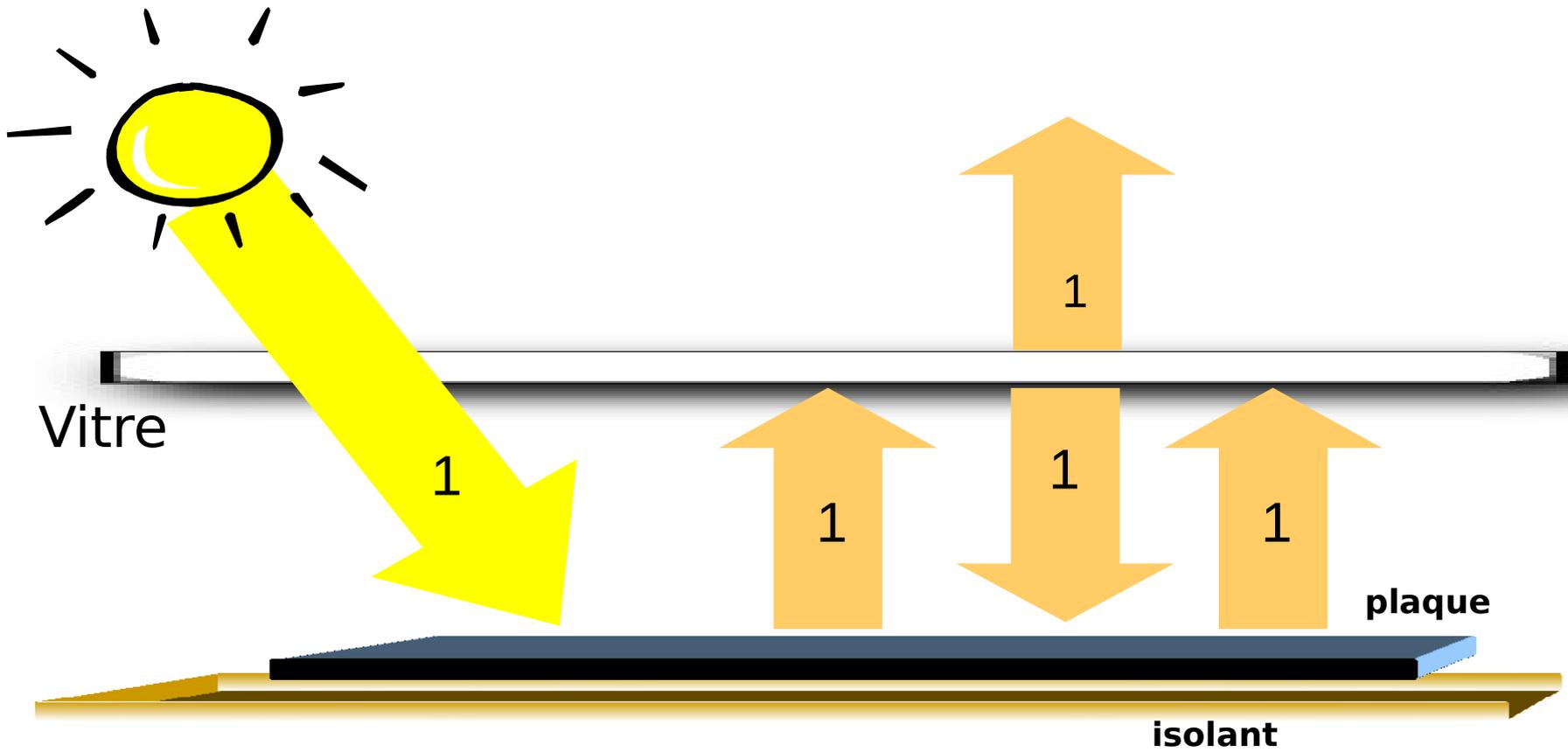
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



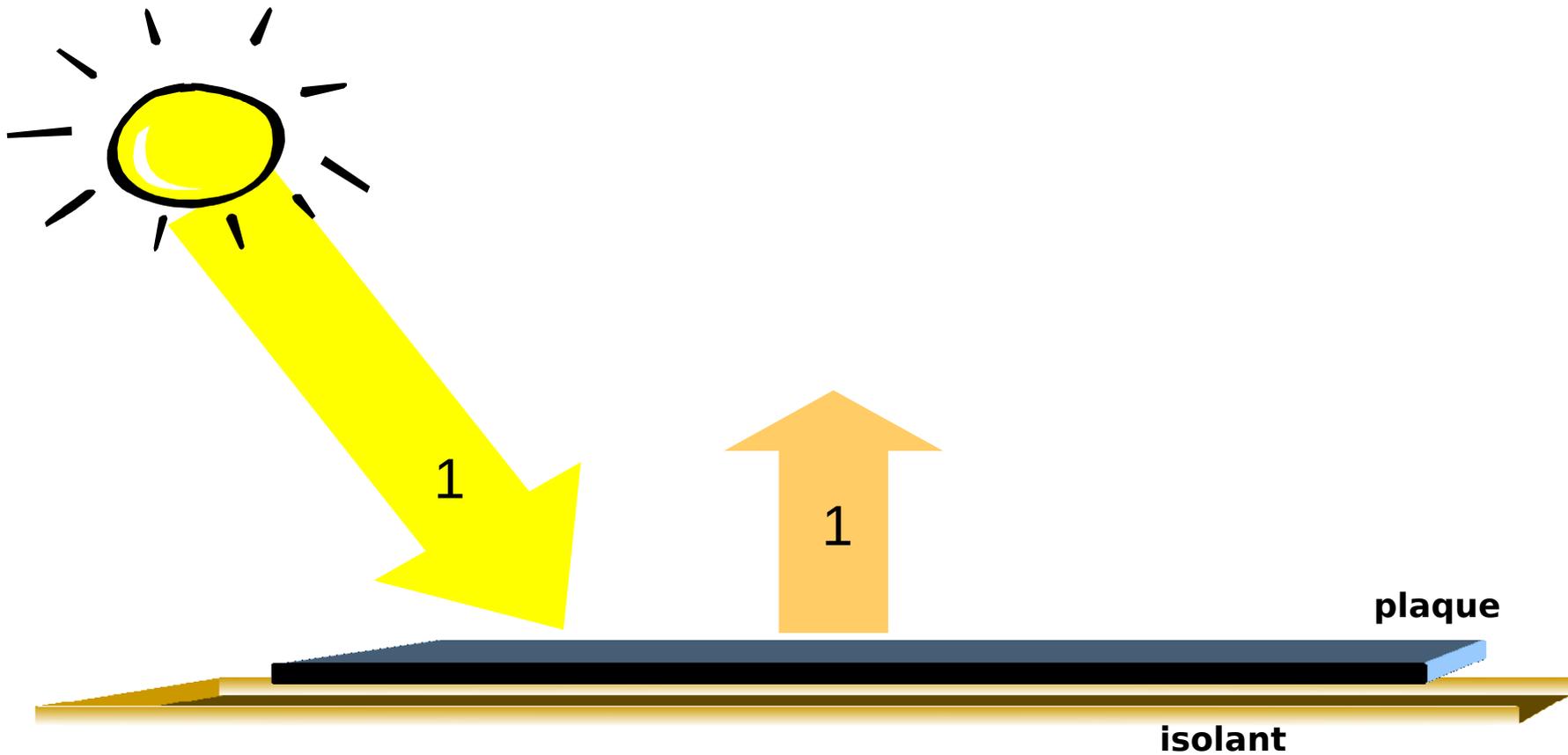
etc...

## 5) L'effet de serre



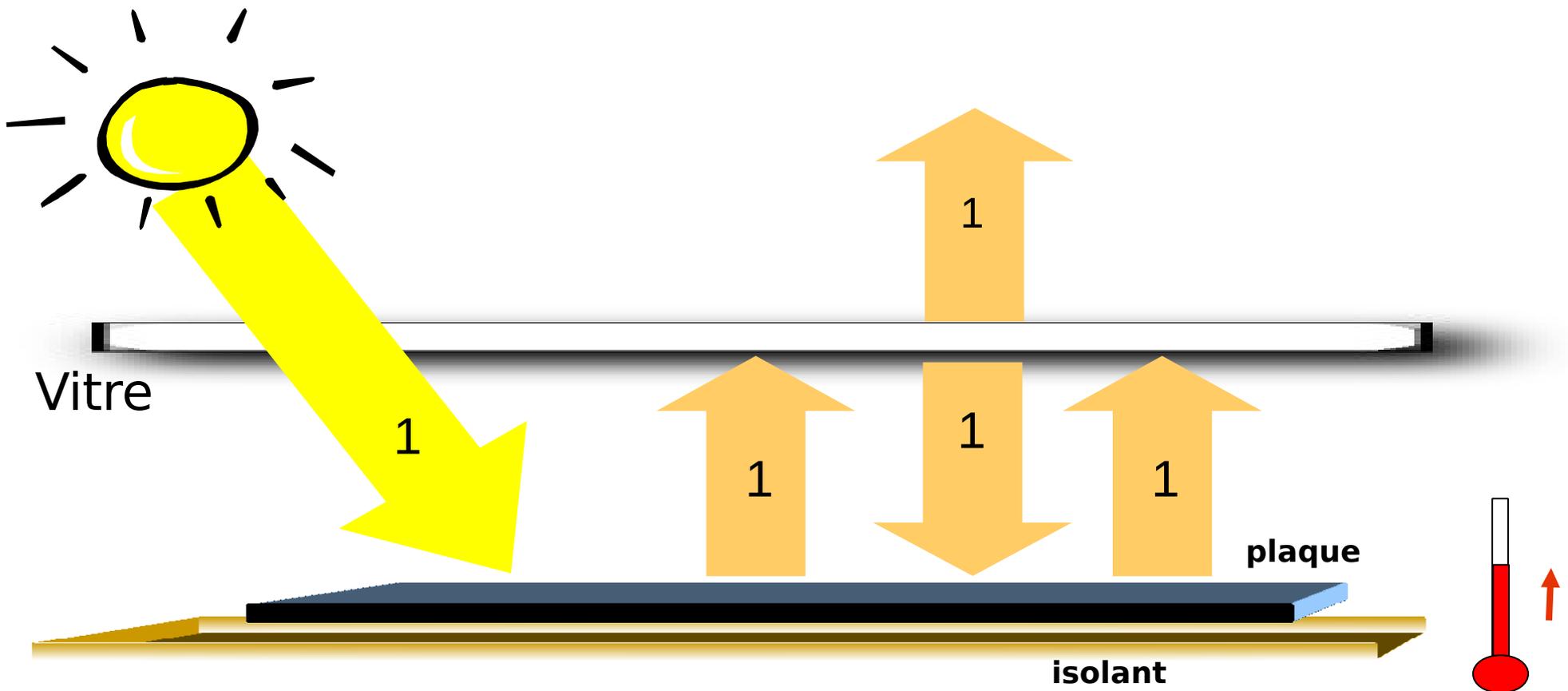
et si on fait la somme...

## 5) L'effet de serre



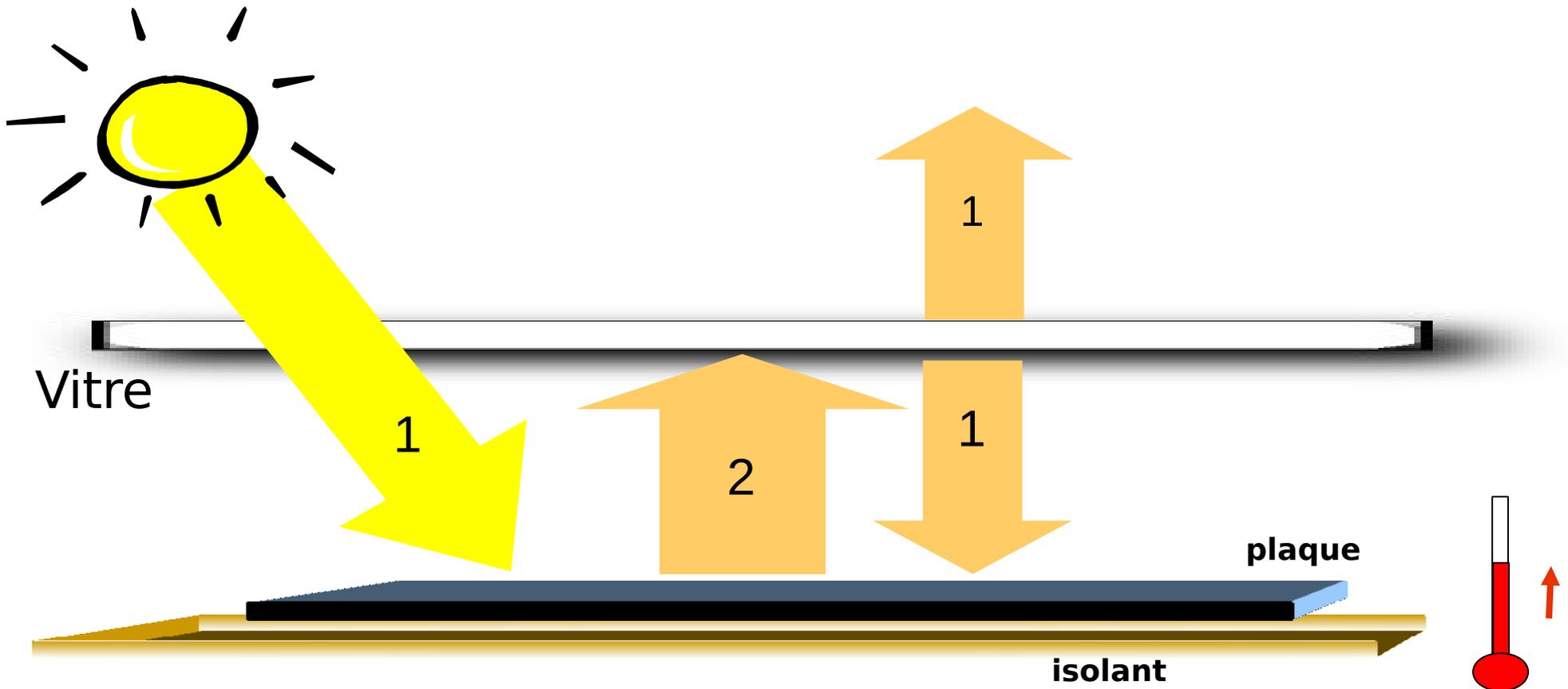
Si on résume le déroulement précédent, ...

## 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.

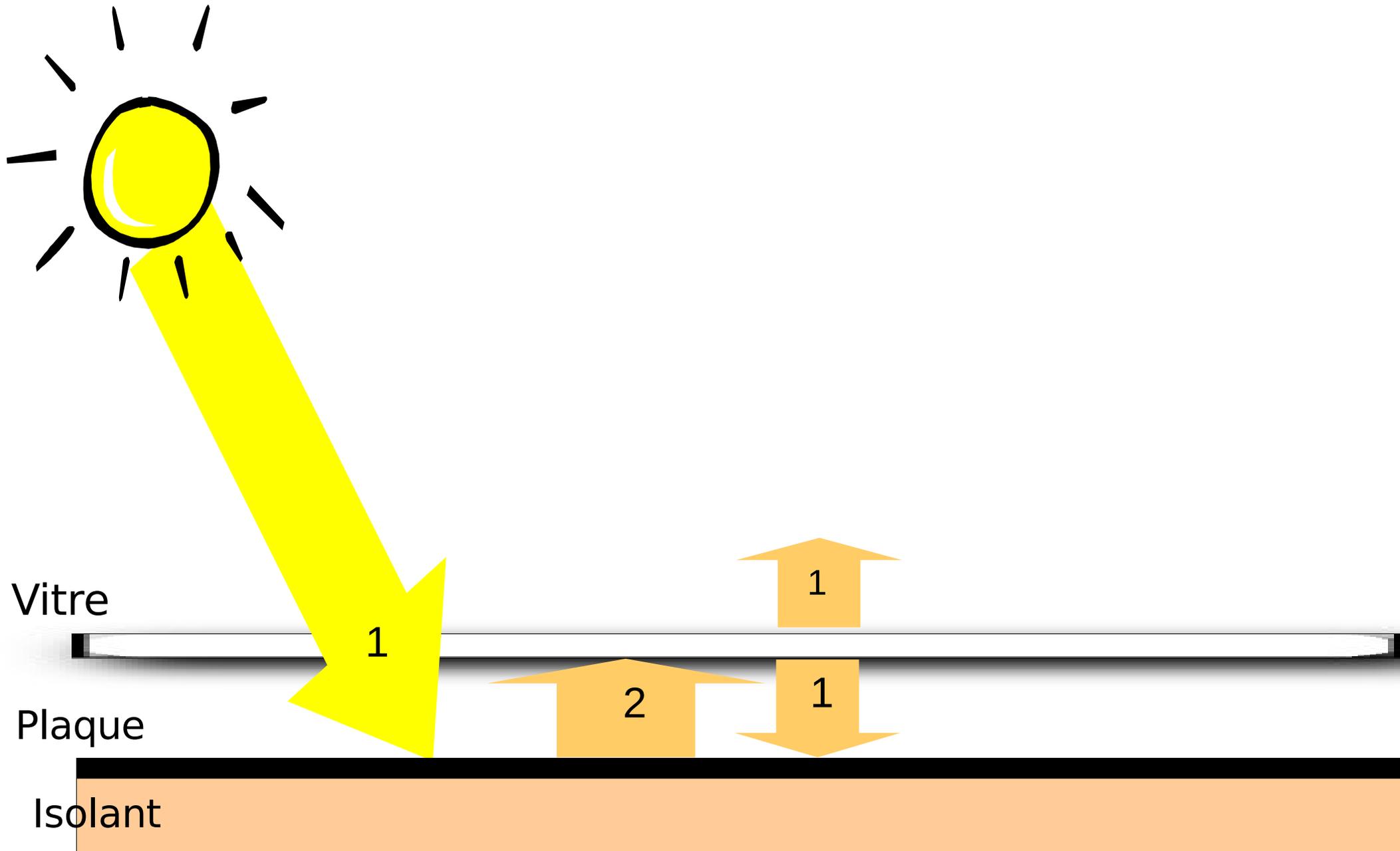
## 5) L'effet de serre

**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

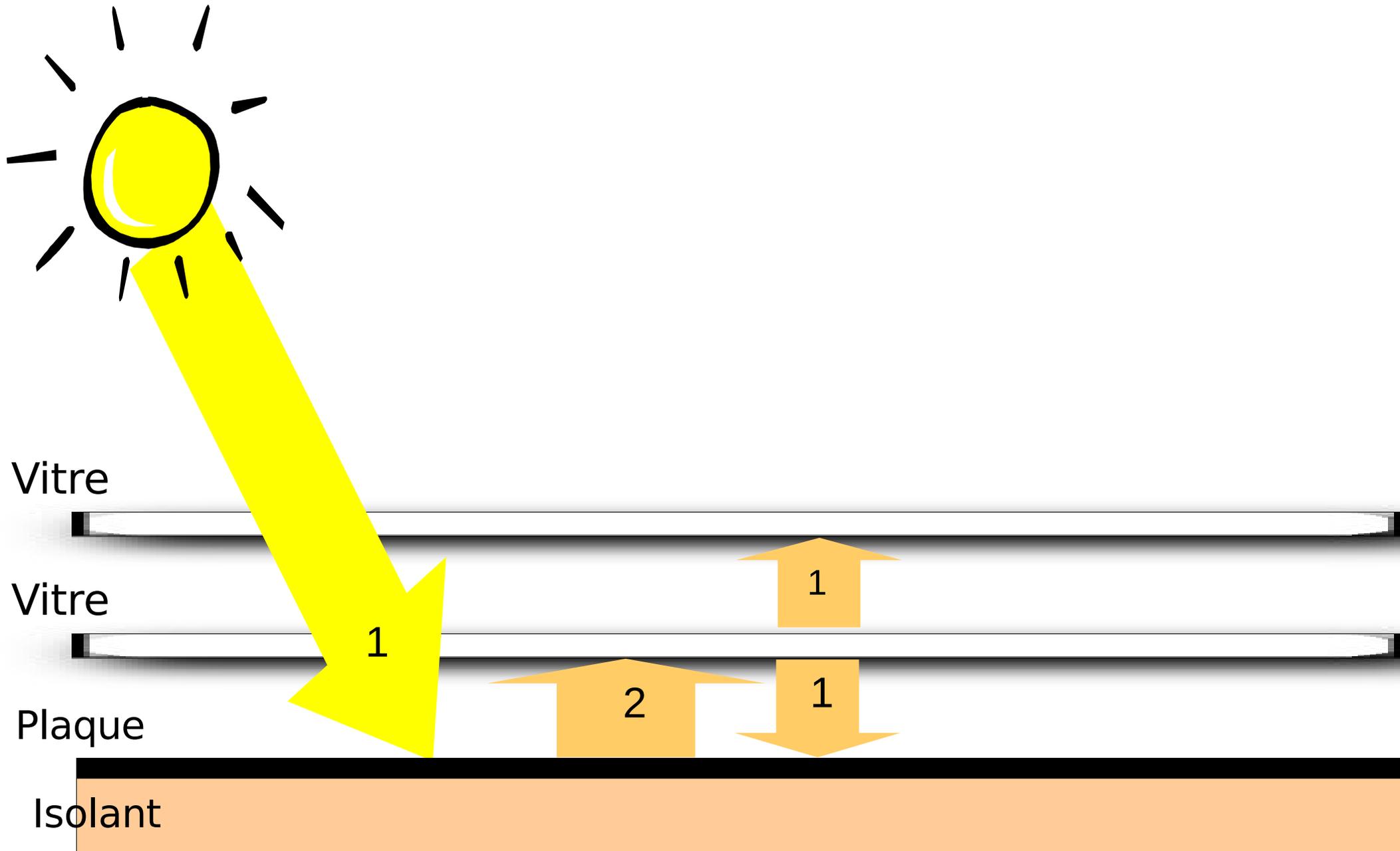
La vitre **absorbe** le rayonnement infrarouge, ne le réfléchit pas

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.

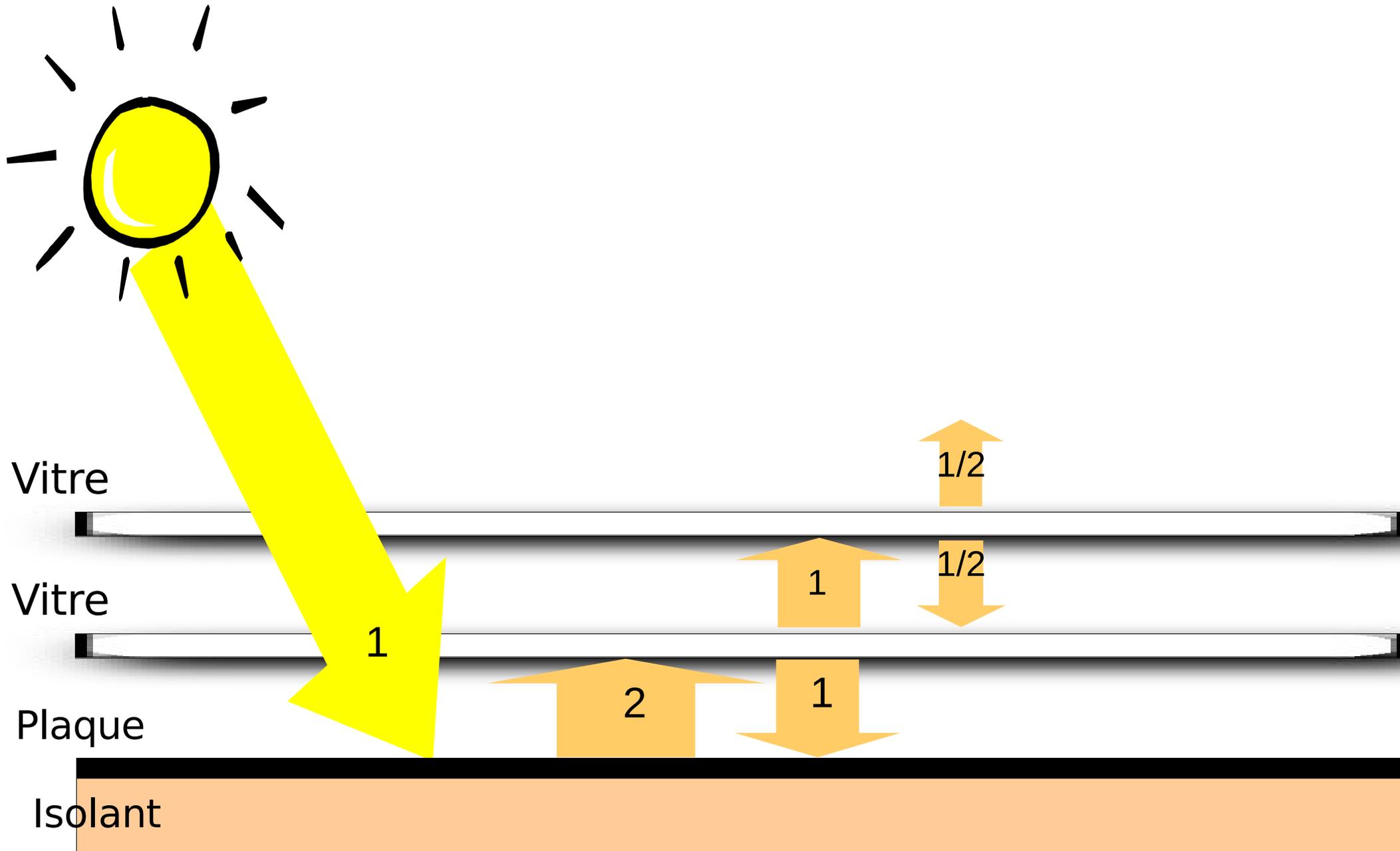
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



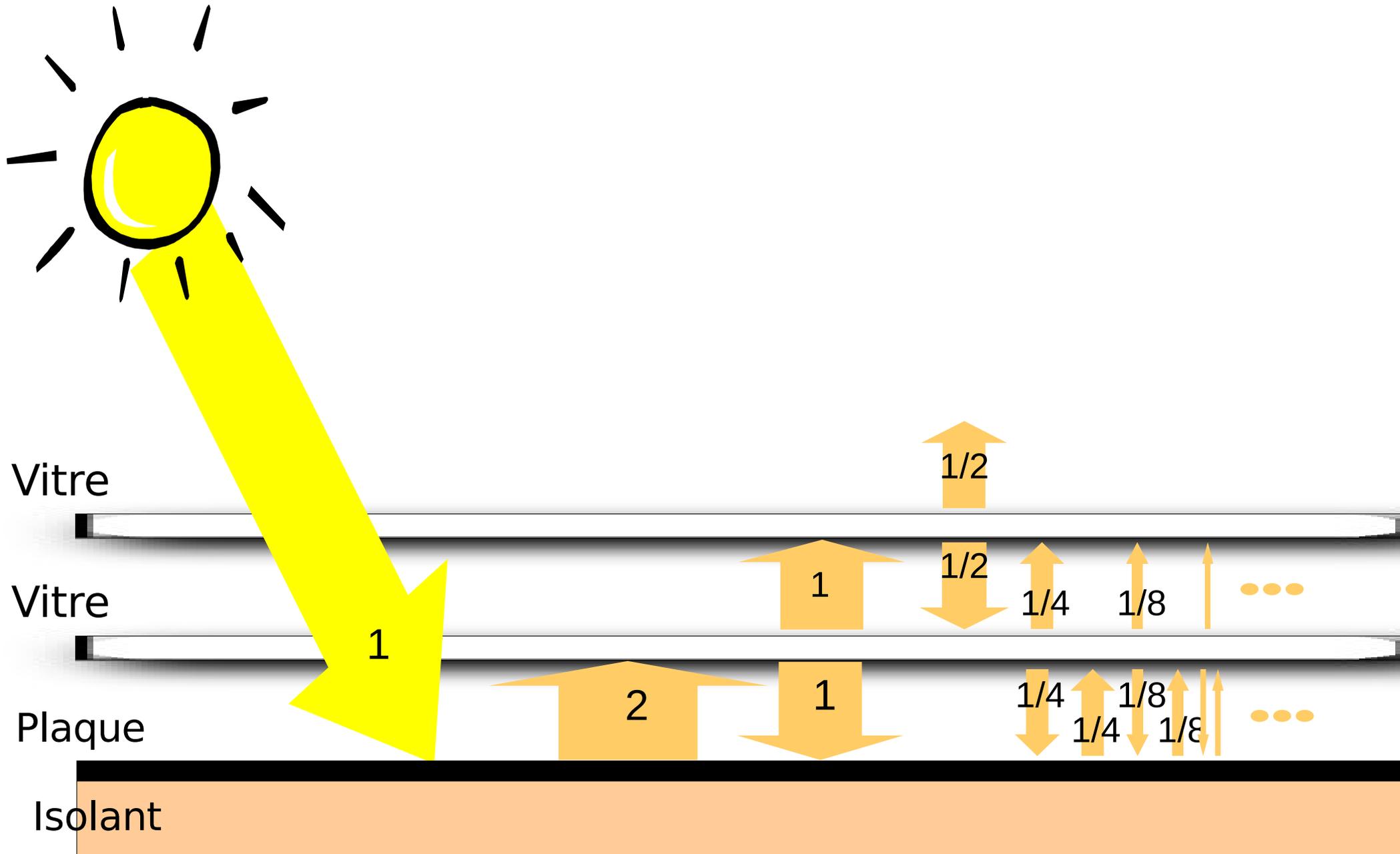
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



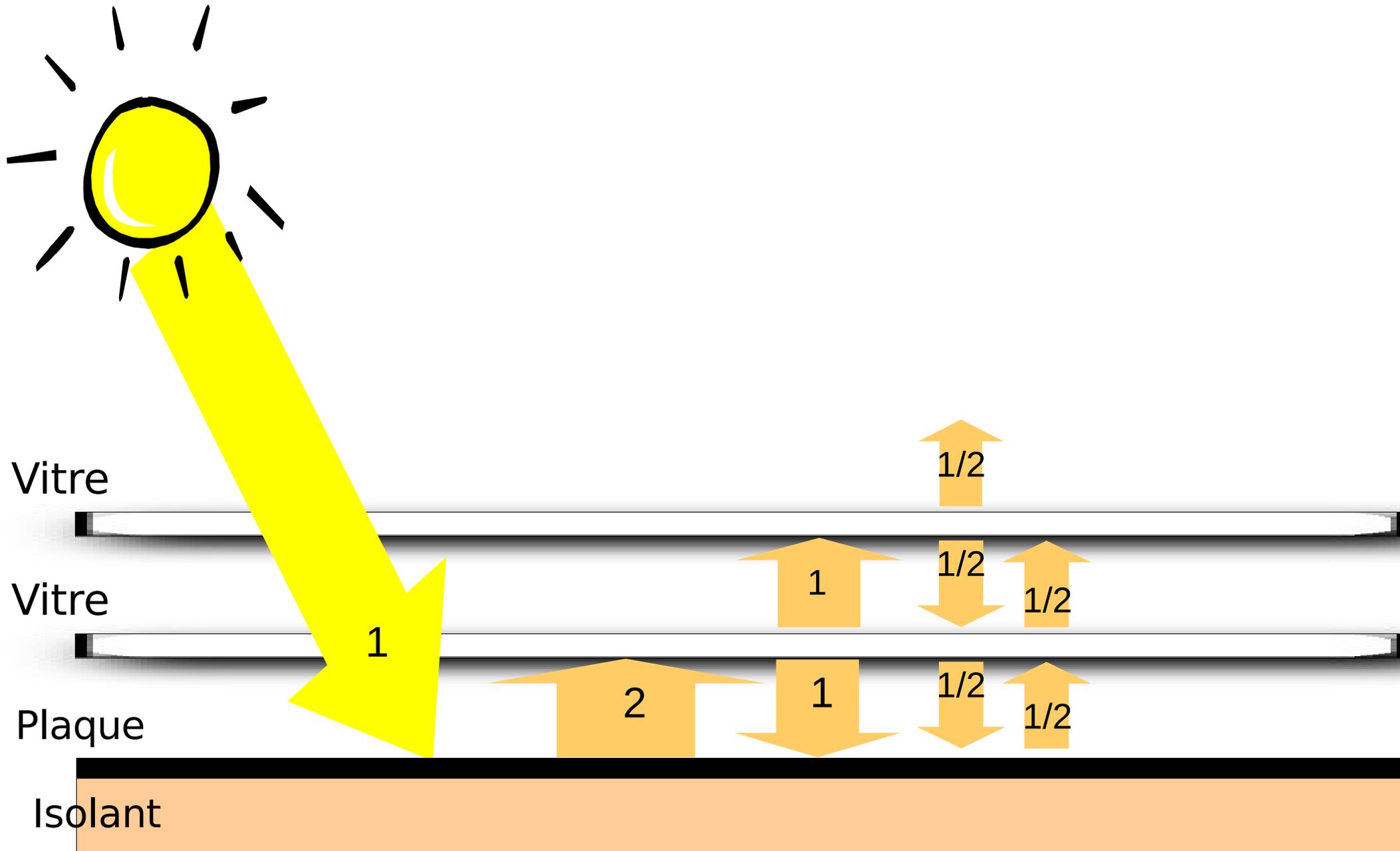
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



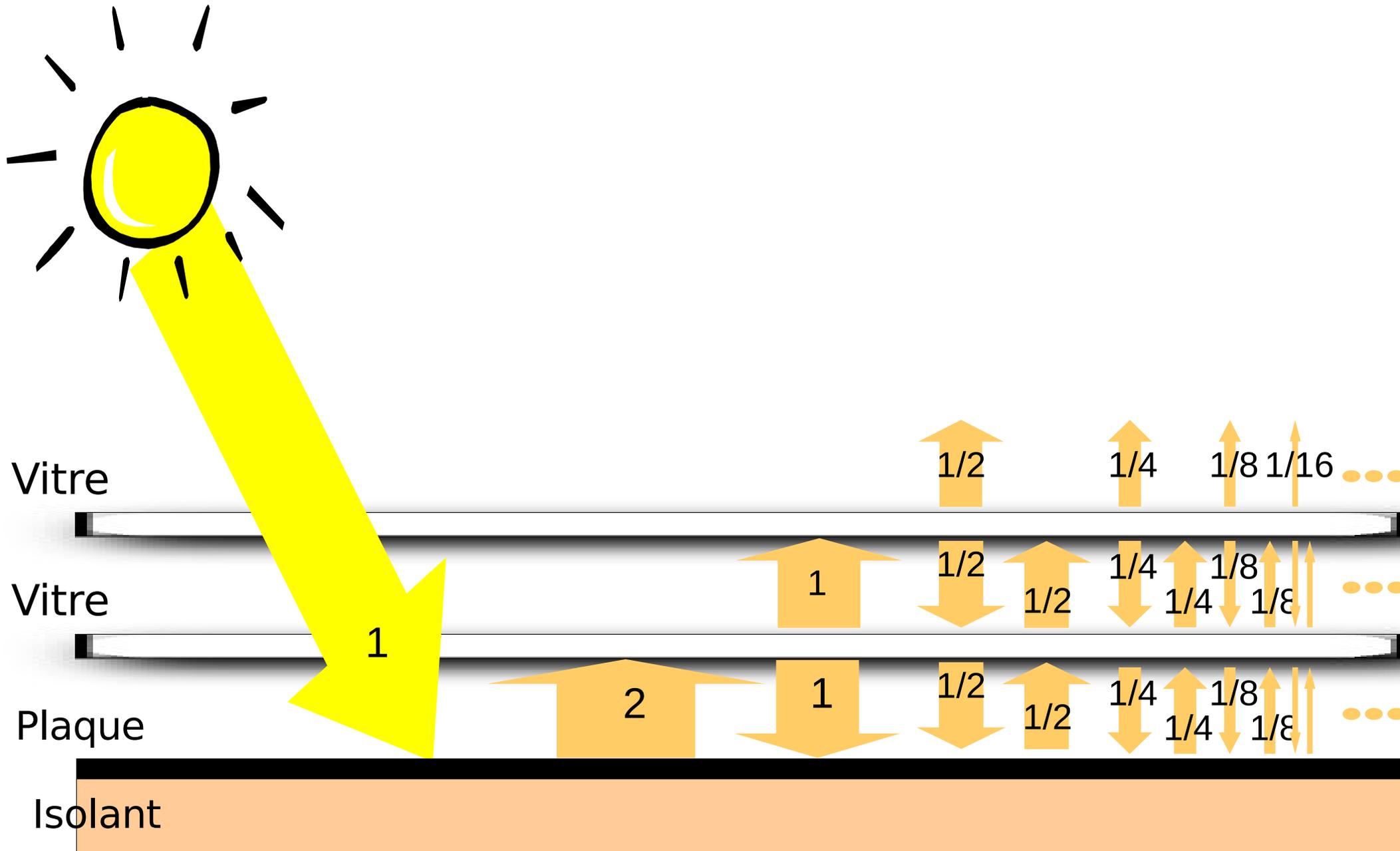
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



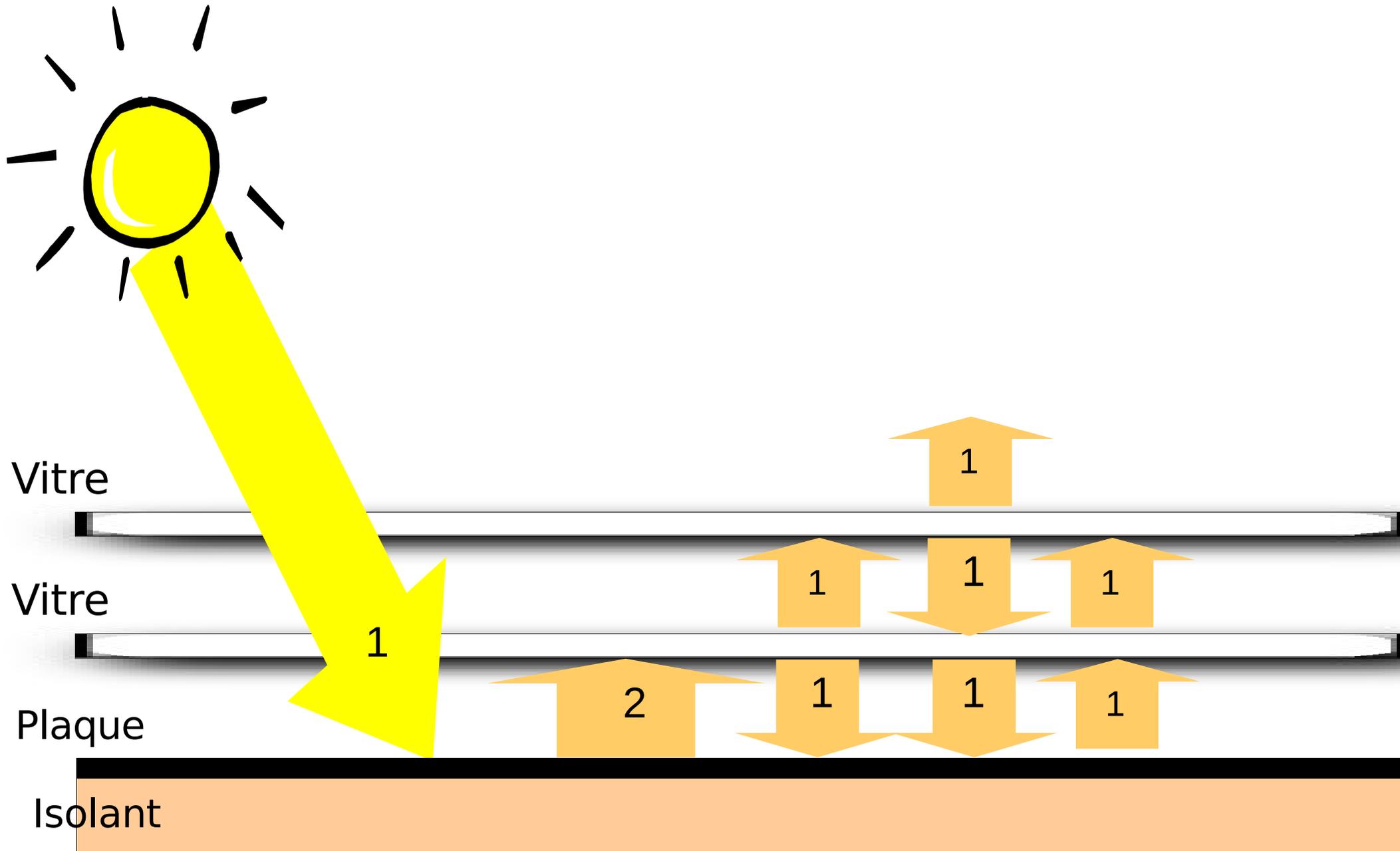
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



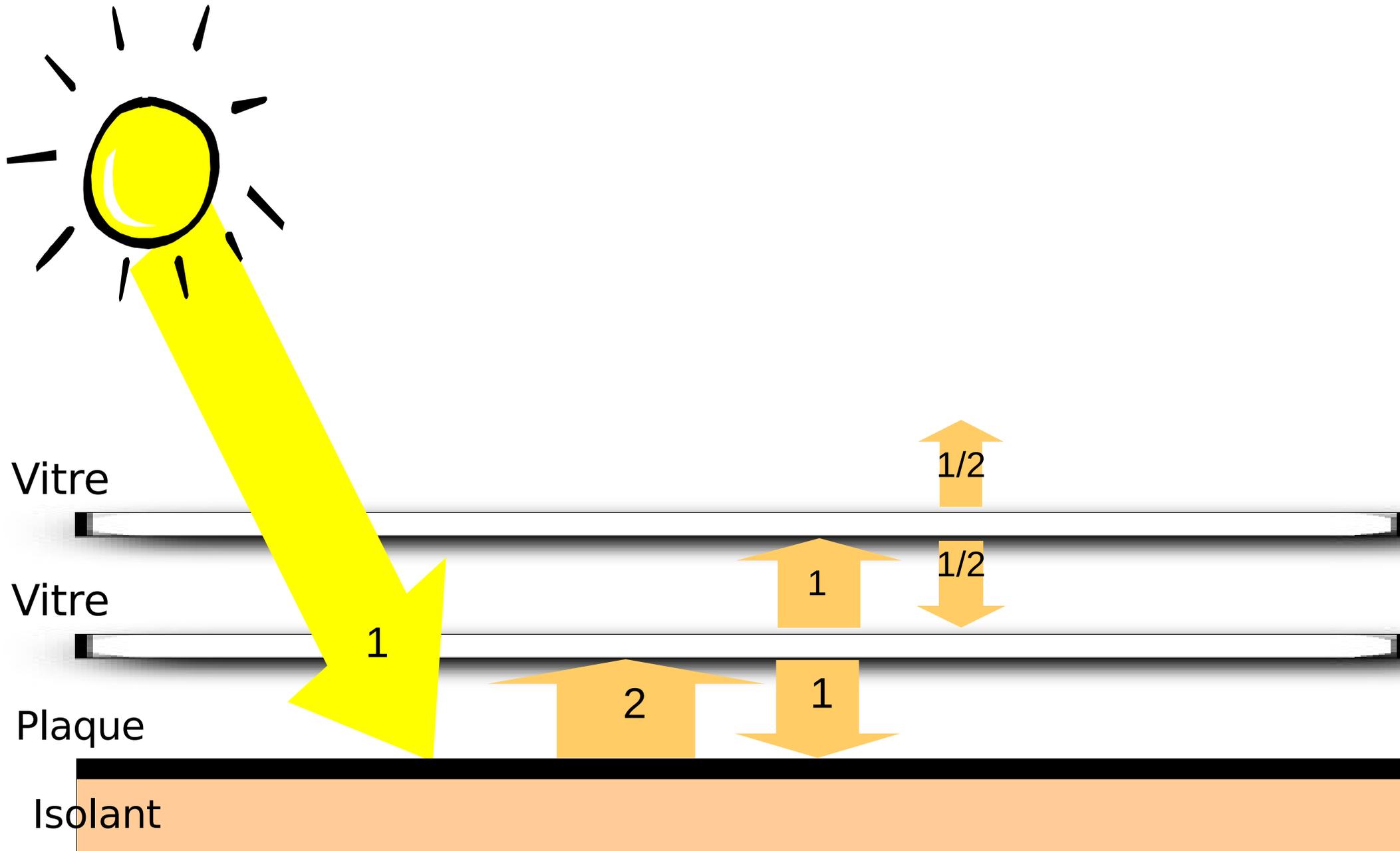
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



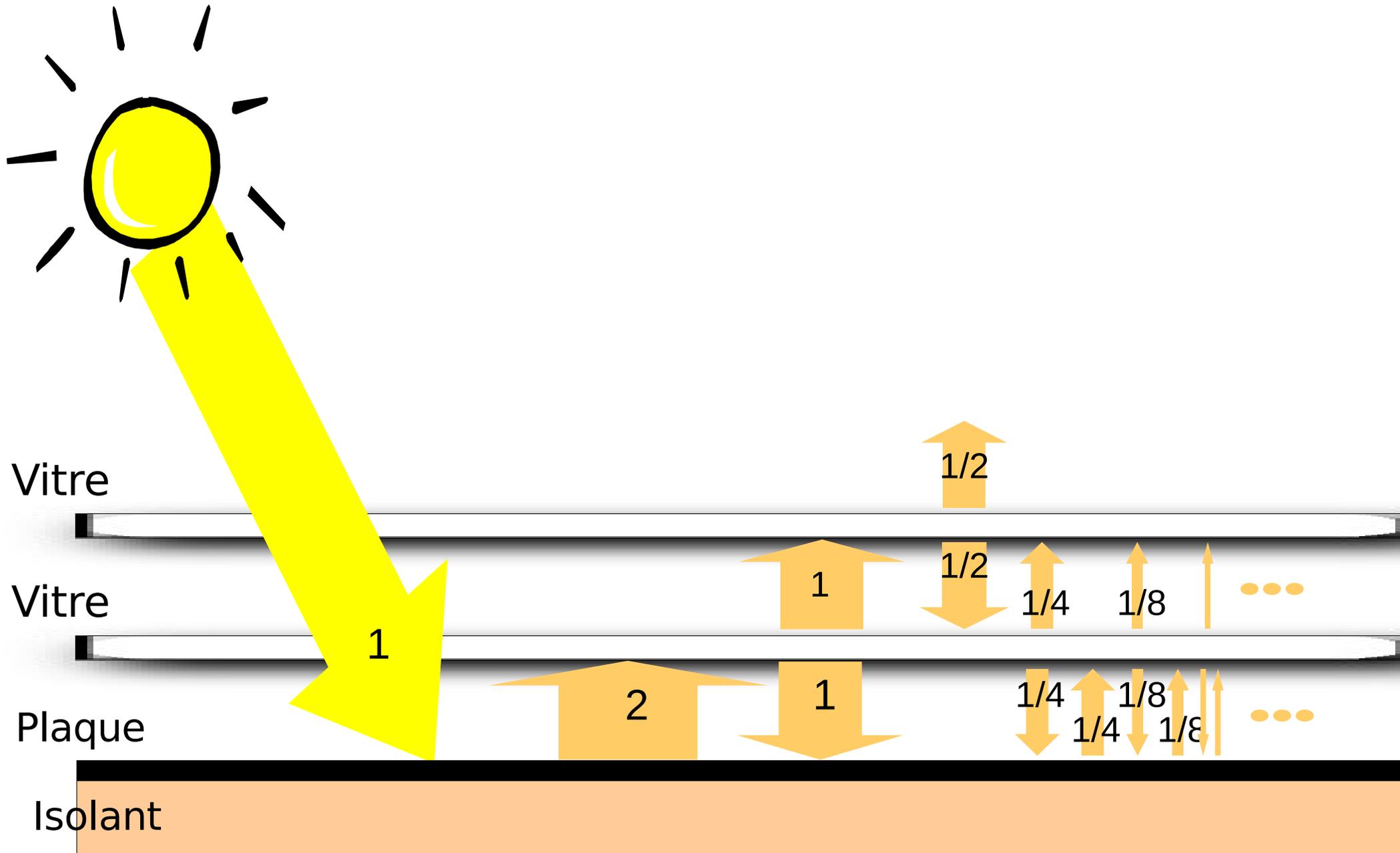
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



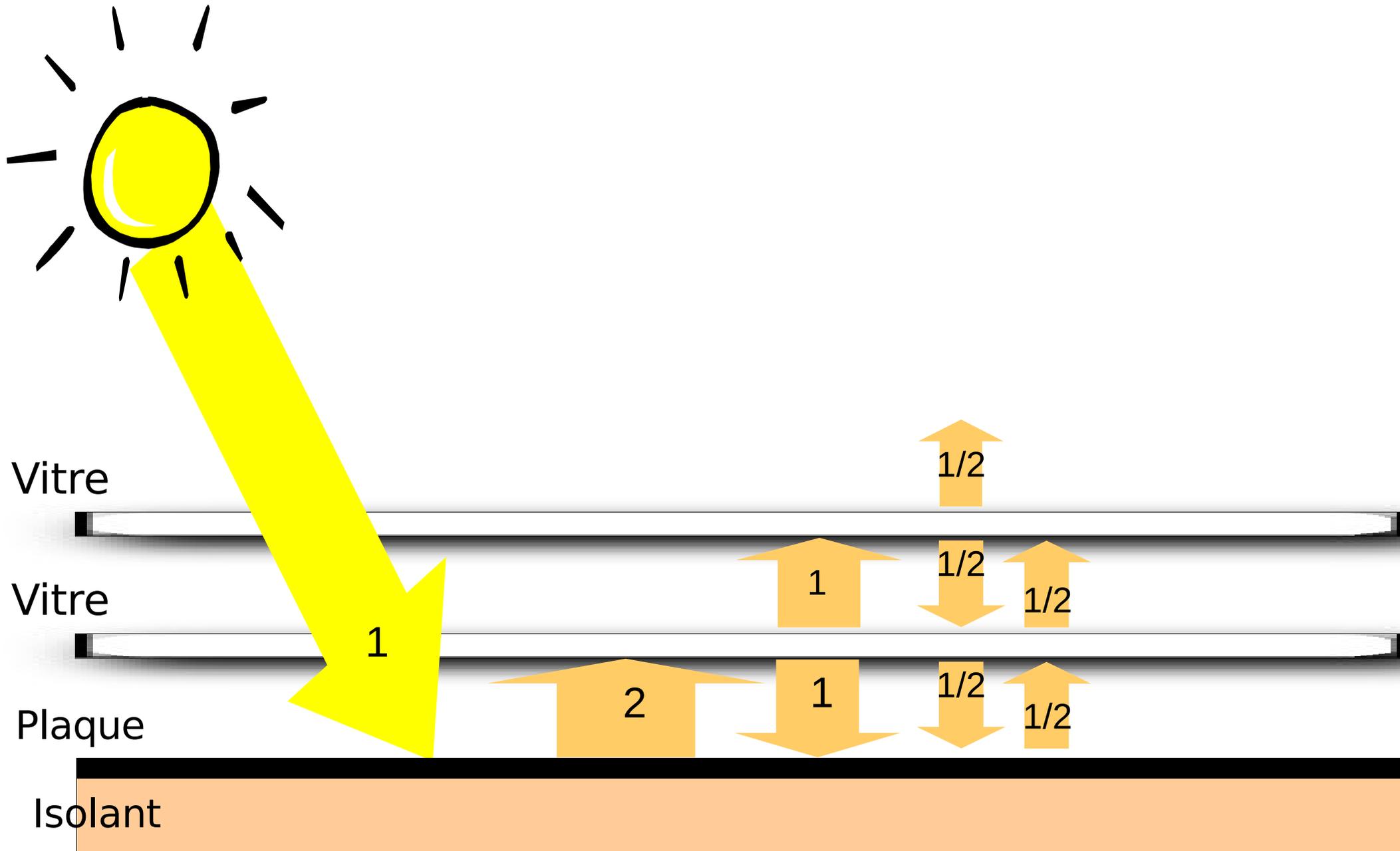
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



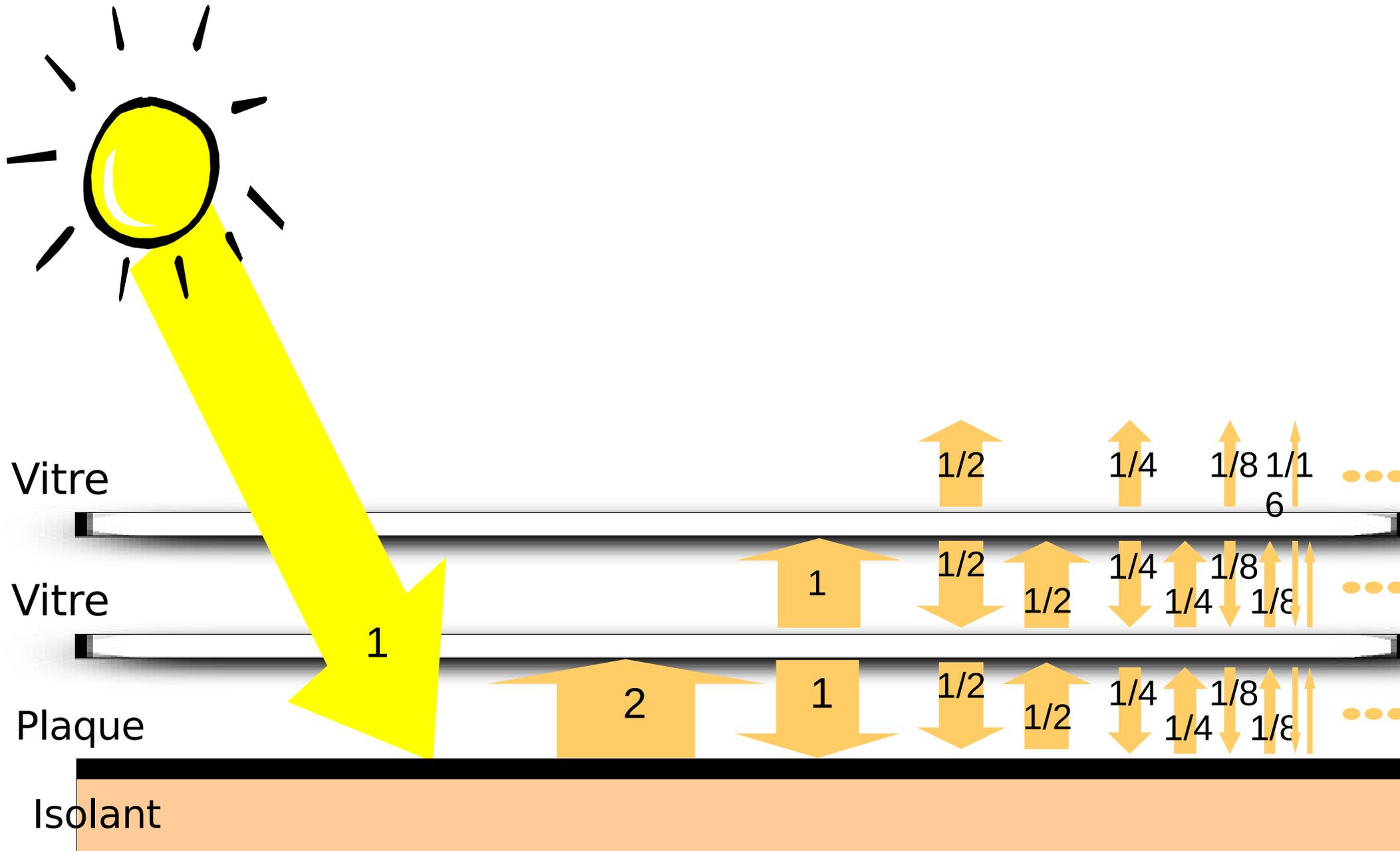
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



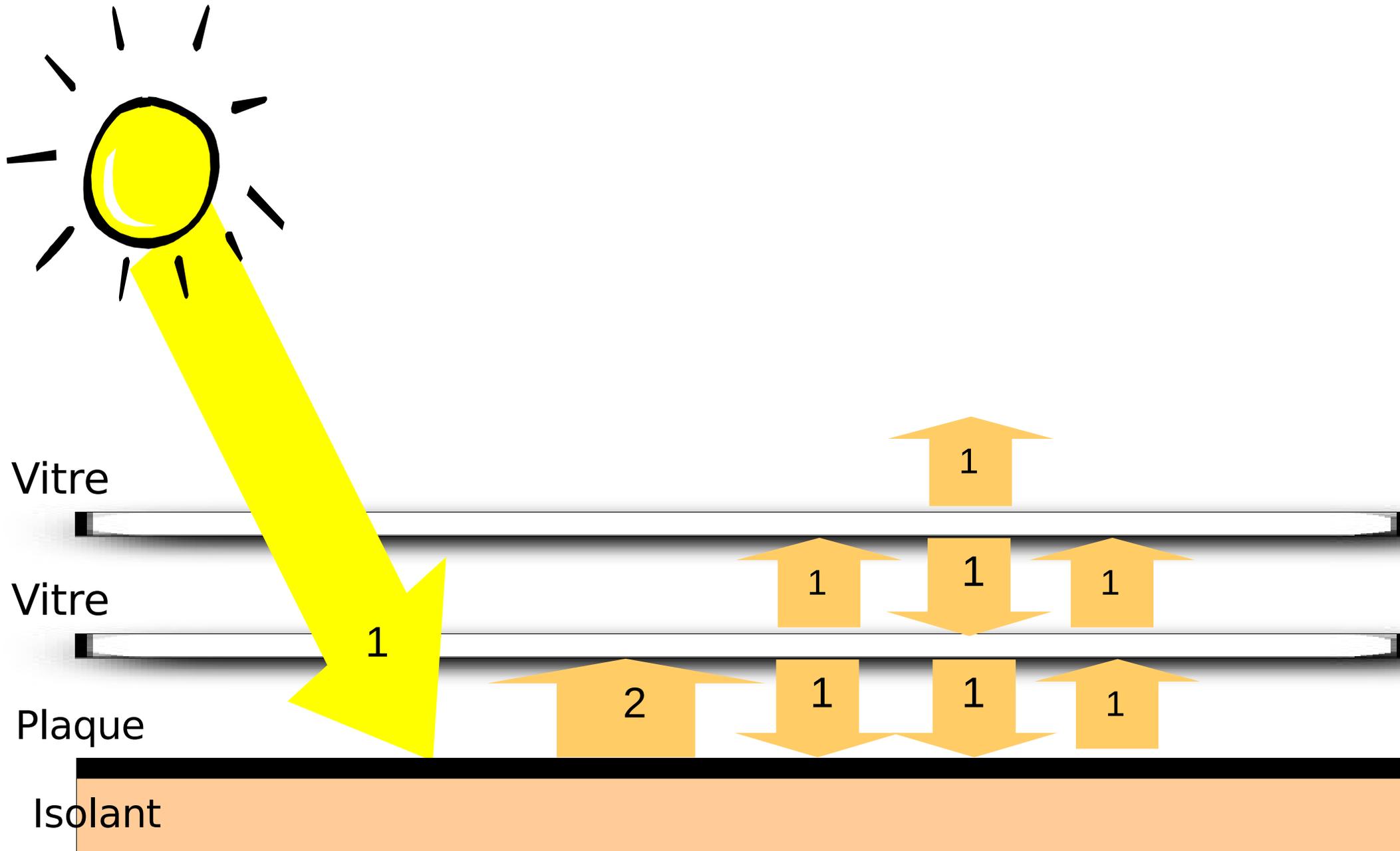
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



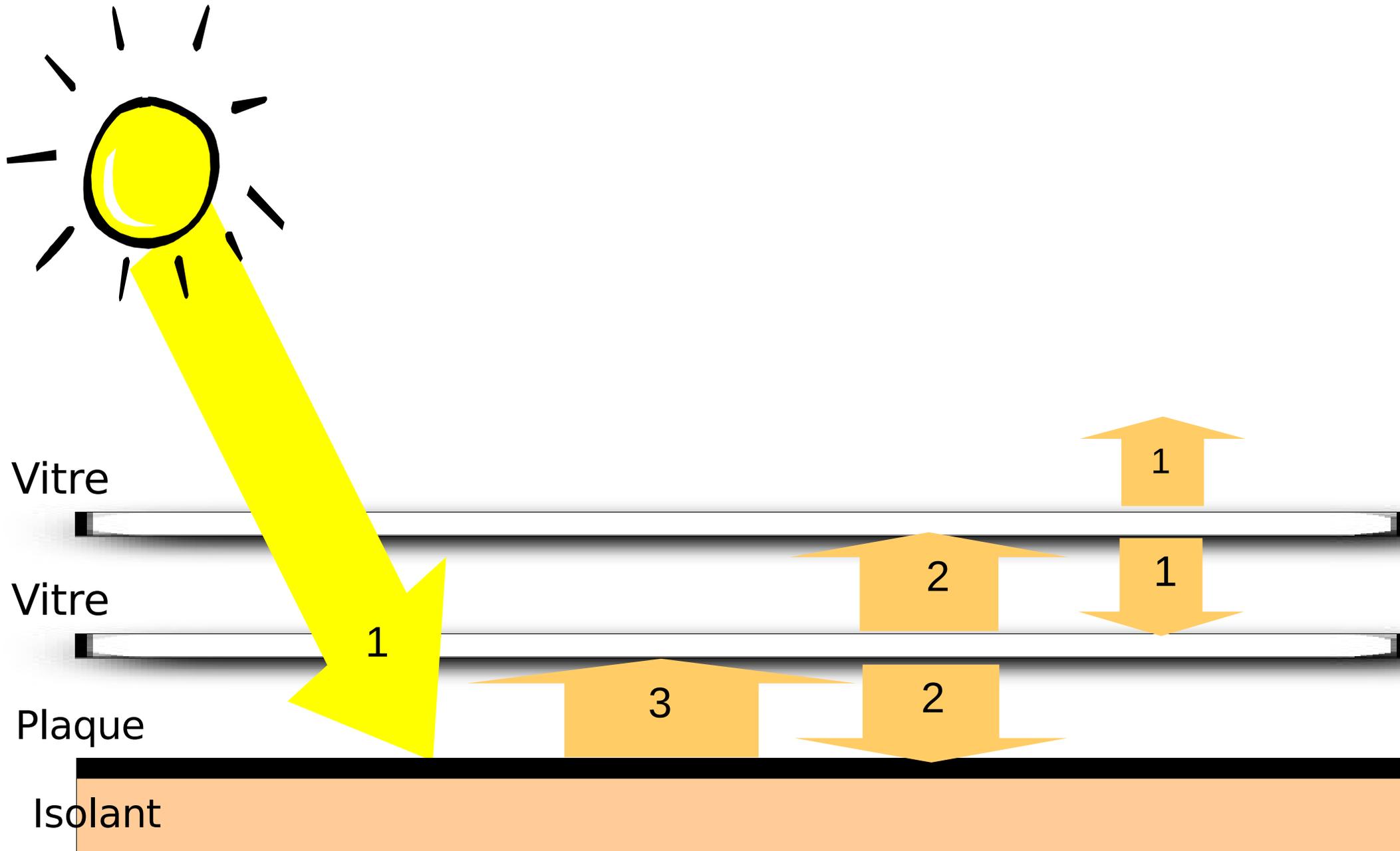
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



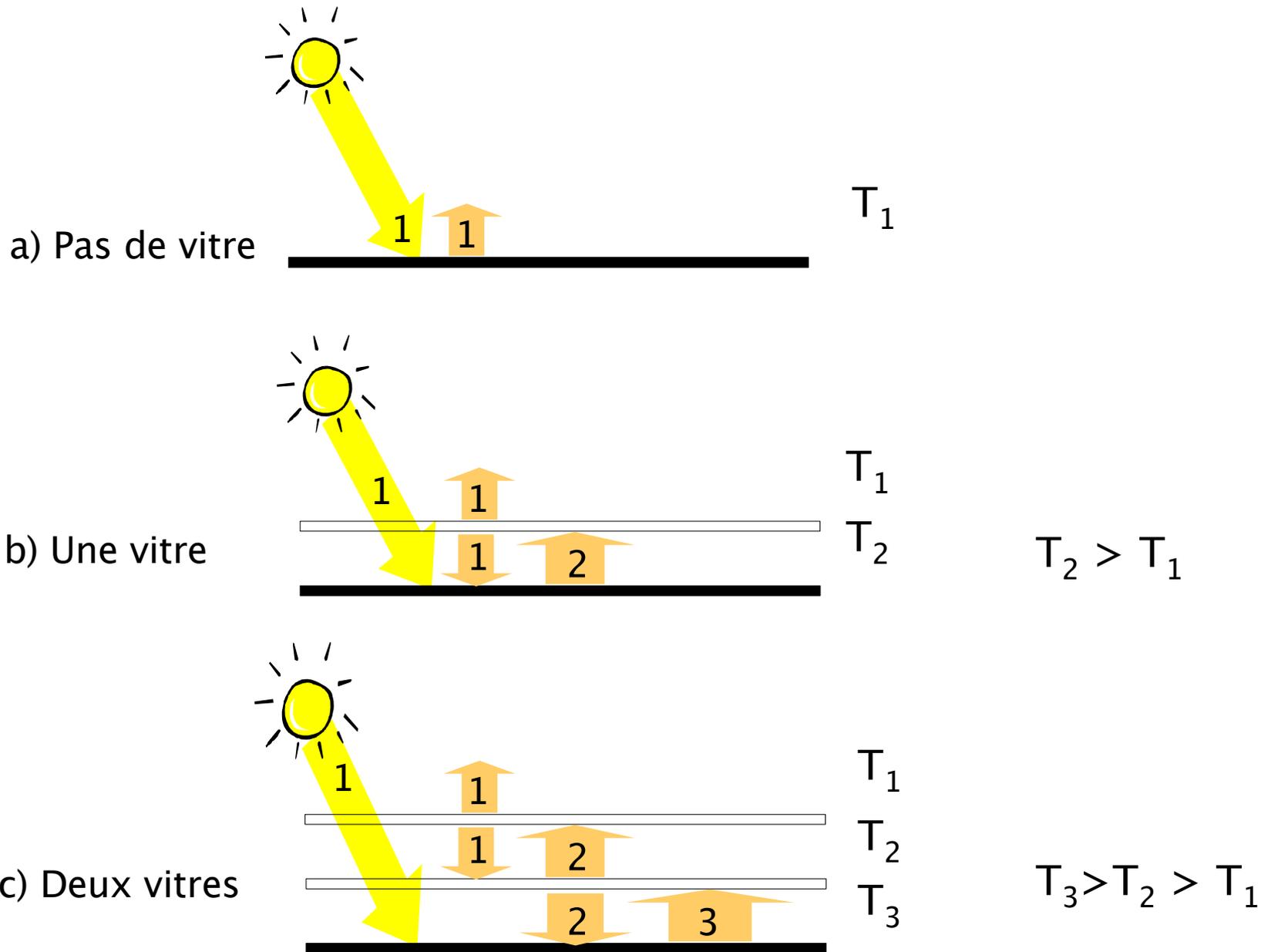
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



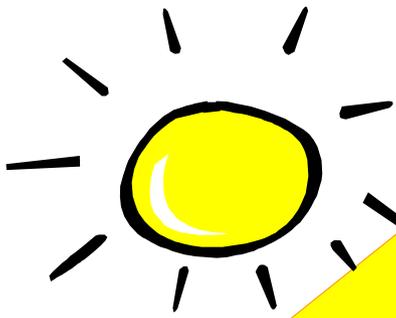
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



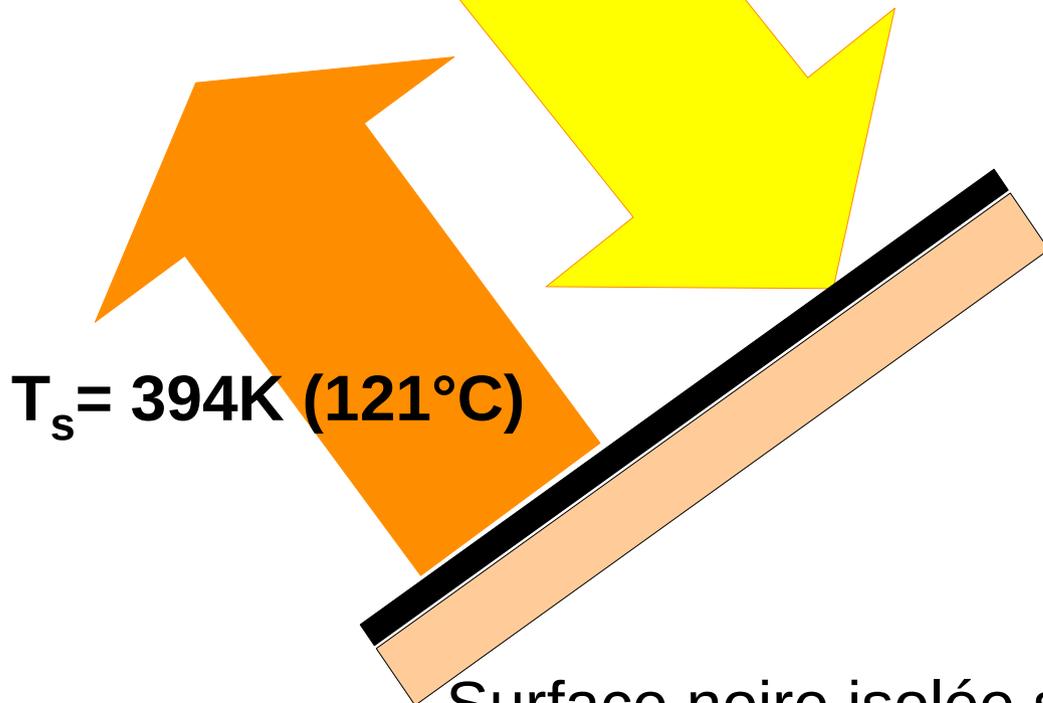
## 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# Température d'équilibre d'une planète



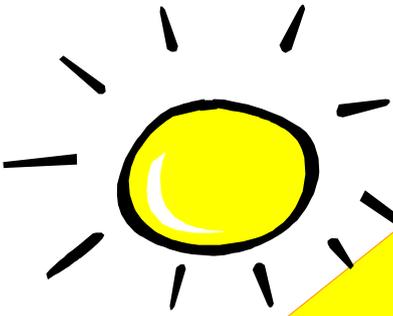
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$



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

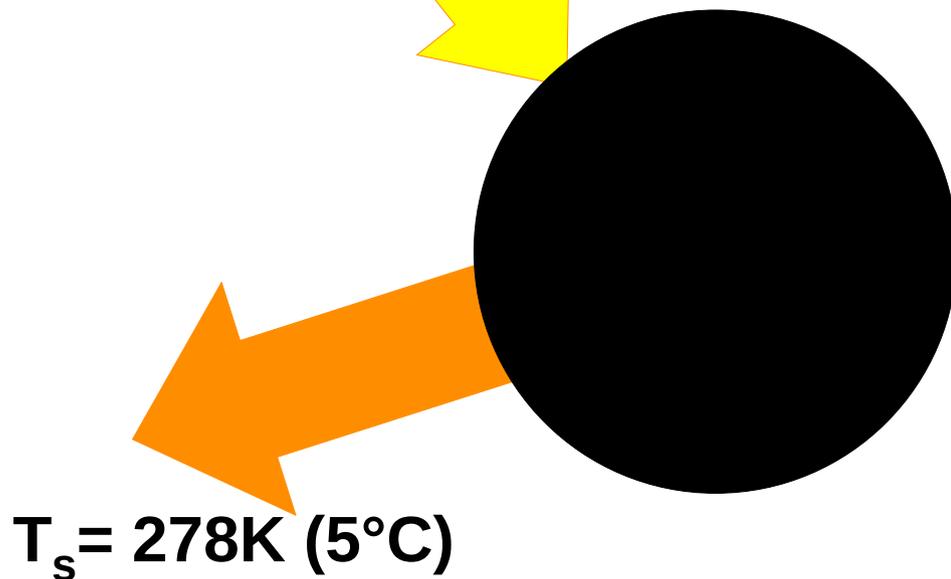
Surface noire isolée sur une face

# Température d'équilibre d'une planète



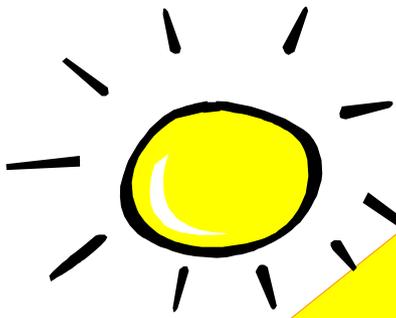
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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**:  $F_s = F_0/4 = 341 \text{ W.m}^{-2}$

1/3 du flux **réfléchi**

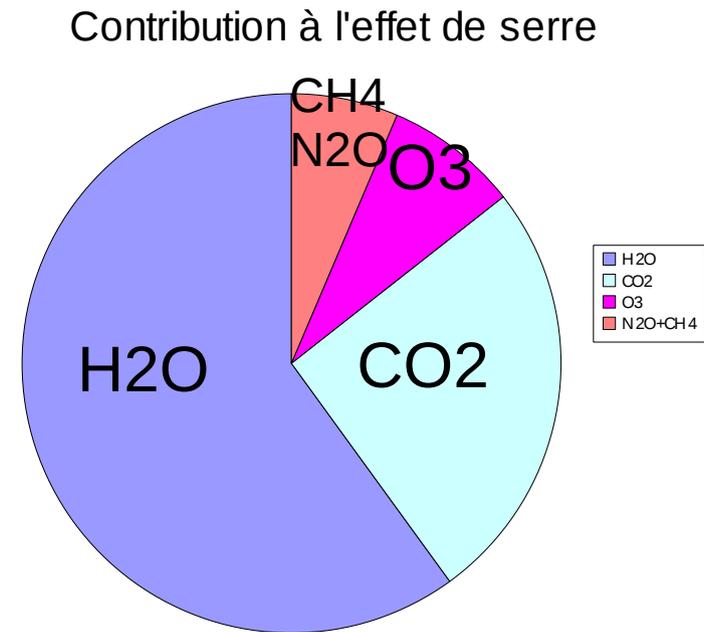


$T_s = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$

La **température** moyenne de la surface de la Terre est de **15°C** environ. ==> **Effet de serre**

# Quels sont les principaux gaz à effet de serre pour l'atmosphère de la Terre ?

Effet de serre ( $W.m^{-2}$ ):		
Vapeur d'eau	75	60%
CO <sub>2</sub>	32	26%
ozone	10	8%
N <sub>2</sub> O+CH <sub>4</sub>	8	6%

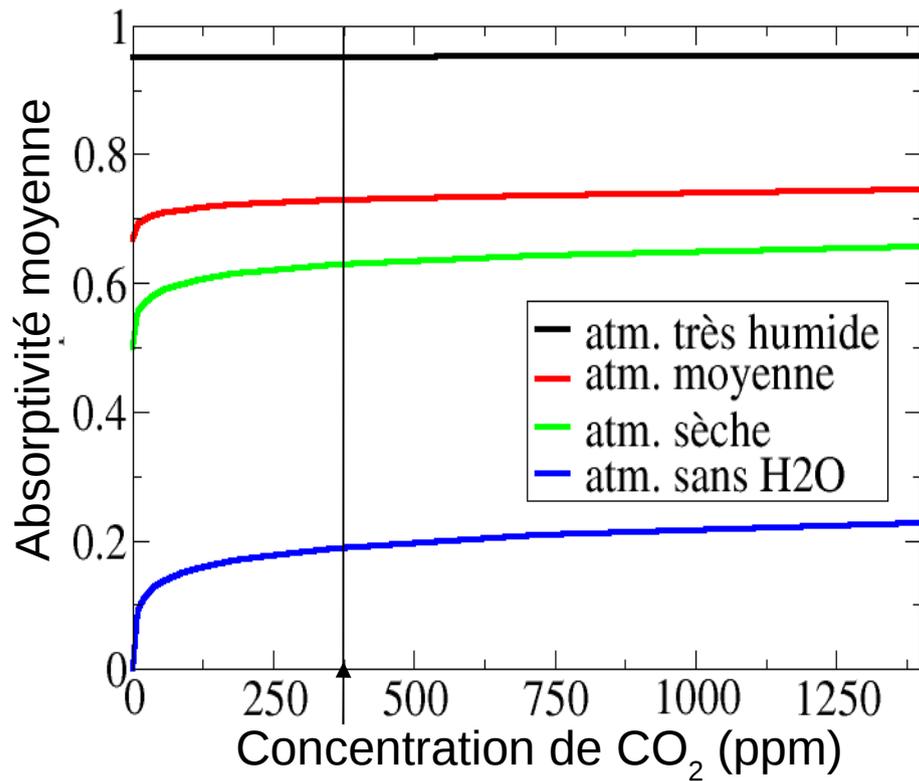


Source: Meehl and Trenberth, 1997

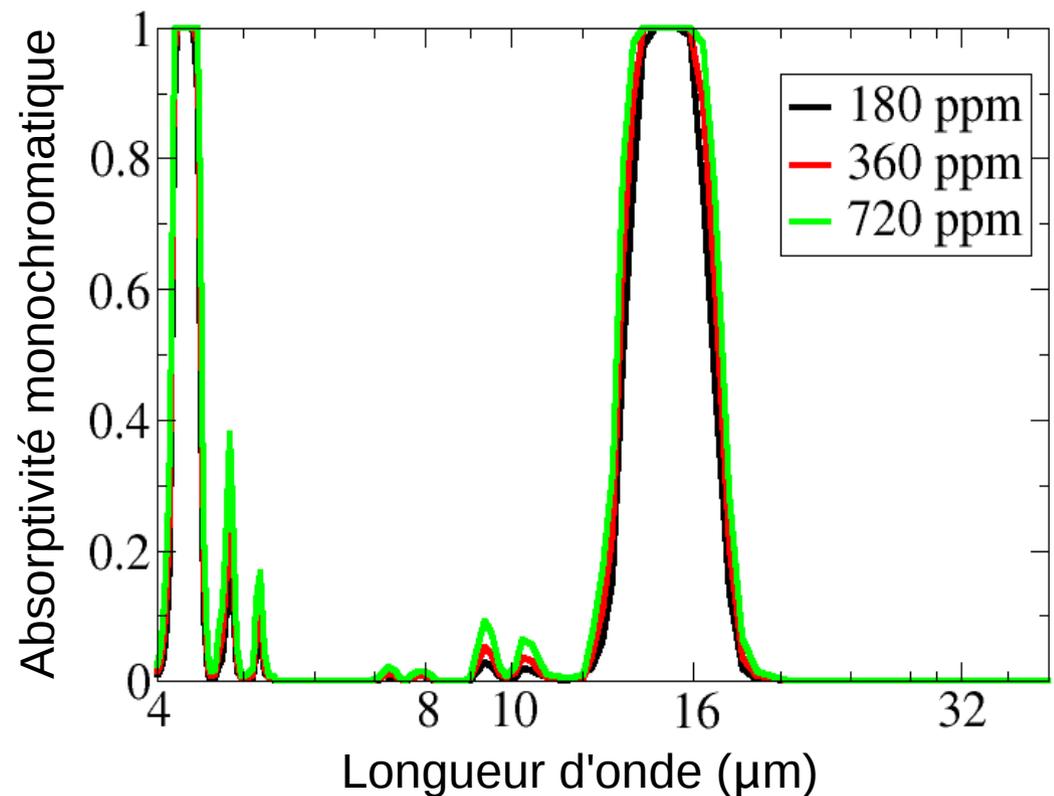
- La concentration de H<sub>2</sub>O est très variable dans le temps et dans l'espace: elle est en générale très liée à la température.
- La concentration de O<sub>3</sub> est surtout élevée entre 15 et 50 km d'altitude
- La concentration des autres gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O...) est assez uniforme

# Effet de saturation

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

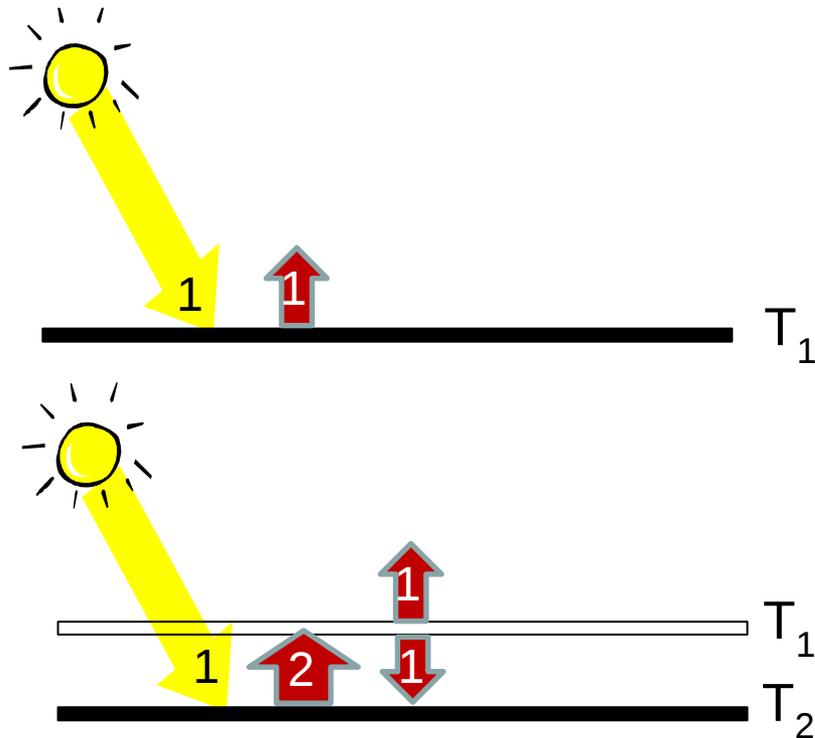


**Absorptivité monochromatique** de l'atmosphère due au seul  $\text{CO}_2$ , en fonction de la longueur d'onde, pour différentes concentrations de  $\text{CO}_2$

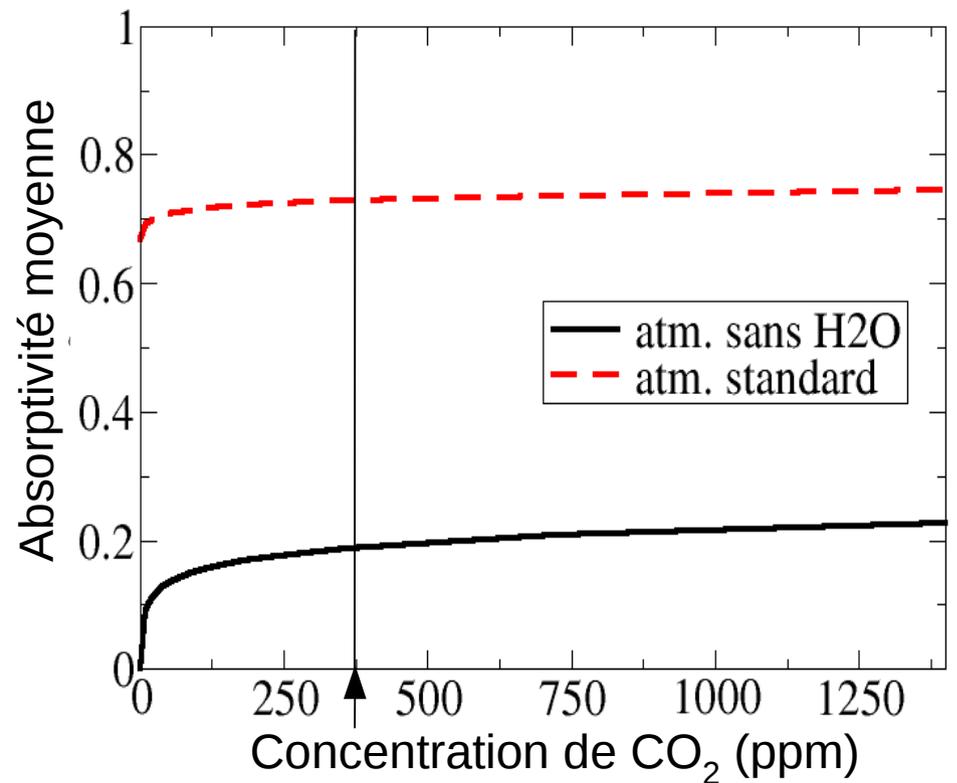


# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

## L'analogie de l'effet de serre



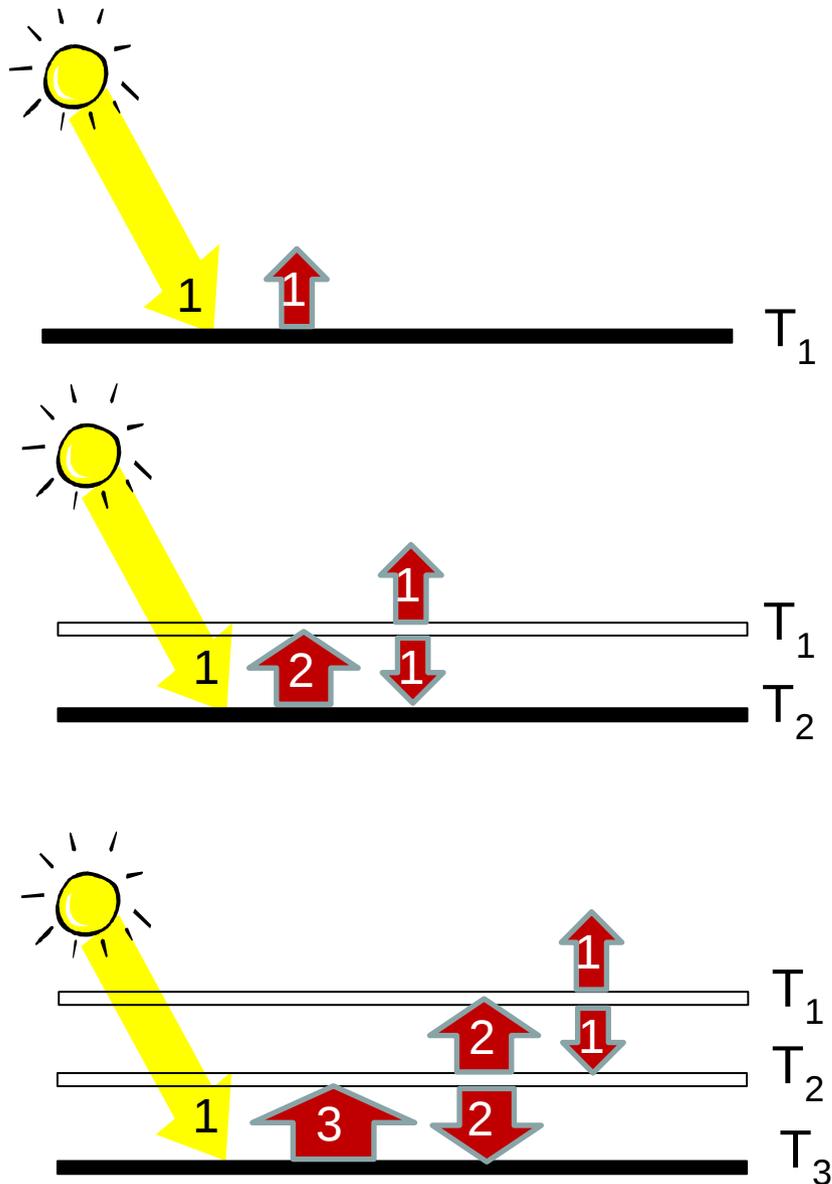
Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O



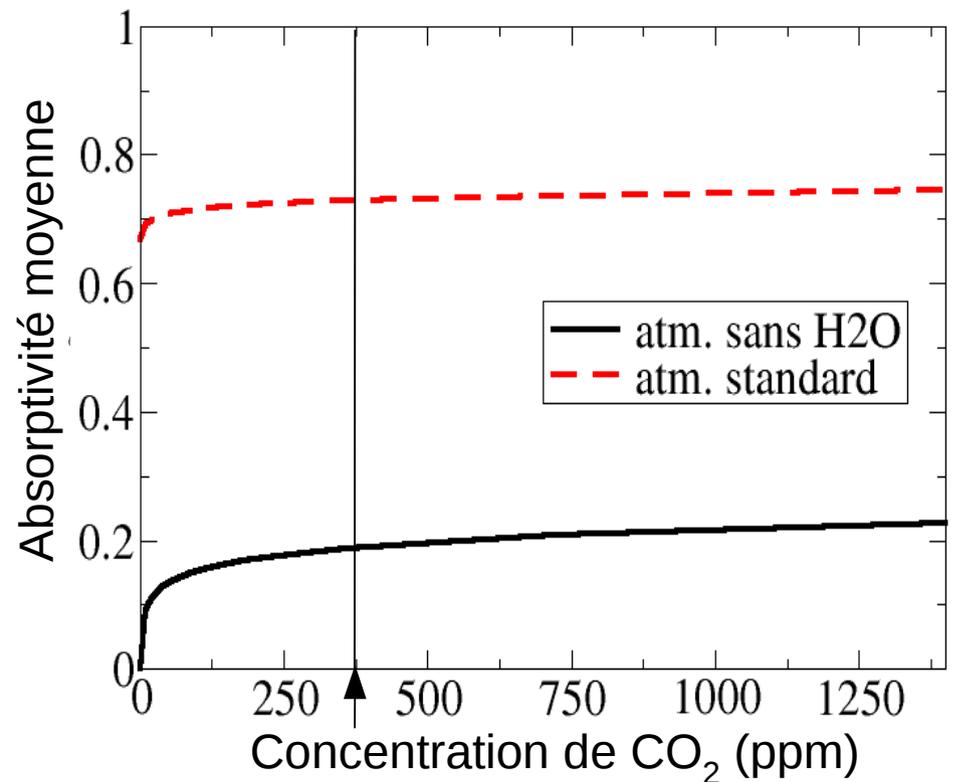
*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

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

## L'analogie de l'effet de serre



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

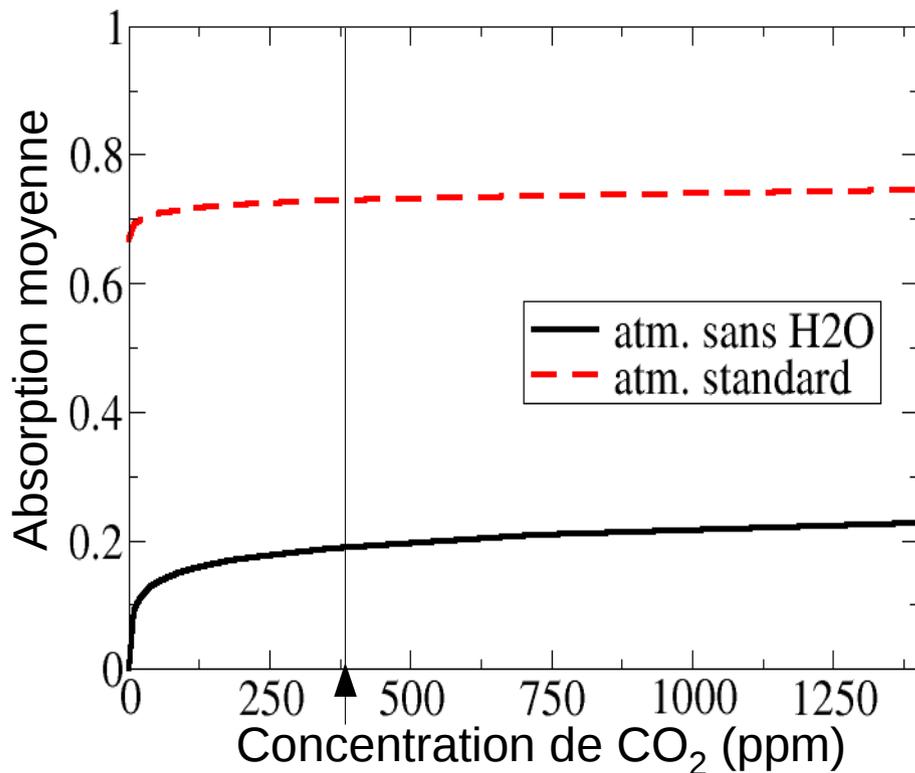


*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

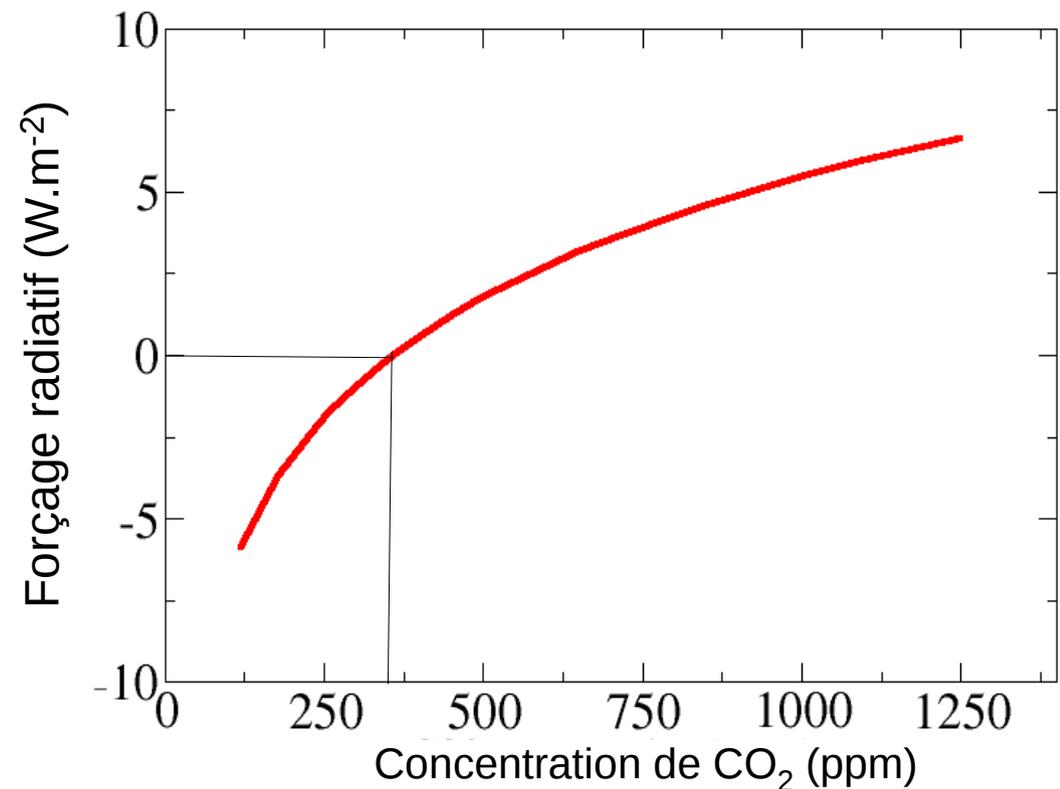
**NON!**

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

**Absorption** de l'atmosphère **moyennée** sur le domaine infra-rouge en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O



**Variation de l'effet de serre** pour une atmosphère "standard", en fonction de la concentration de CO<sub>2</sub>



***Même si l'absorption moyenne de l'atmosphère n'augmente pas lorsque le CO<sub>2</sub> augmente, l'effet de serre augmente car l'atmosphère est stratifiée en température***

# Conclusion sur l'effet de serre

- L'effet de serre est un phénomène physique bien compris... mais mal nommé (processus très différent de celui agissant 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 ses conséquences, plutôt que sur l'effet de serre lui-même.

# Modélisation du climat

- Film sur la modélisation
- Principes généraux des modèles

## ENJEUX

L'atmosphère terrestre n'a jamais eu la composition actuelle durant les derniers 400 000 ans et même, vraisemblablement, durant les derniers 20 millions d'années.

⇒ Le climat futur ne peut pas se déduire simplement de l'observation des climats passés et présents.

---

**But de la modélisation climatique : simuler le climat terrestre et son évolution**

⇒ simuler l'état moyen des enveloppes superficielles (atmosphère, océan, végétation ...) ainsi que leurs variabilités spatiales et temporelles en tout point de la surface de la Terre.

### **Caractéristiques du système climatique**

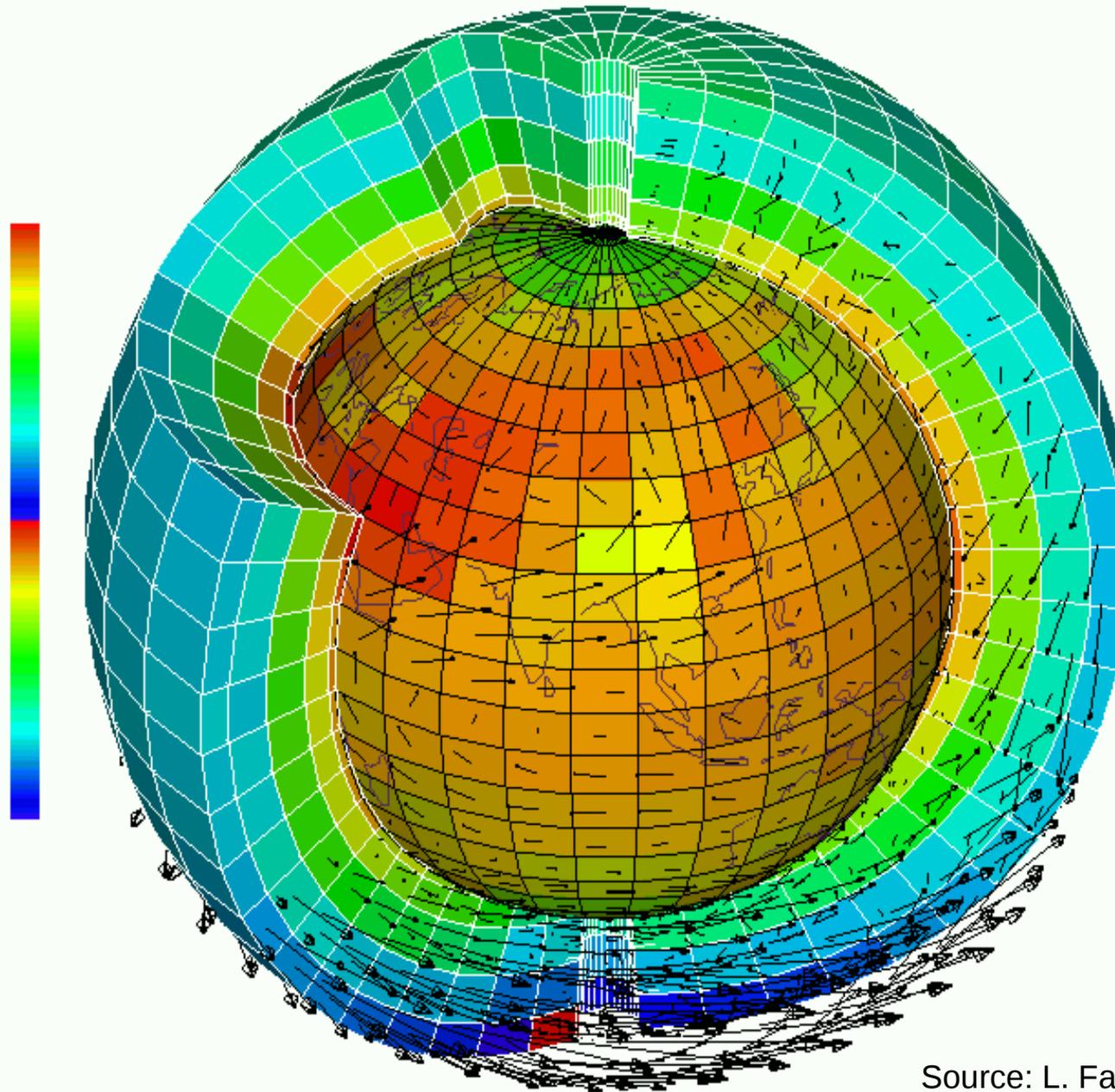
- Système très hétérogène
- Processus fortement couplés, couvrant un spectre très large de temps caractéristiques
- Comportement chaotique

### **Particularités**

- Il y a des processus dominants (cycle diurne ...);
- Mais aussi des phénomènes importants résultant de couplages entre processus non-linéaires
  - > comportement complexe et chaotique (par ex. : variabilité à l'échelle de qq jours des nuages et précips sur la France; variabilité à l'échelle de qq années de la température des eaux de surface du Pacific tropical est [El Nino]; variabilité à l'échelle de quelques dizaines d'années de la température des eaux de surface de l'Atlantique nord [Oscillation Multi-décennale Atlantique]).
- Système difficile à observer (avènement des satellites -> amélioration de la couverture spatiale et temporelle, mais il reste difficile d'analyser un système convectif pendant sa durée de vie; et les profondeurs de l'océan restent en grande partie inaccessible).

**==> Domaine où la modélisation et la simulation numérique jouent des rôles clef.**

# Modélisation numérique 3D du climat

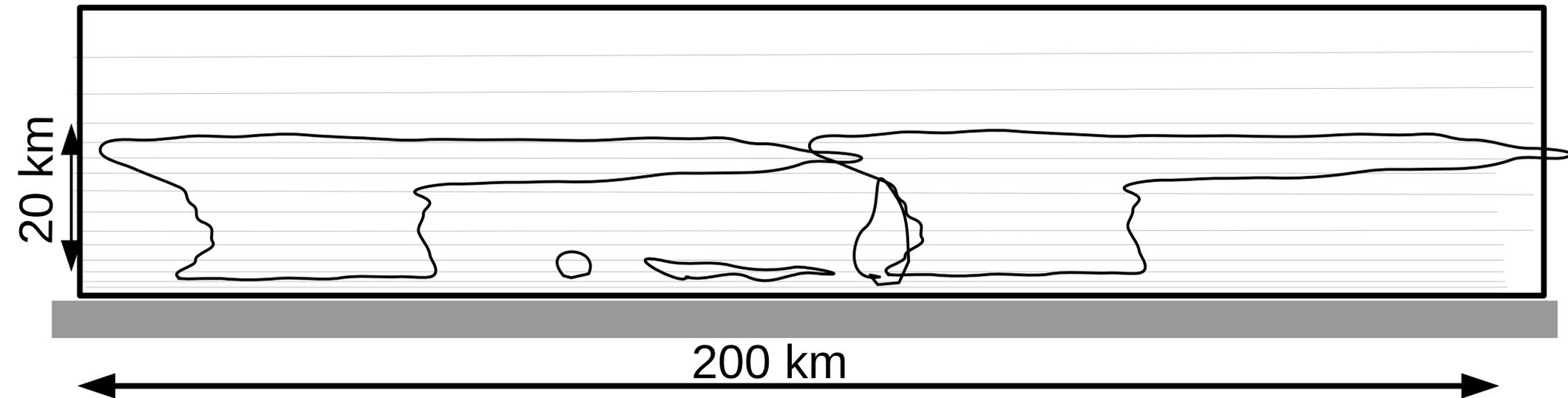


Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

# Discrétisation

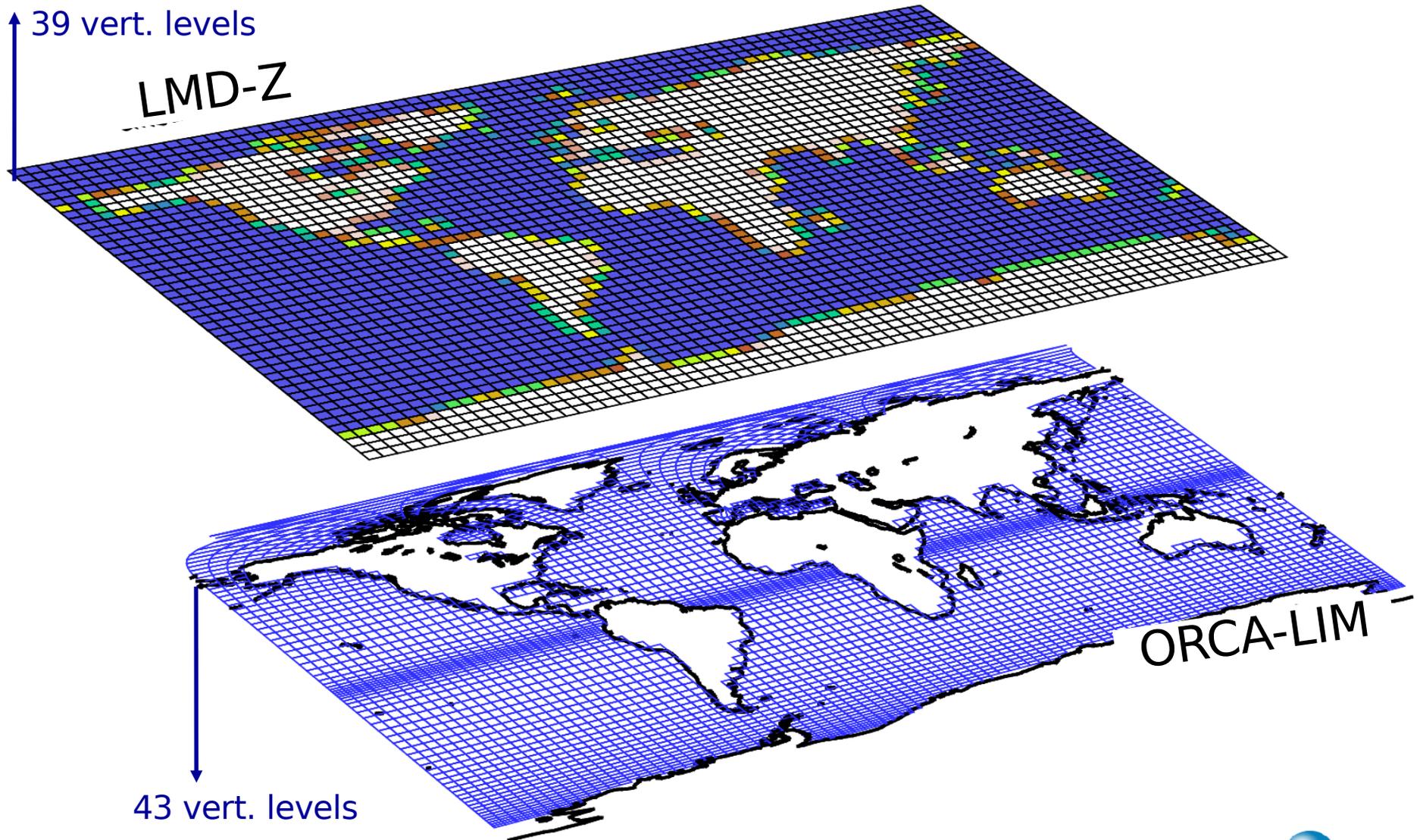
- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 100 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 100m (ou moins) au niveau du sol, à quelques kilomètres dans la stratosphère.

## Colonne atmosphérique typique:



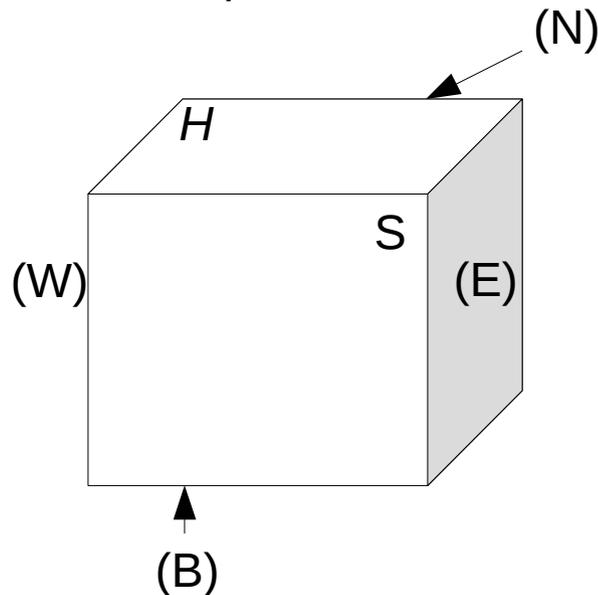
# Couplage avec un modèle de circulation océanique

## Modèle climatique de l'IPSL



# Principes généraux d'un modèle de circulation générale atmosphérique (AGCM)

L'atmosphère est divisée en mailles. A chaque maille sont associées des variables d'état :



- La température  $T$ ,
- L'humidité  $q$ ,
- La vitesses zonale  $u$ ,
- La vitesse méridienne  $v$ .

La simulation part d'un état initial et avance pas à pas dans le temps.  
(pas de temps de quelques minutes à une demi-heure)

L'évolution des variables obéit à des équations de bilan :

$U_w A_w q_w \Delta t$

$$q(t+\Delta t) = q(t) + [\text{transp à travers } W] - [\text{transp à travers } E] \\ + [\text{transp à travers } S] - [\text{transp à travers } N] \\ + \text{transp à travers } B - \text{transp à travers } H \\ + [\text{source}]$$

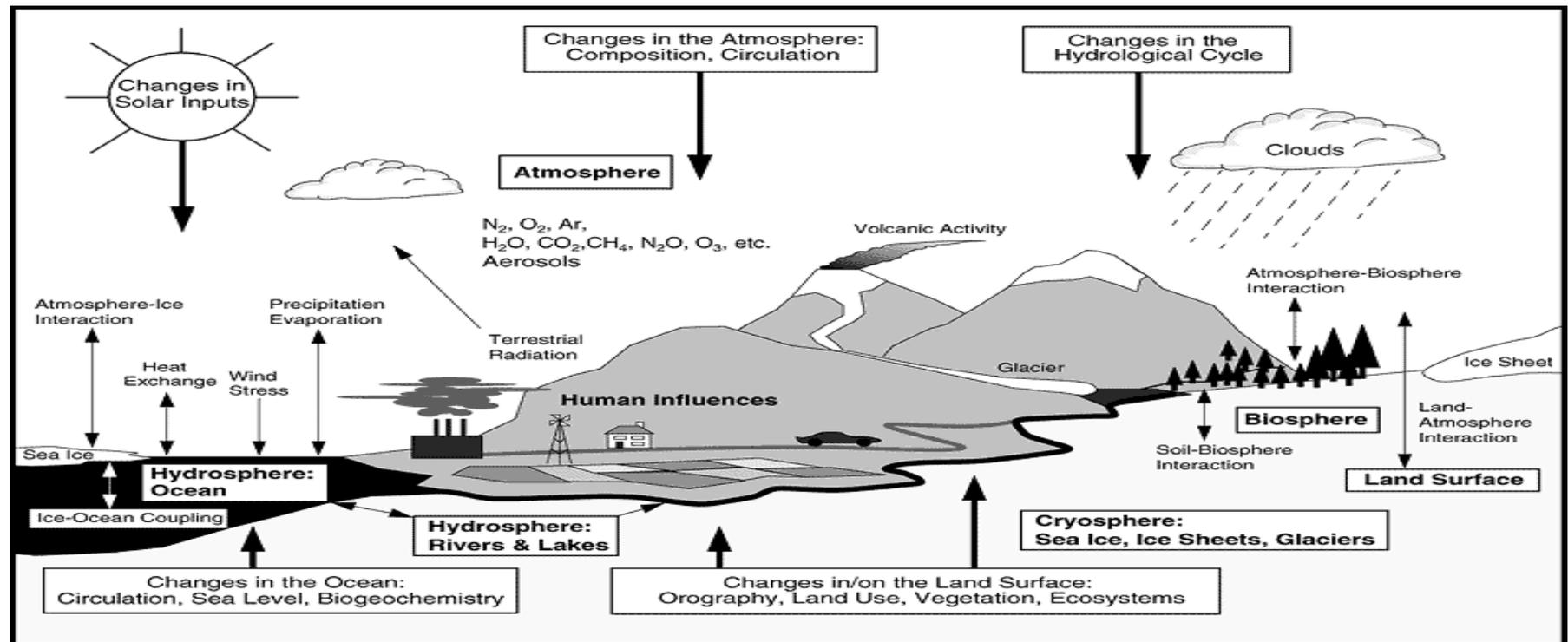
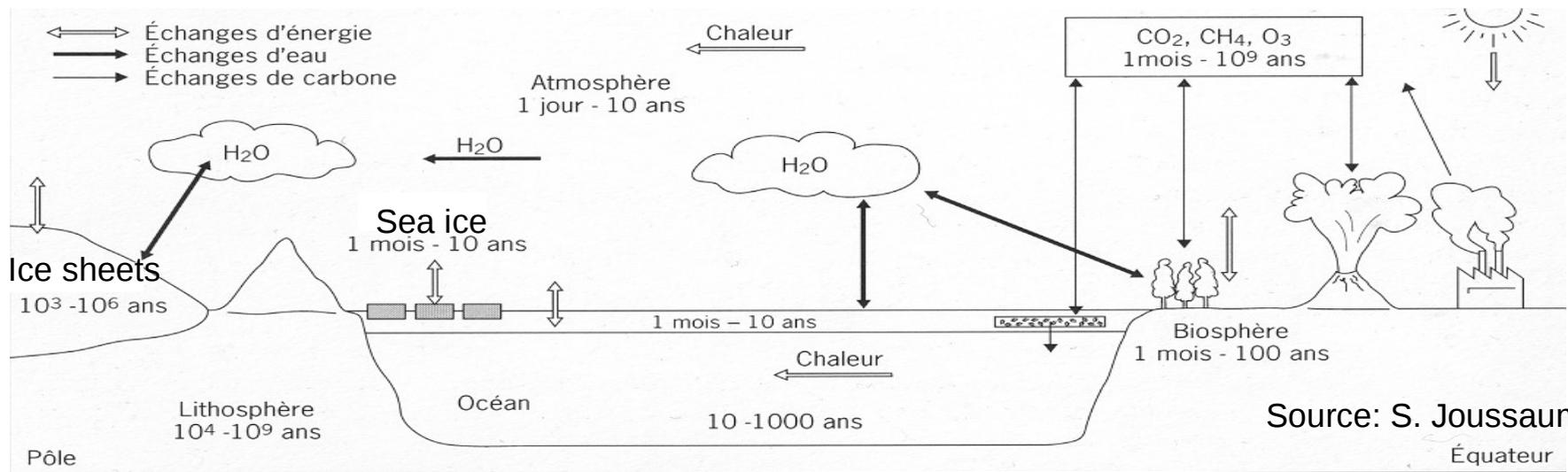
Avec des équations analogues pour la température et les vitesses  
(en un peu plus compliqué : forces de Coriolis et de pression).

# Principes généraux d'un modèle de circulation générale atmosphérique (AGCM)

Les termes **source** représentent l'effet des processus d'échelle inférieure à la maille. Ils sont déterminés par les **paramétrisations** physiques :

- Processus de couche limite et échanges avec la surface.
- Processus nuageux et précipitations.
- Convection profonde (orages).
- Échanges radiatifs (pour la température).
- . . . . .

# Modélisation du climat : mondes des apparences et physique



## Les deux concepts clefs de la modélisation climatique

- **Découpage** en modèles "élémentaires", ce qui permet (1) de travailler avec des modèles partiels de taille gérable, (2) de compliquer peu à peu le modèle ;
- **Couplage et raccordement** avec les dynamiques atmosphérique et océanique (et, un peu, entre ces modèles élémentaires).

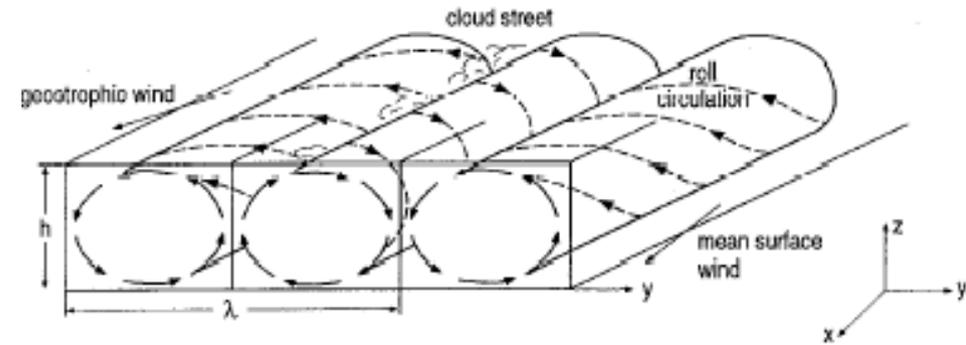
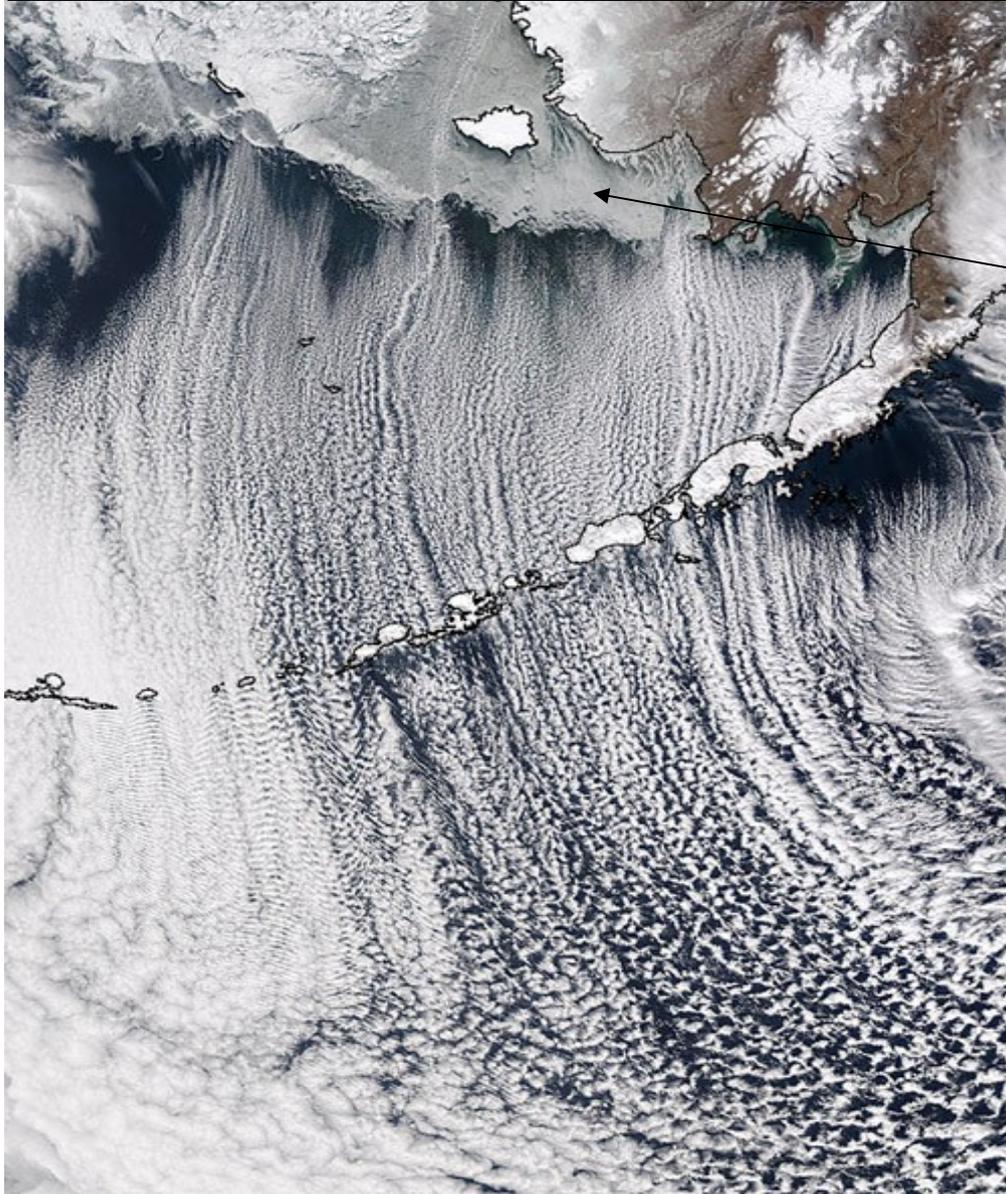
La façon de voir de Charney semble fonctionner, vraisemblablement parce que les "dynamiques" sont les parties les plus solides, les plus théorisées, des modèles climatiques.

# Récapitulation

- GCM = modèle (ensemble d'équations et mise en oeuvre informatique associée) dont le but est de simuler le comportement au fil du temps des circulations globales de l'atmosphère et de l'océan ainsi que des processus connexes : météorologiques, chimiques, biologiques ...
- Les GCMs atmosphériques sont divisés en 2 parties : (i) la **Dynamique** résout les équations de la dynamique atmosphérique; (ii) la **Physique** représente les processus d'échanges verticaux d'échelle plus petite que la maille.
- **Découpage et raccordement** permettent le développement de sous-modèles spécifiques pour chaque partie et l'analyse des couplages entre ces parties.
- Ce qu'on attend des GCMs: (i) représenter les **valeurs moyennes** des variables climatiques; (ii) représenter la **variabilité** des variables climatiques (diurne à séculaire), y compris les événements extrêmes; (iii) posséder des **sensibilités** correctes (e.g. à [CO<sub>2</sub>]); (iv) posséder des **feedbacks** corrects.

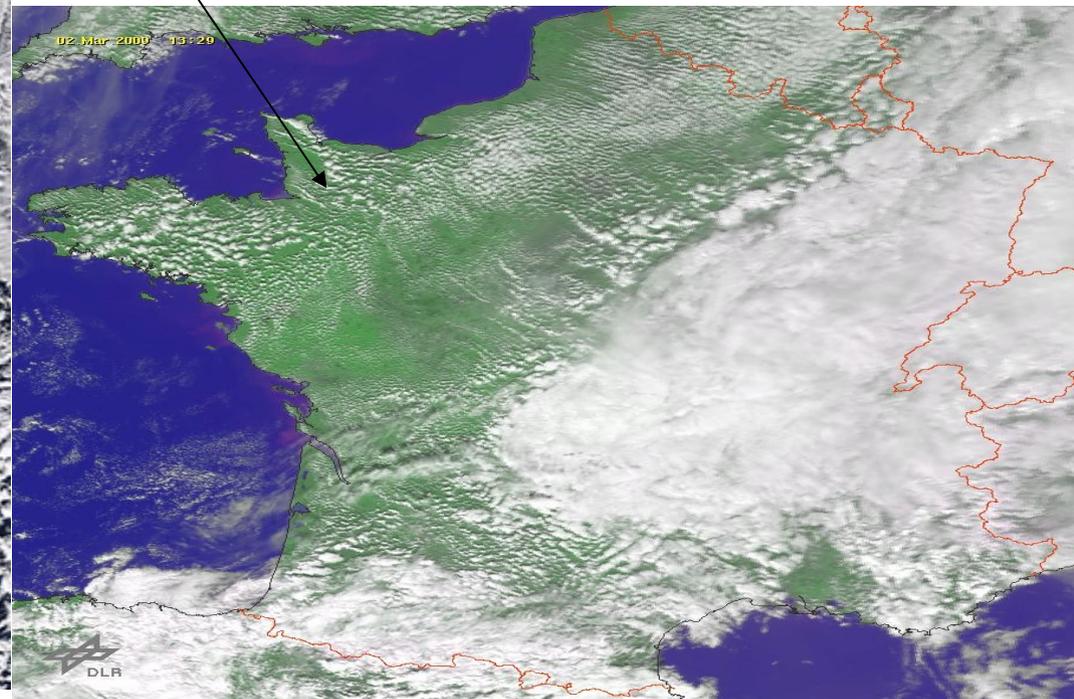
**Exemple de paramétrisation physique :  
Les paramétrisations de couche limite**

## Importance of organized structures visualized here by cloud streets



Classical example of cloud streets induced at the top of convective rolls :

- Cold polar air arriving over warmer ocean air mass.
- Warm maritime air arriving over a warmer continent.



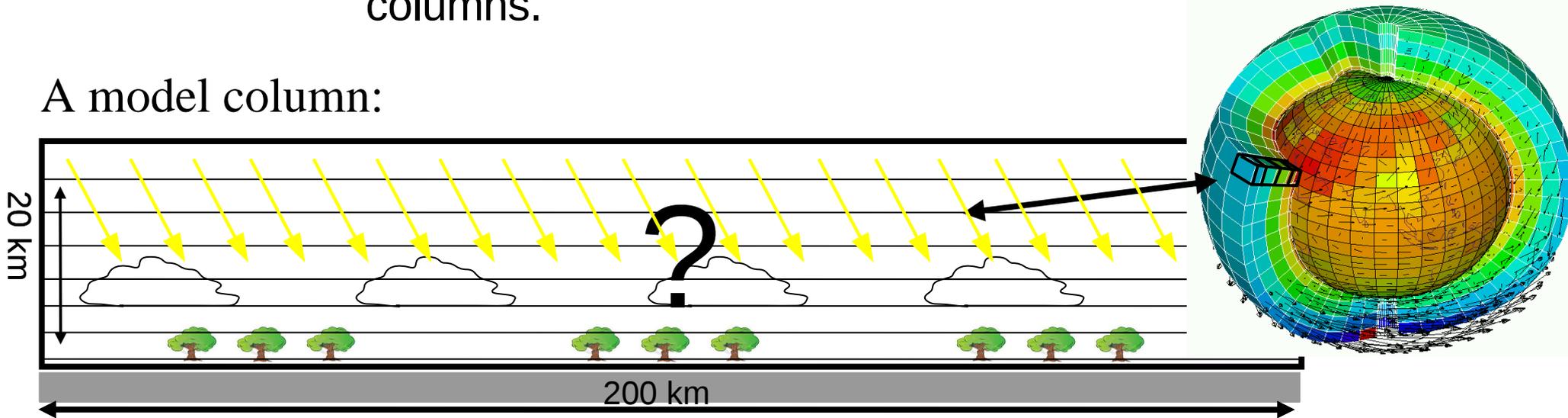
continent.

# Parametrizations

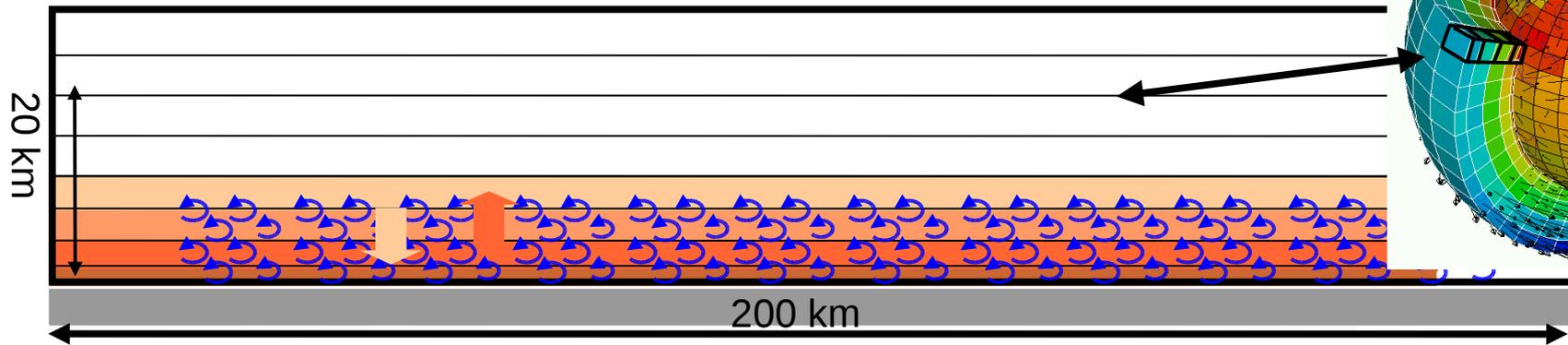


- Determine the **effect of sub-grid processes** on the **state variables** (velocity, temperature, humidity) of the global model
- **Approximate description** of the behaviour of processes
- Making use of **internal variables** (cloud features, sub-grid statistical distribution of some variables ...)
- Equations expressing these internal variables in term of the model state variables (also called large scale variables).
- **Homogeneity hypothesis**  $\implies$  1D equations in  $z$ ; independent columns.

A model column:



In a model column, there is first turbulence



## Parametrizations

- Turbulent diffusion or "**Turbulent mixing**": transport by small random movements. Similar to molecular diffusion.

$$Dq/Dt = S_q \quad \text{where} \quad S_q = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial q}{\partial z} \right)$$

- **Prandtl mixing length** :  $K_z = l |w|$   
 $l$  : characteristic length of the small movements  
 $w$  : characteristic speed
- **Turbulent kinetic energy** :  $K_z = l \sqrt{e}$

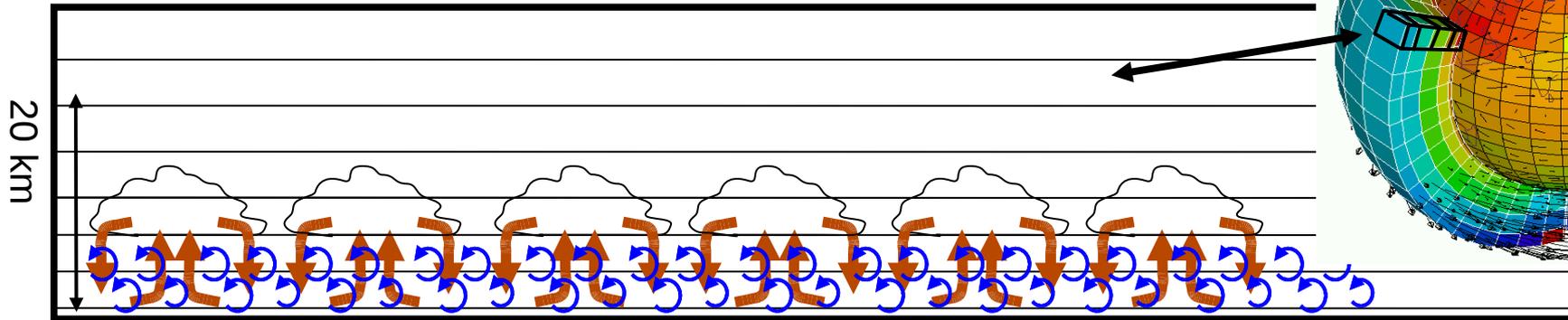
$$De/Dt = f(dU/dz, d\theta/dz, e, \dots)$$

$$Dl/Dt = \dots$$

A whole world of research ...

Same models used in engineering.  
 Use of similarity law => lab. experiments

In a model column there are also structures of boundary layer scale



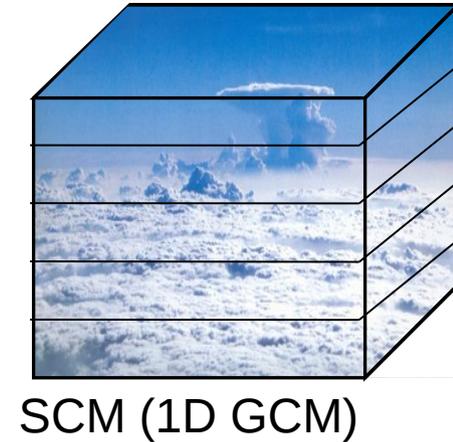
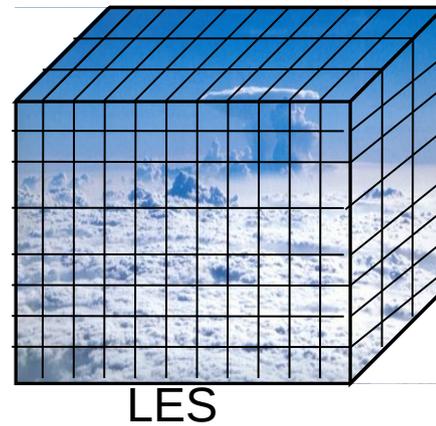
**“The Thermal Model”:**

Each column is split in two parts:  
Ascending air from the surface and  
subsiding air around it.

The model represents a mean plume  
(the thermal) and a mean cloud.

# 1D test of the cloudy thermal plume model

Continental diurnal cycle with cumulus  
ARM EUROCS case (US Oklahoma)  
Rio et al. 2008



Specific humidity (g/kg)

