

# Les variations climatiques et le rôle des activités humaines

Jean-Louis Dufresne

Pôle de modélisation de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)  
Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)

[dufresne@lmd.jussieu.fr](mailto: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

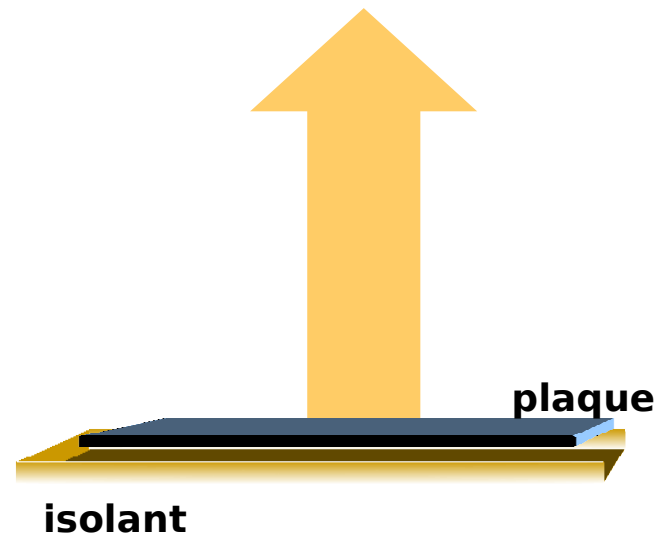
3) L'équilibre énergétique

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

5) L'effet de serre

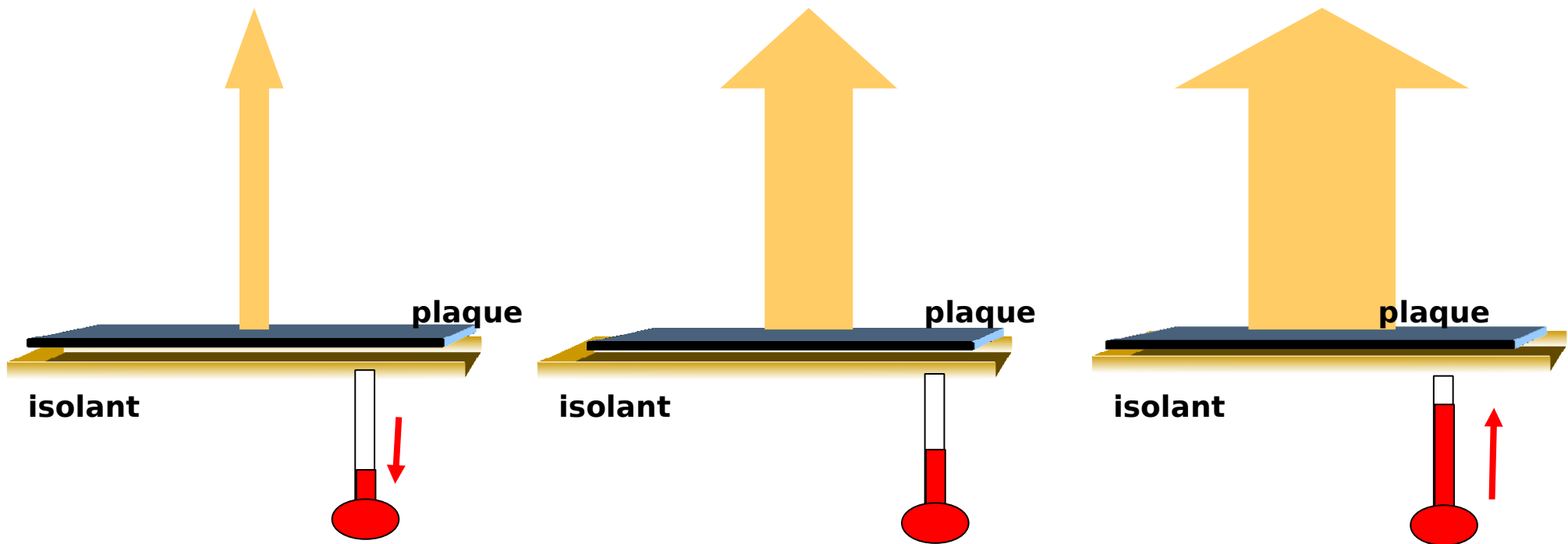
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum?

# 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

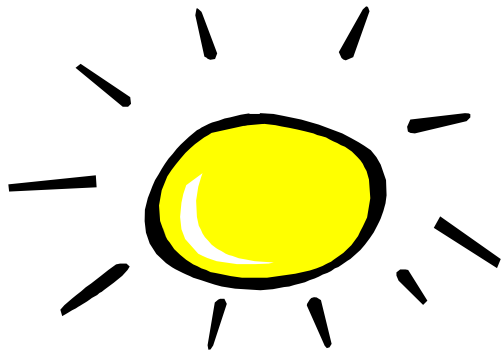


*b) Plus la température du corps est élevée, plus l'énergie perdue est élevée*

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

a) Si la température de l'objet est 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 :  
 $T = 2500^{\circ}\text{C}$



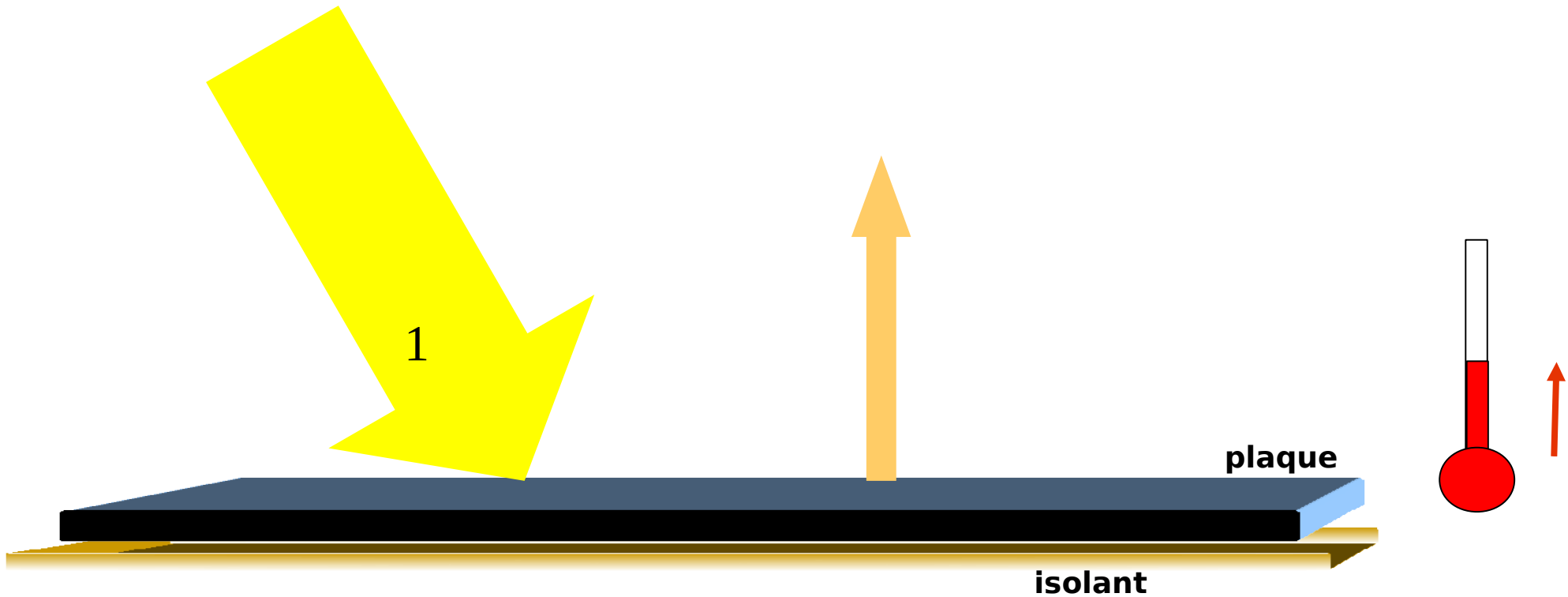
Lave de volcan  
 $T = 1000^{\circ}\text{C}$

## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

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

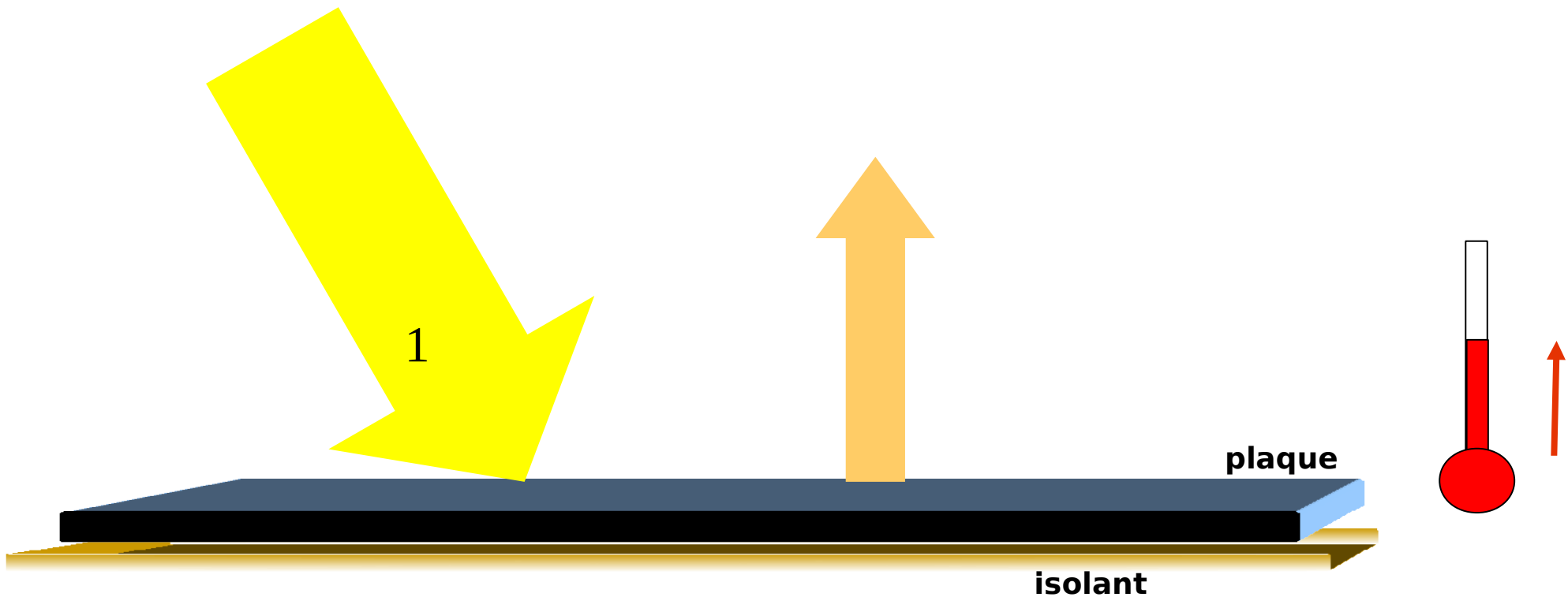
C'est le rayonnement infrarouge

### 3) L'équilibre énergétique



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

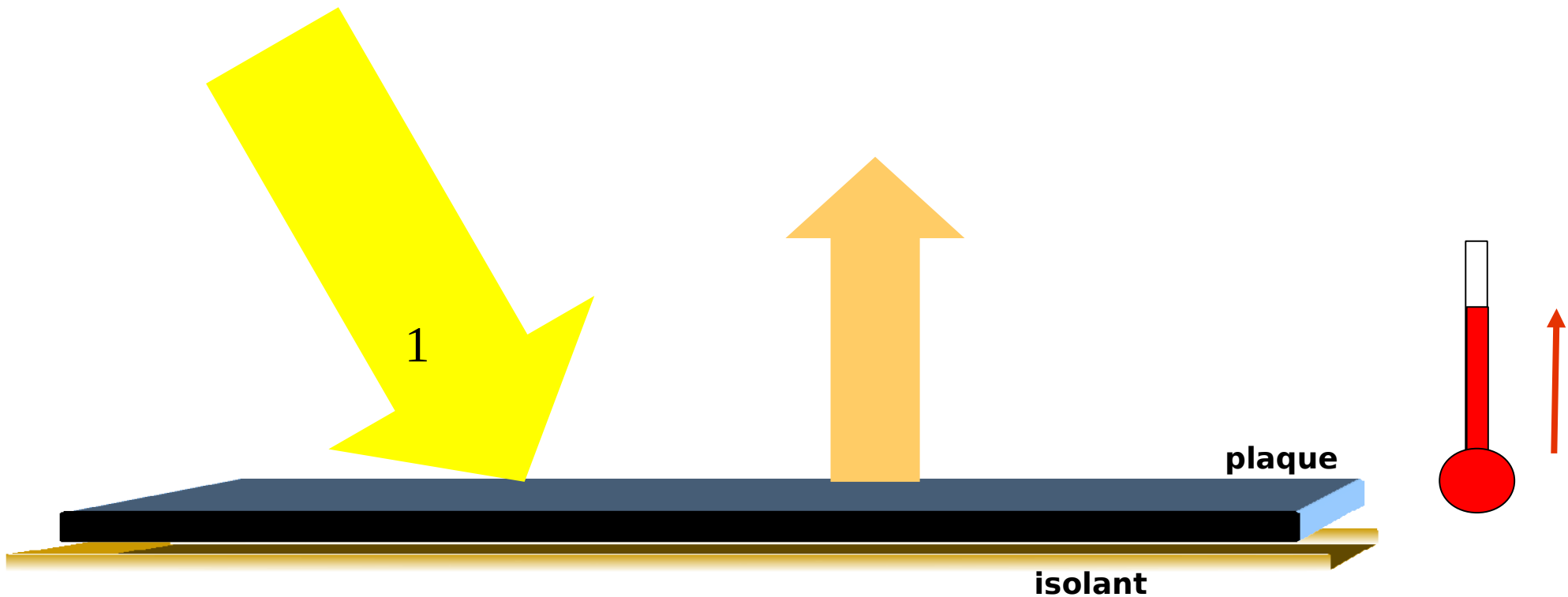
### 3) L'équilibre énergétique



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

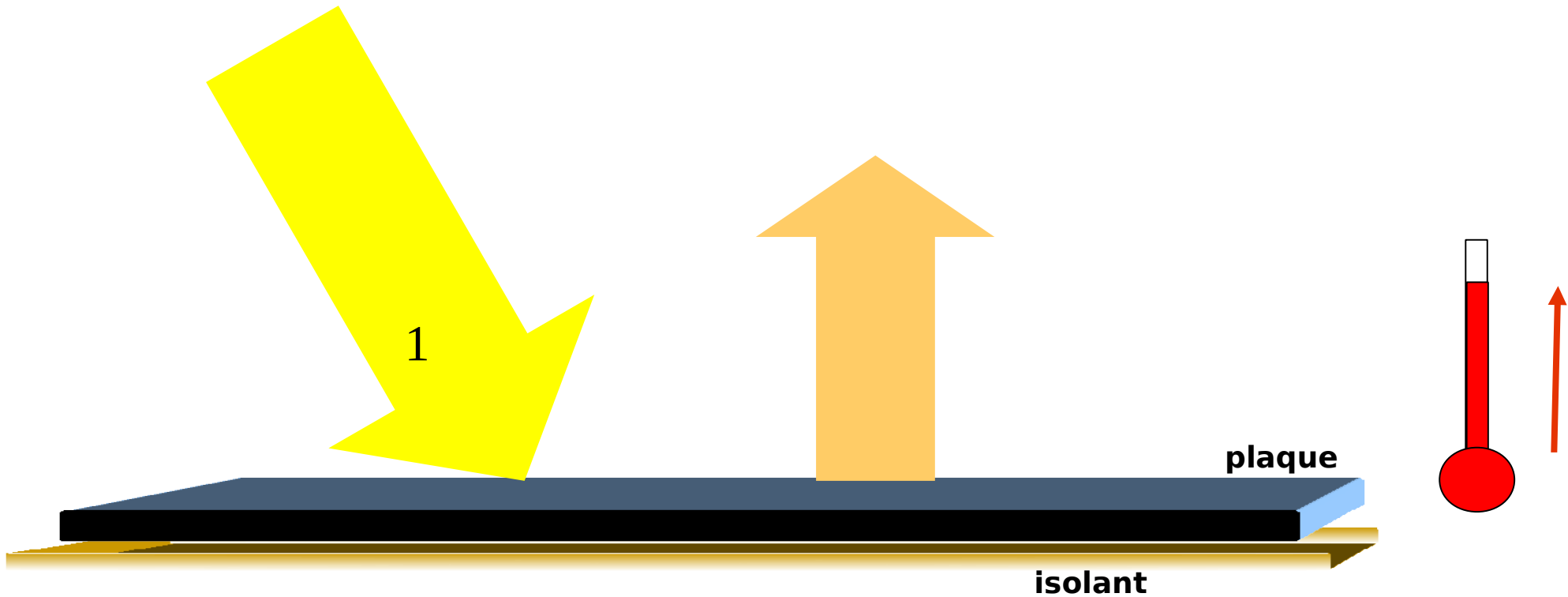


### 3) L'équilibre énergétique



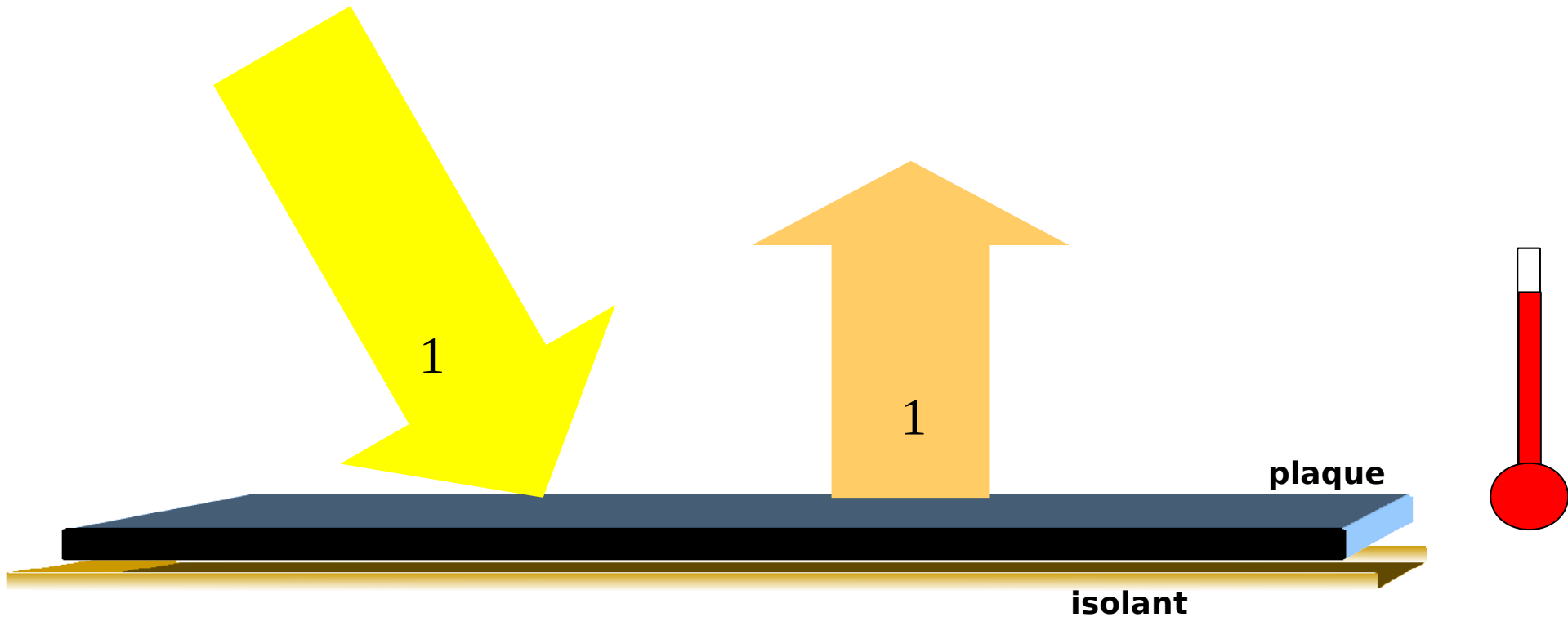
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



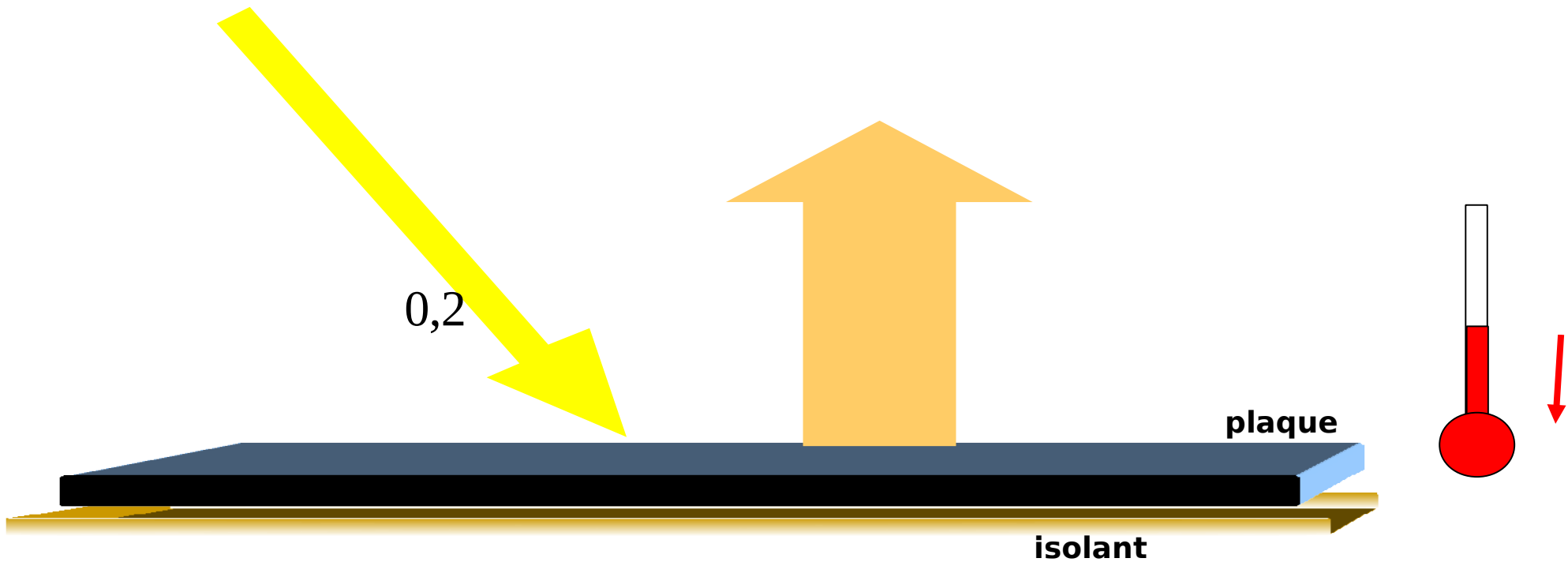
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



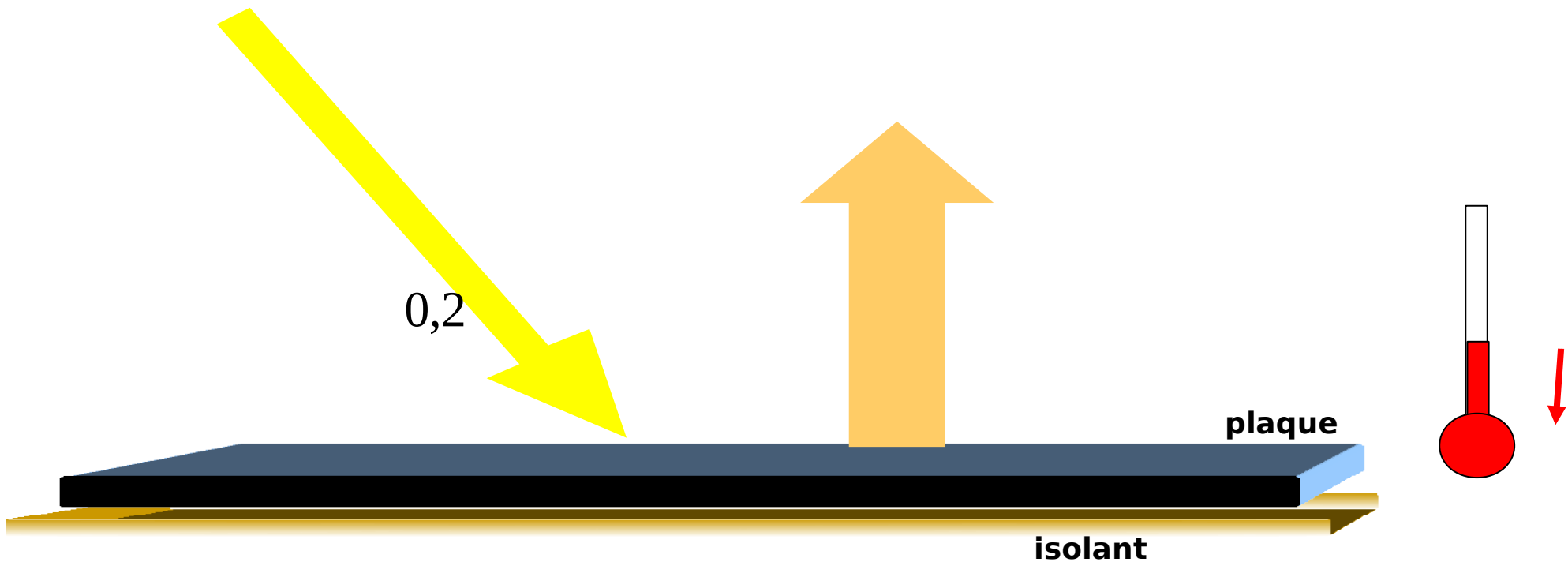
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

### 3) L'équilibre énergétique



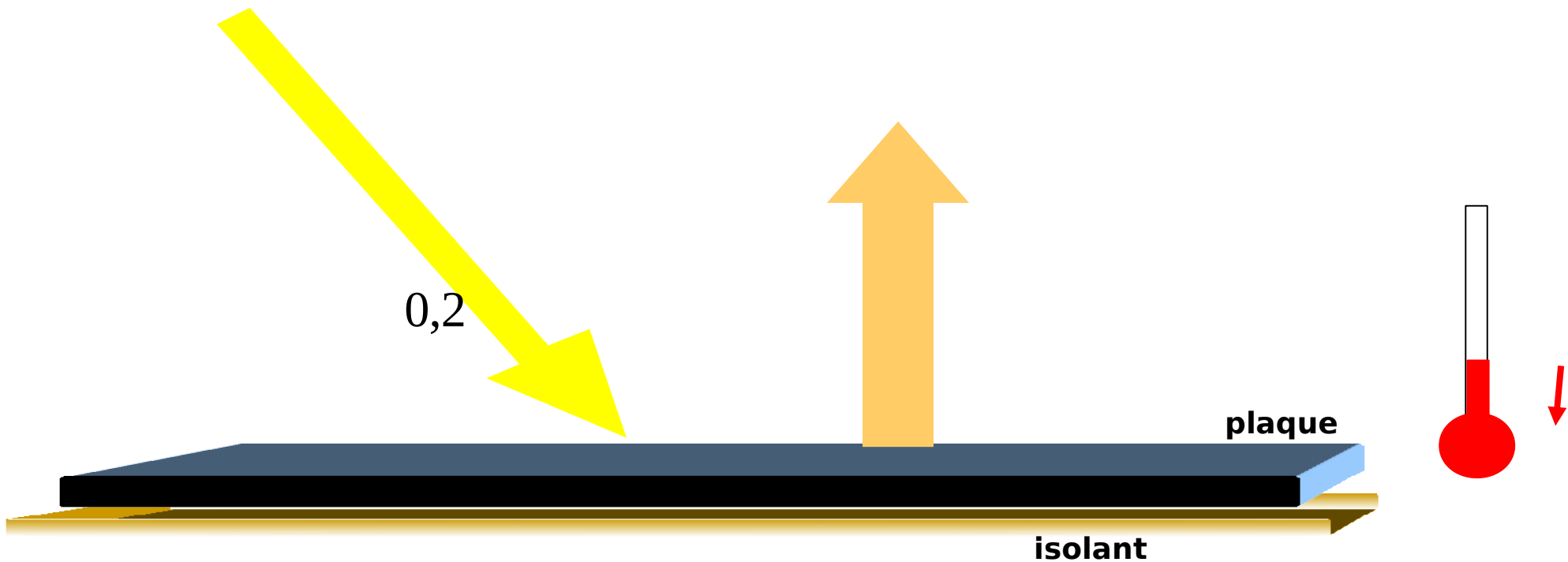
- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



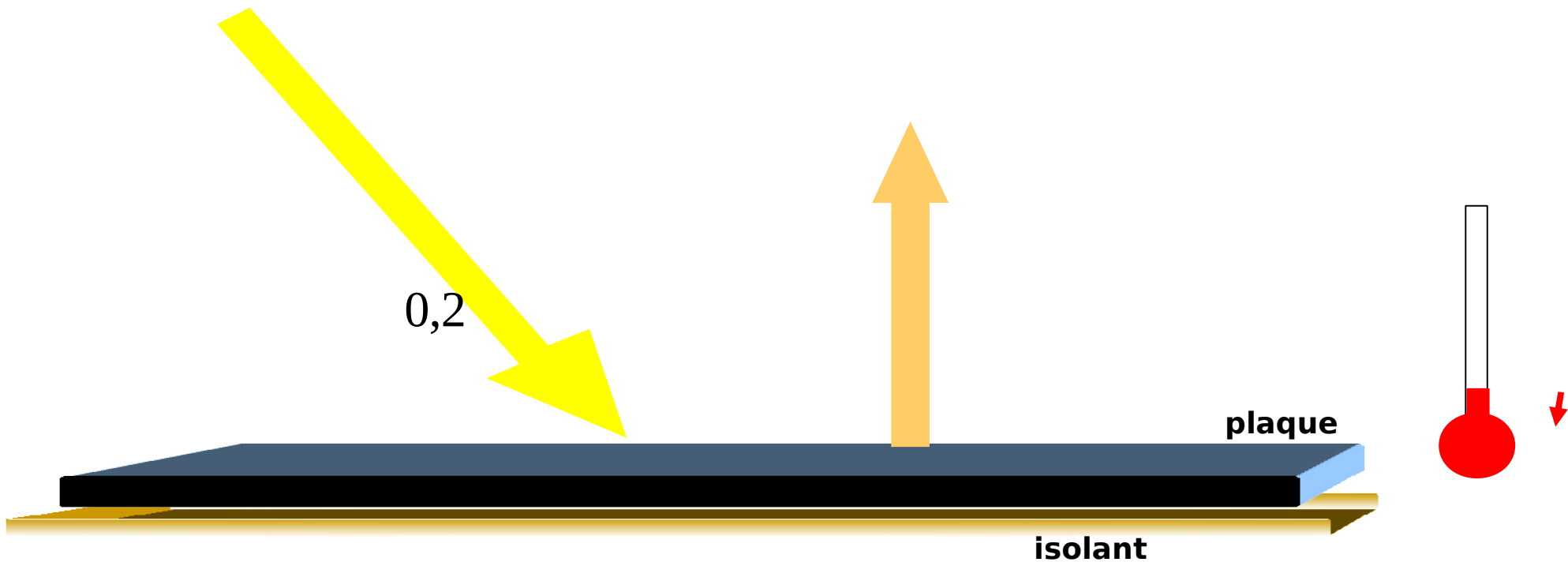
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



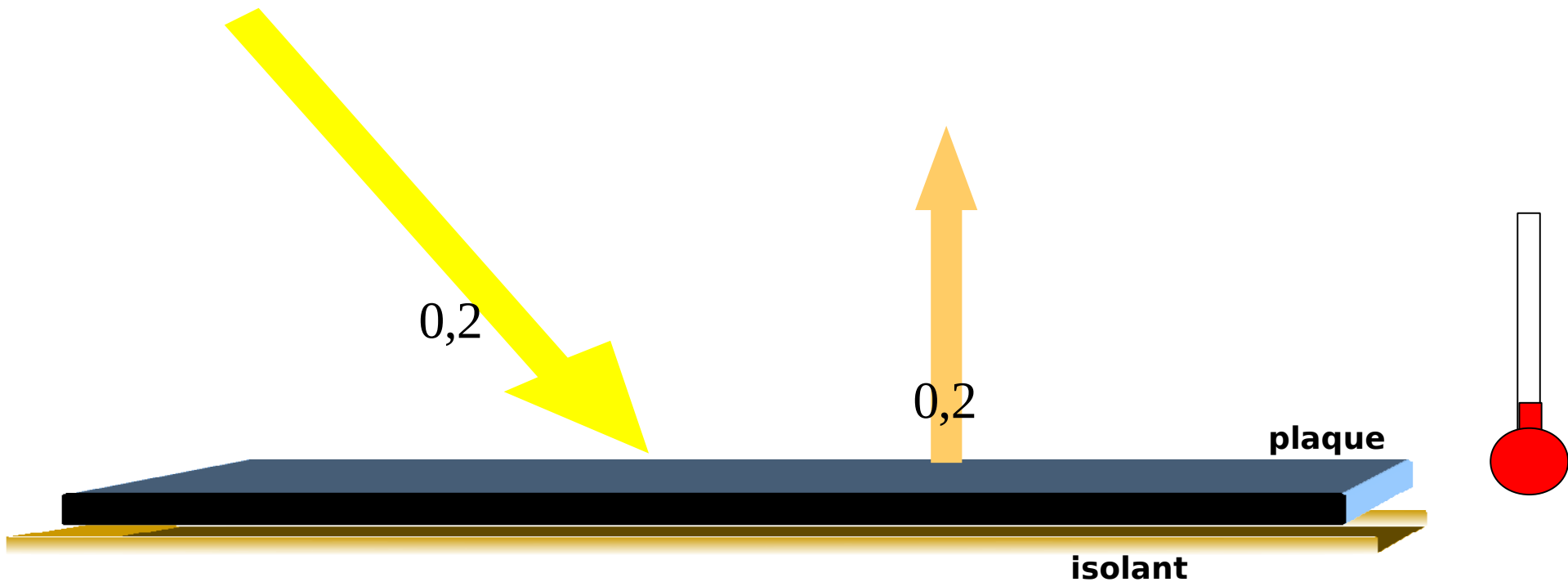
- Comme sa température diminue, l'énergie perdue par émission de rayonnement diminue.

### 3) L'équilibre énergétique



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

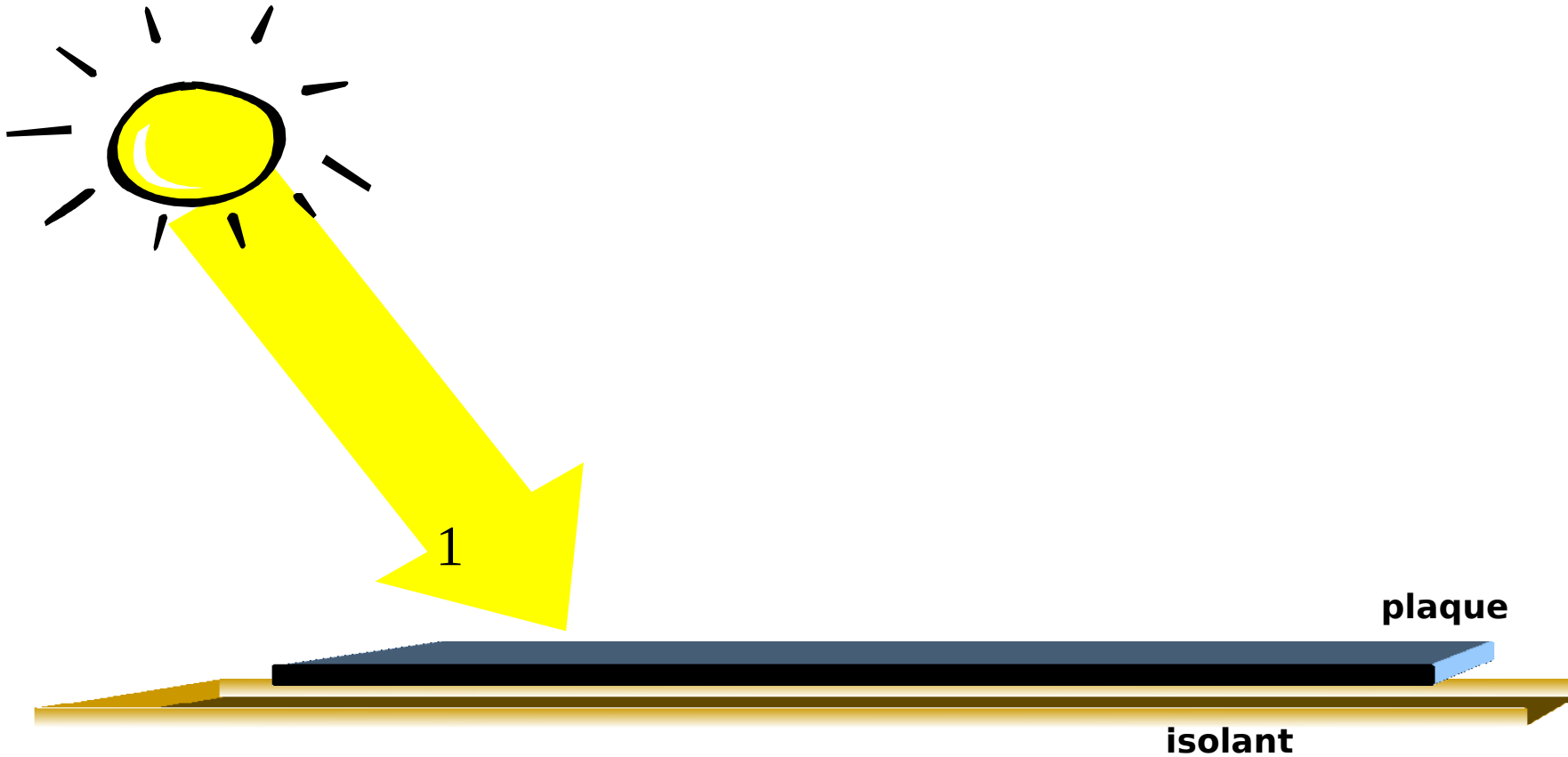
### 3) L'équilibre énergétique



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

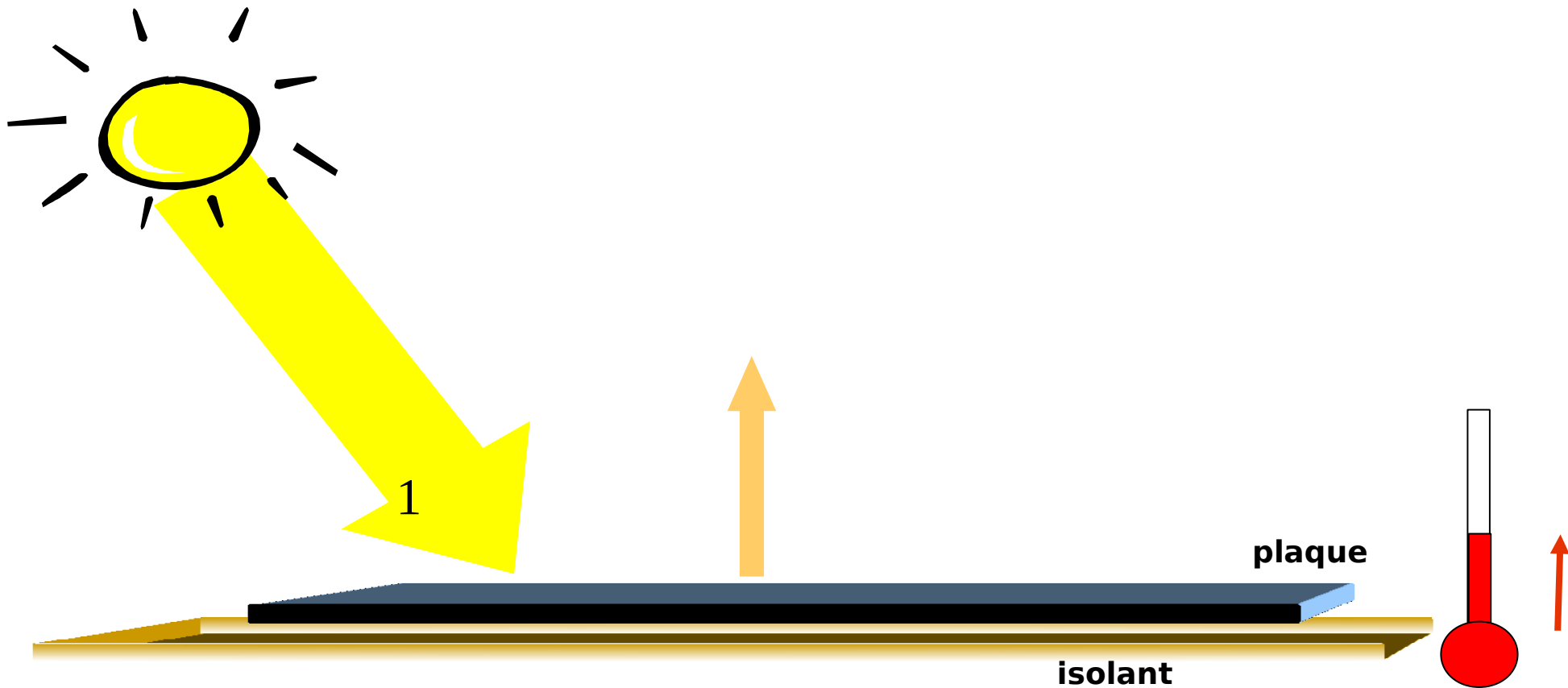


## 4) Température d'équilibre d'une plaque au soleil



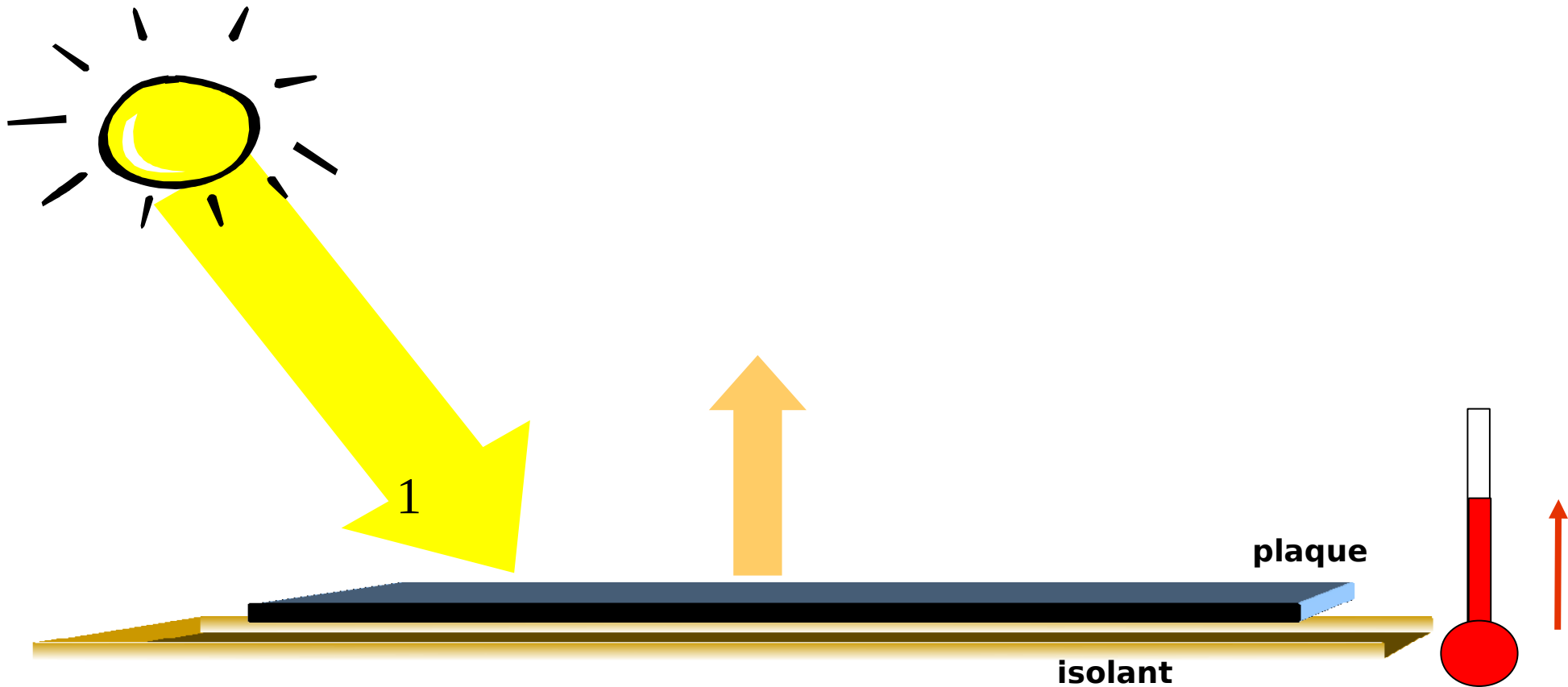
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.

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



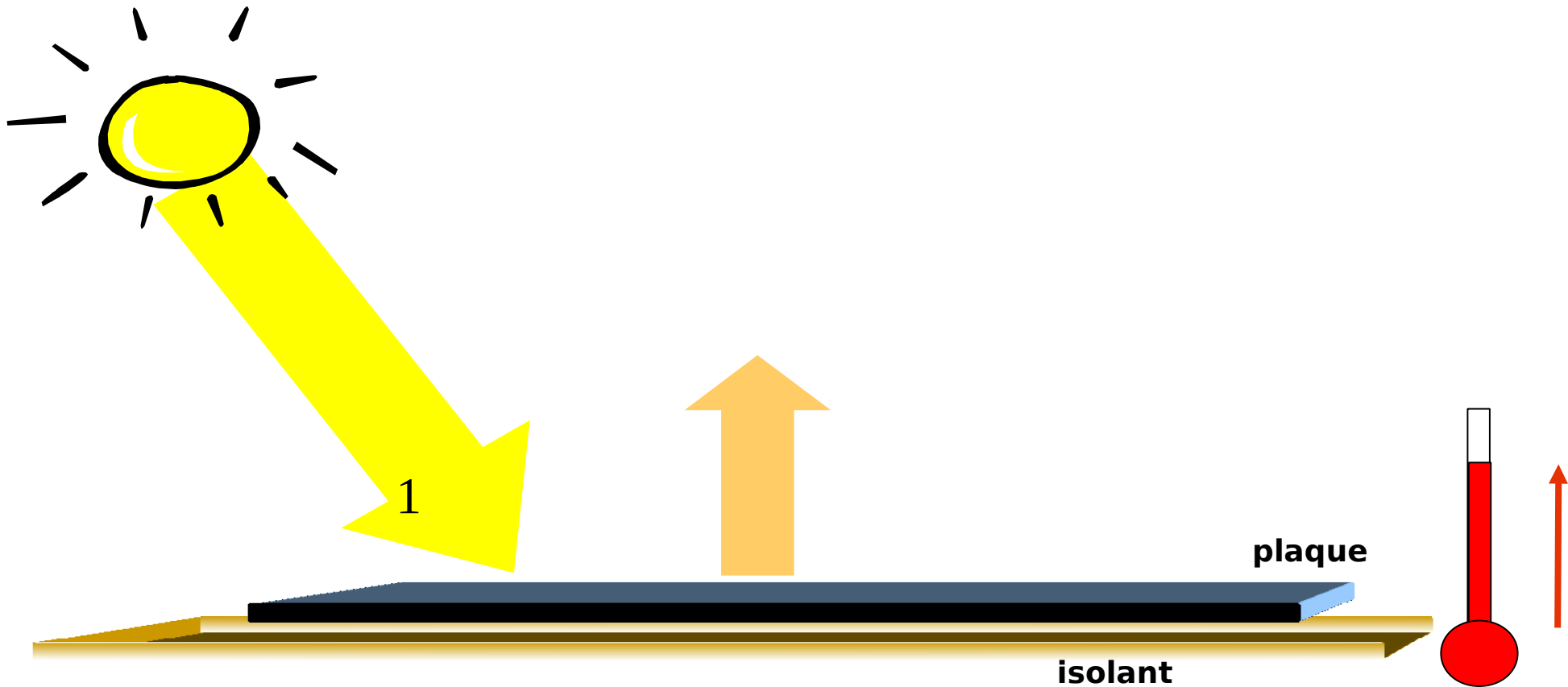
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



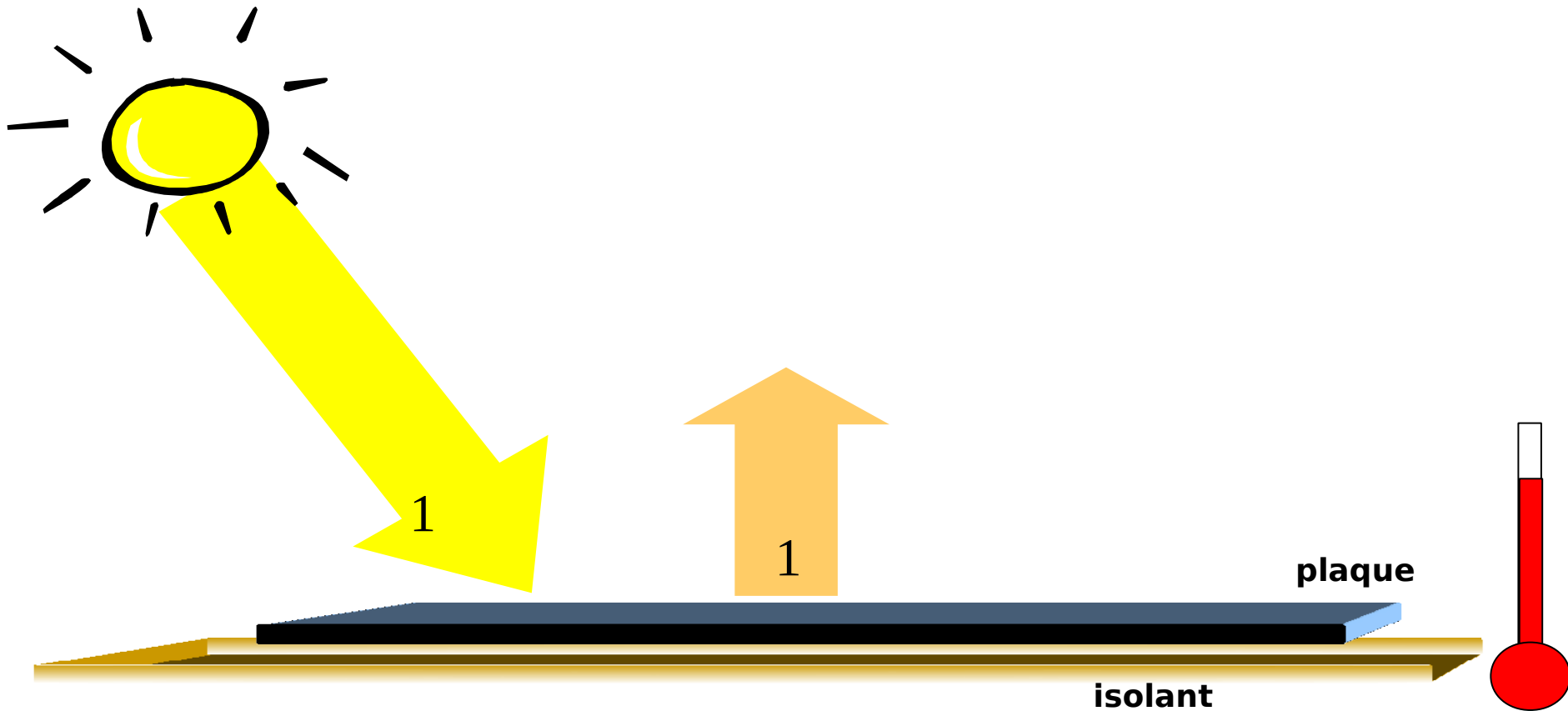
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



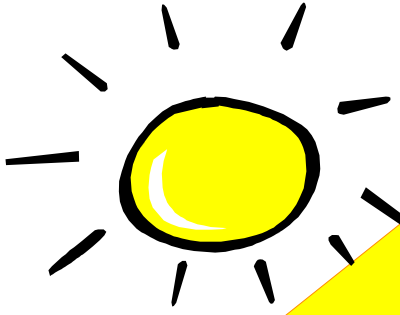
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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

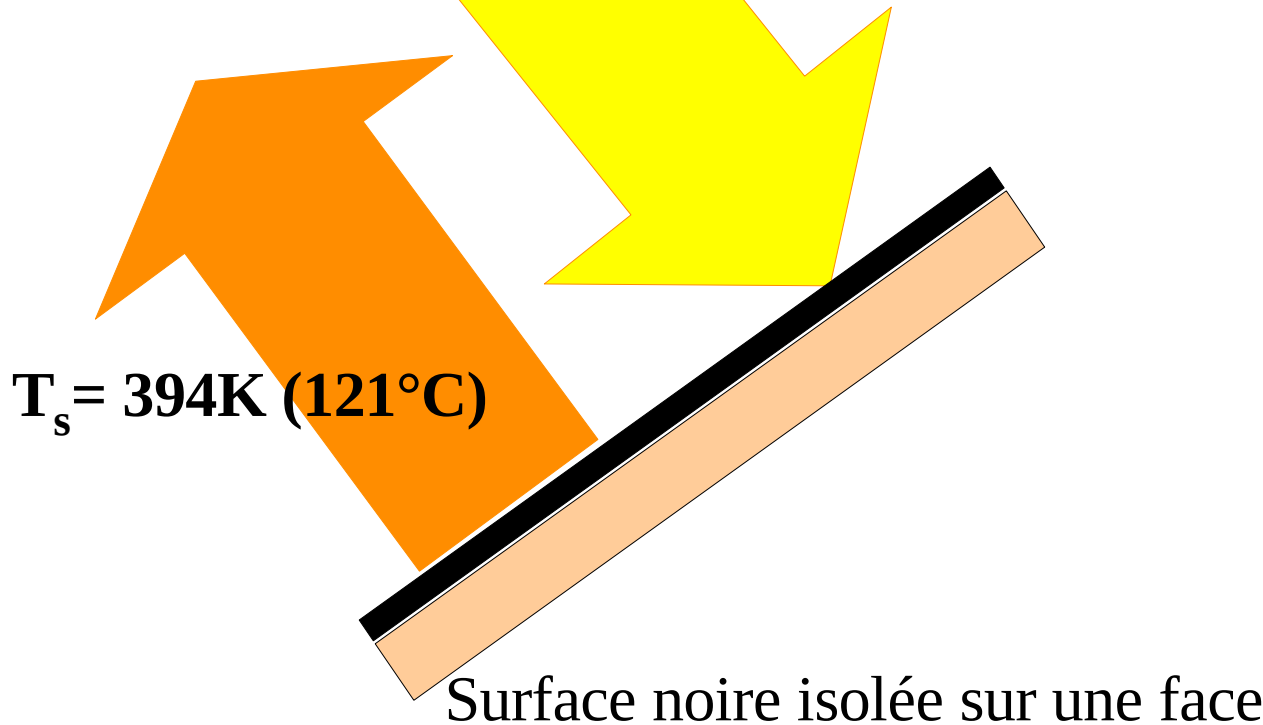


c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.

# Température d'équilibre d'une planète



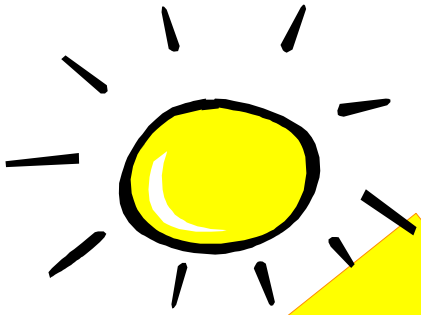
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$



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

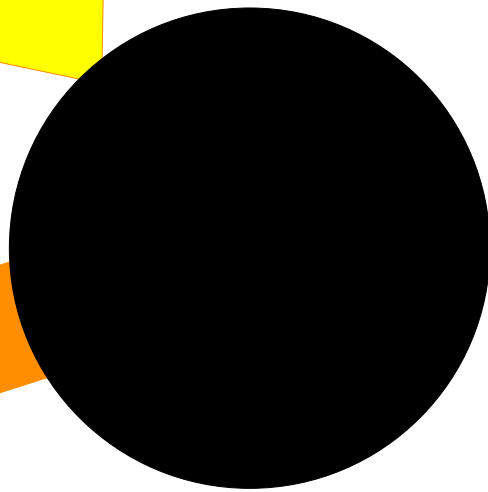
Surface noire isolée sur une face

# Température d'équilibre d'une planète



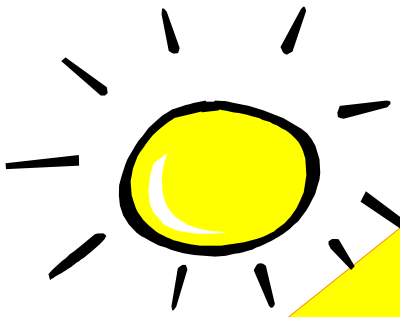
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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**

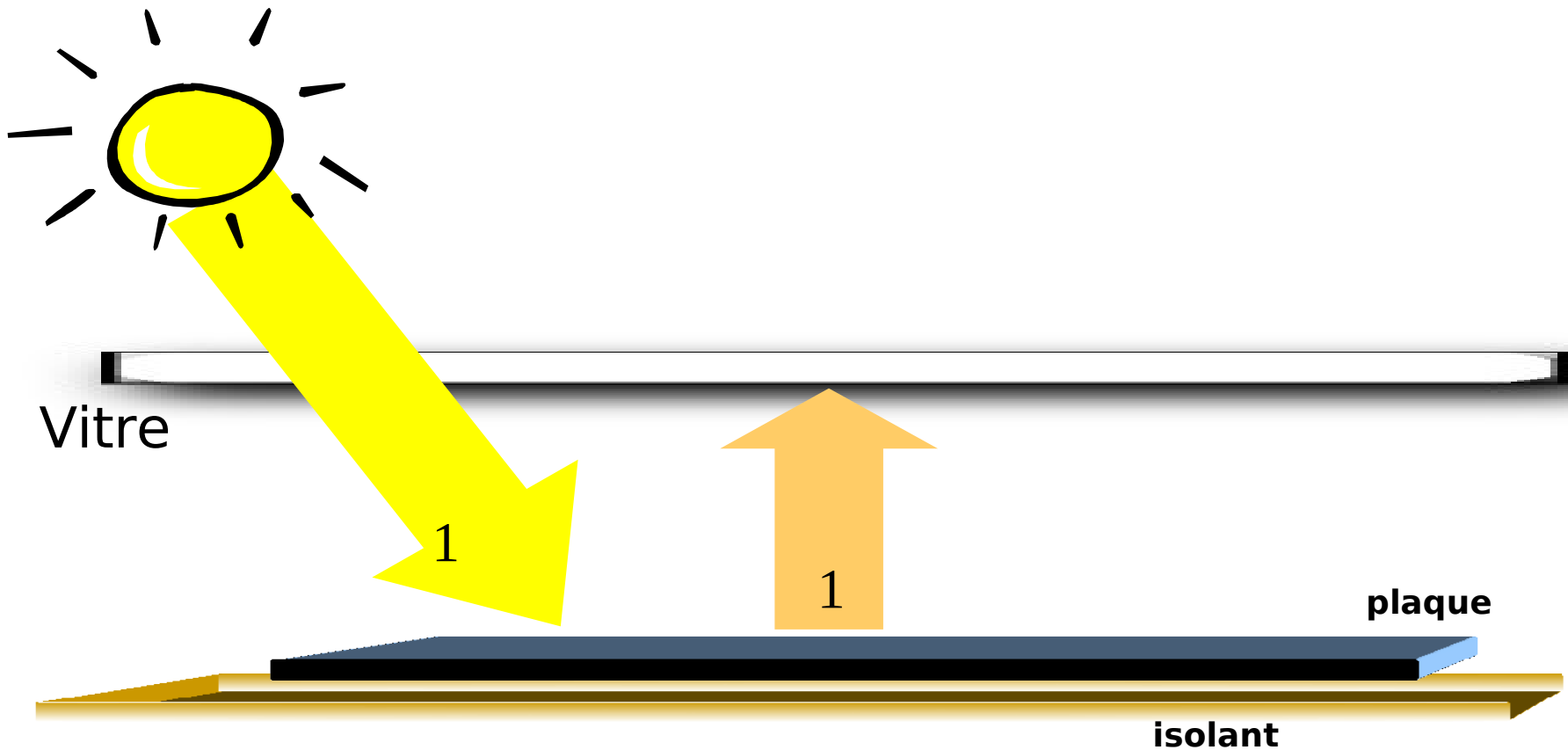


$T_s = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$

**La température moyenne de la surface de la Terre est de  $15^\circ\text{C}$  environ. Pourquoi cette différence?**

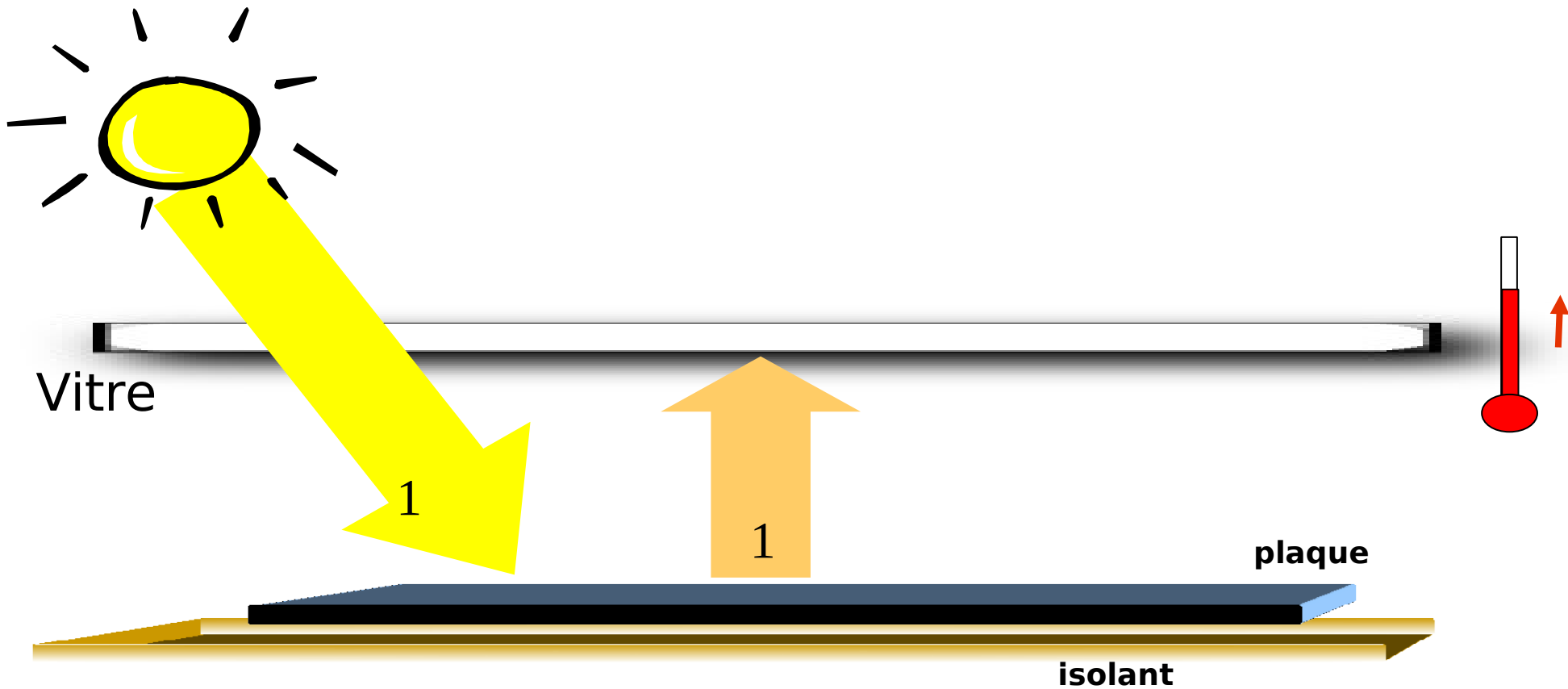


## 5) L'effet de serre



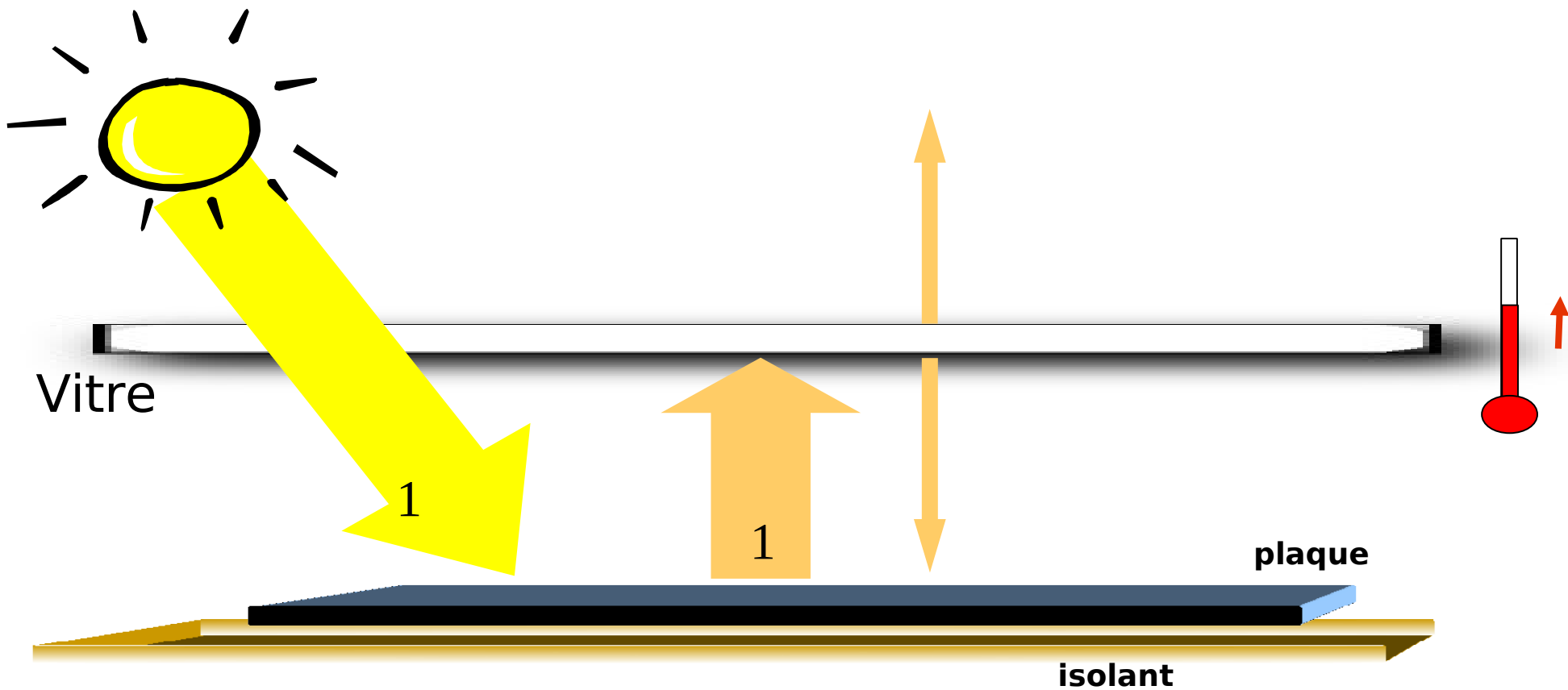
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



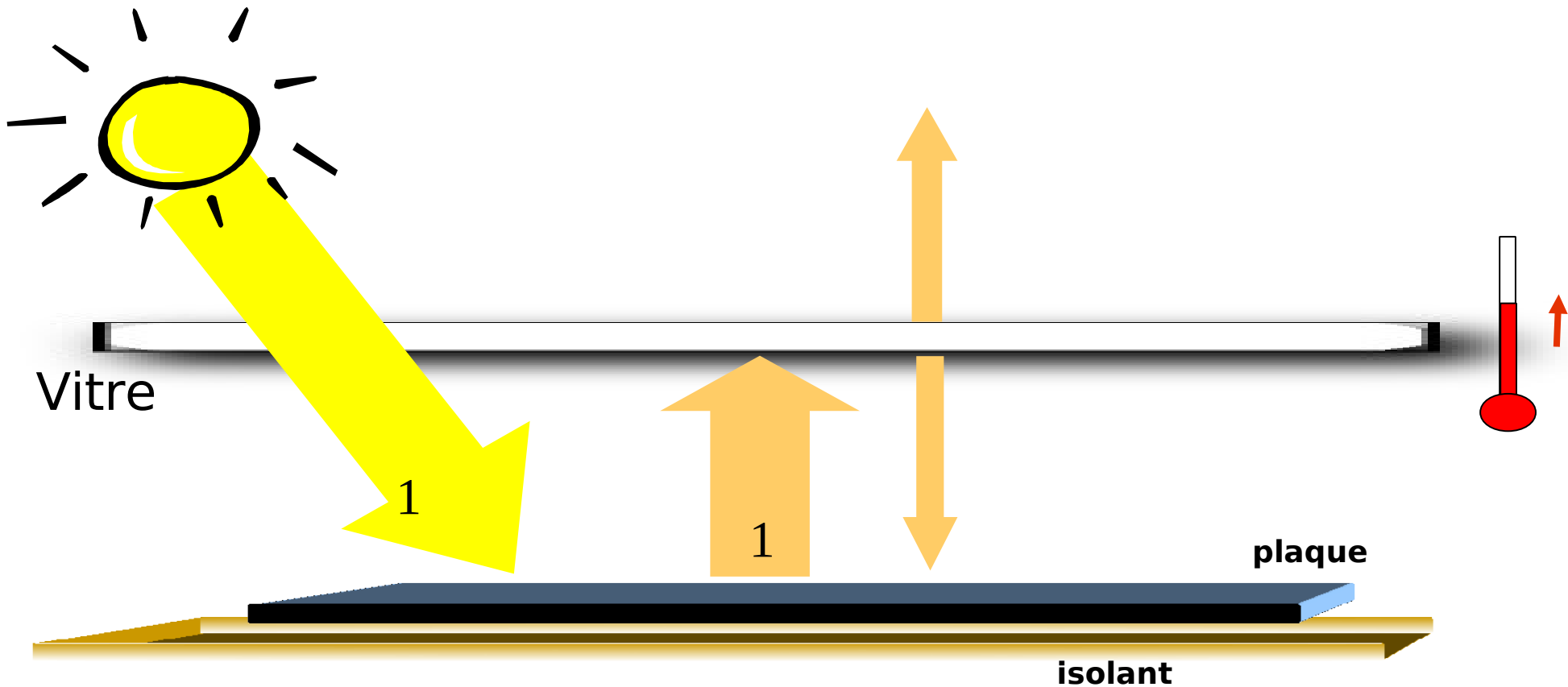
L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

## 5) L'effet de serre



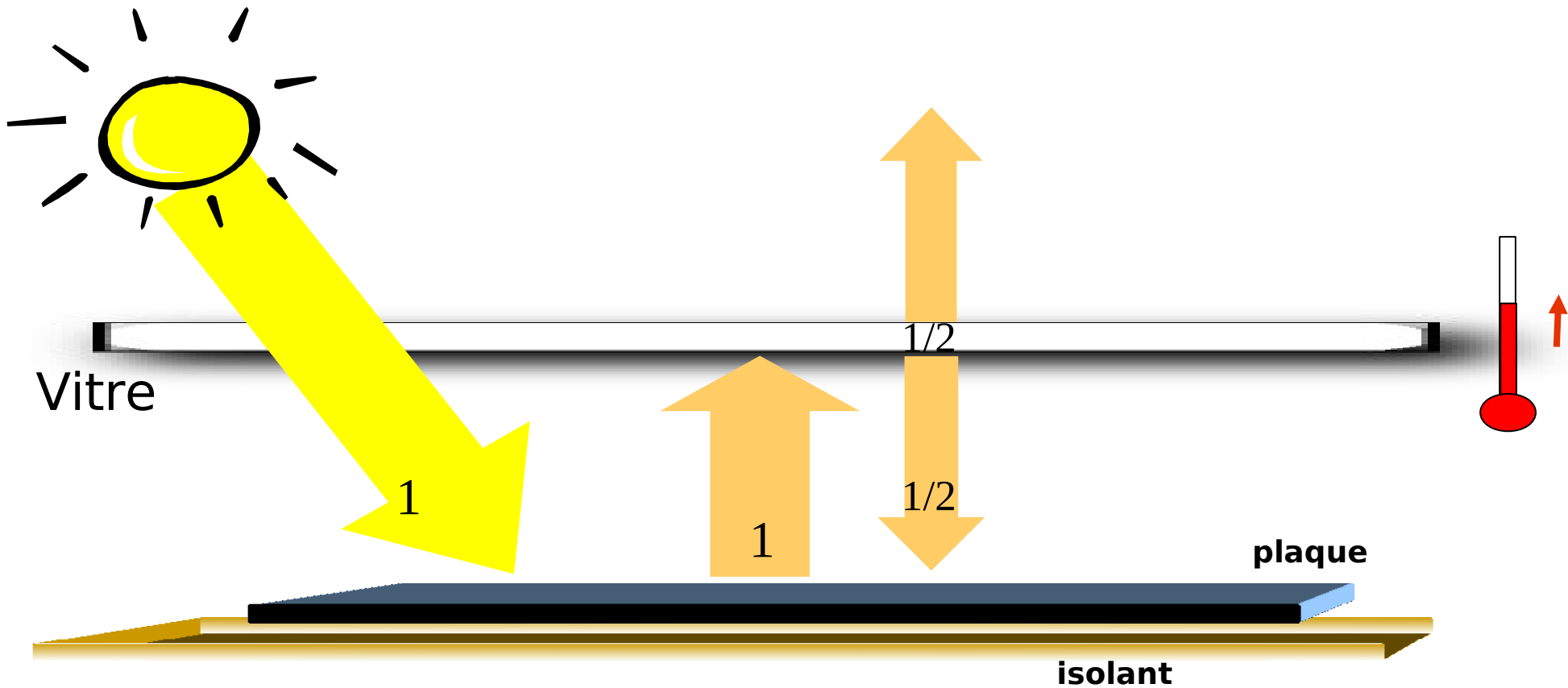
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



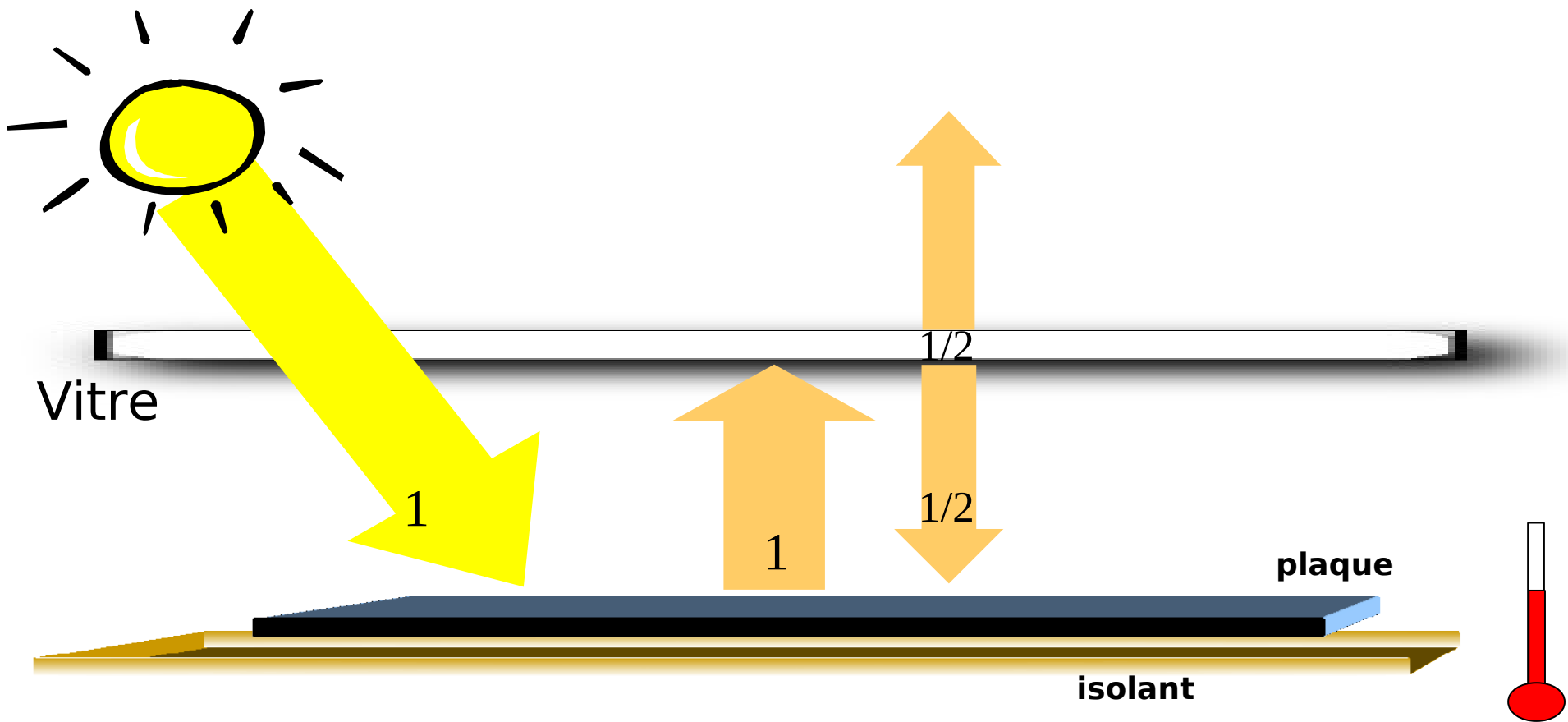
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



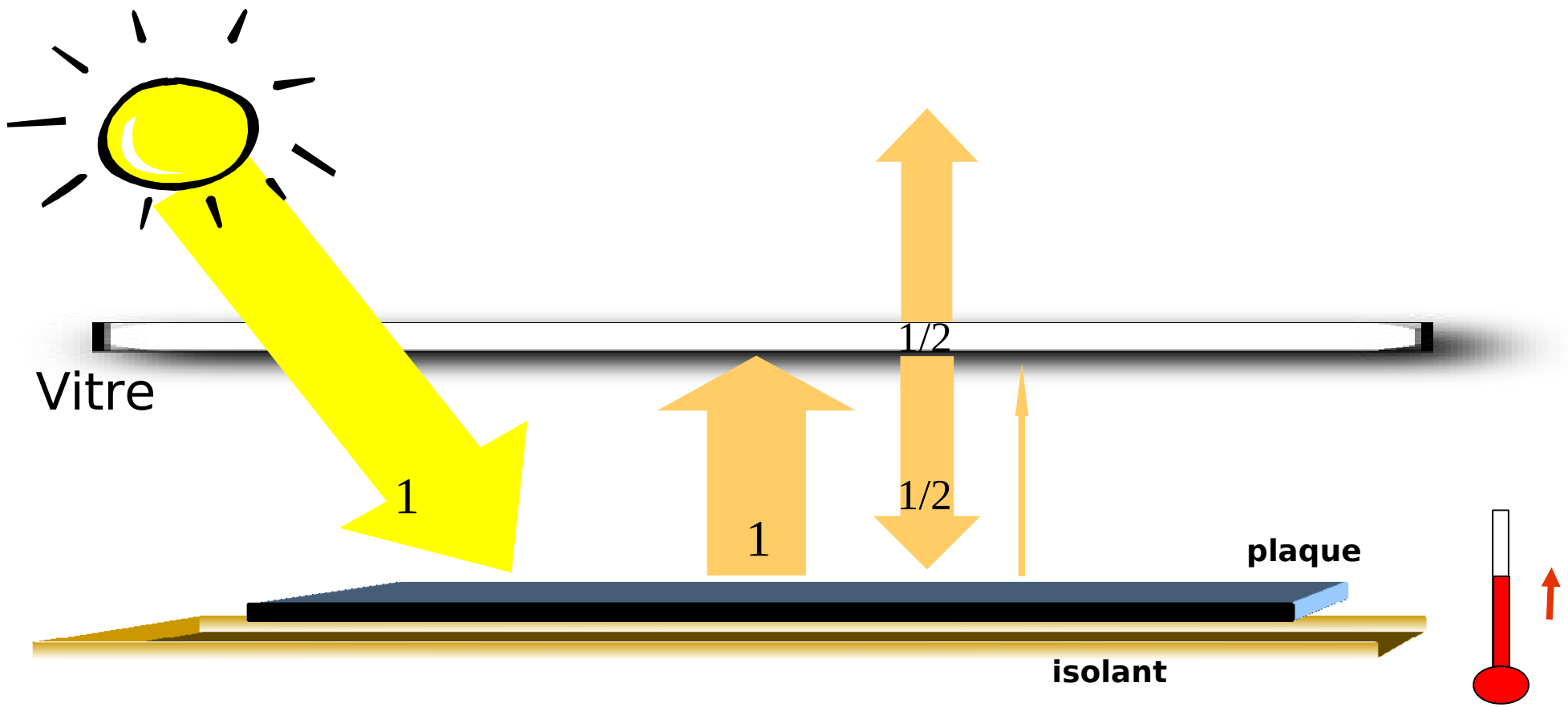
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



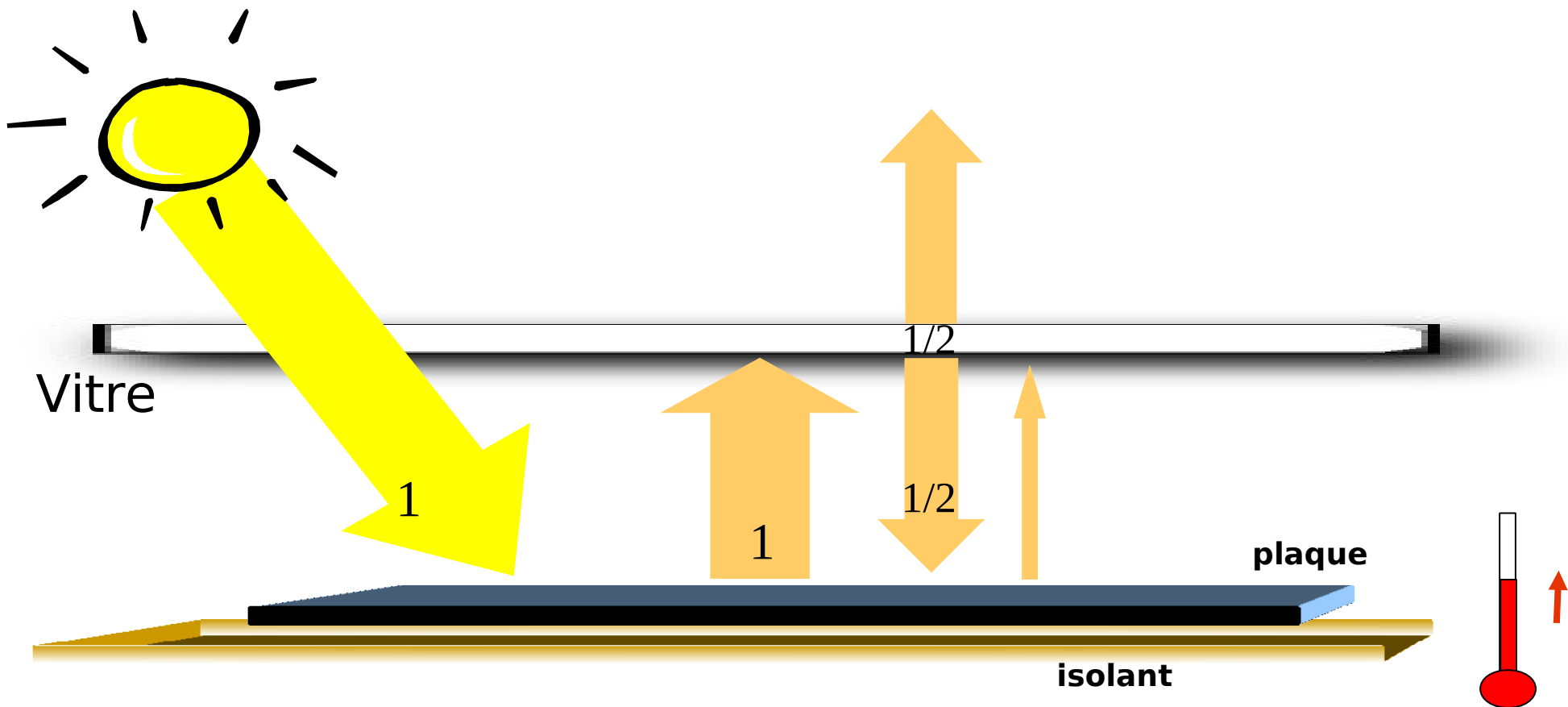
Le rayonnement infrarouge émis par la vitre vers le bas est absorbé par la plaque.

## 5) L'effet de serre



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

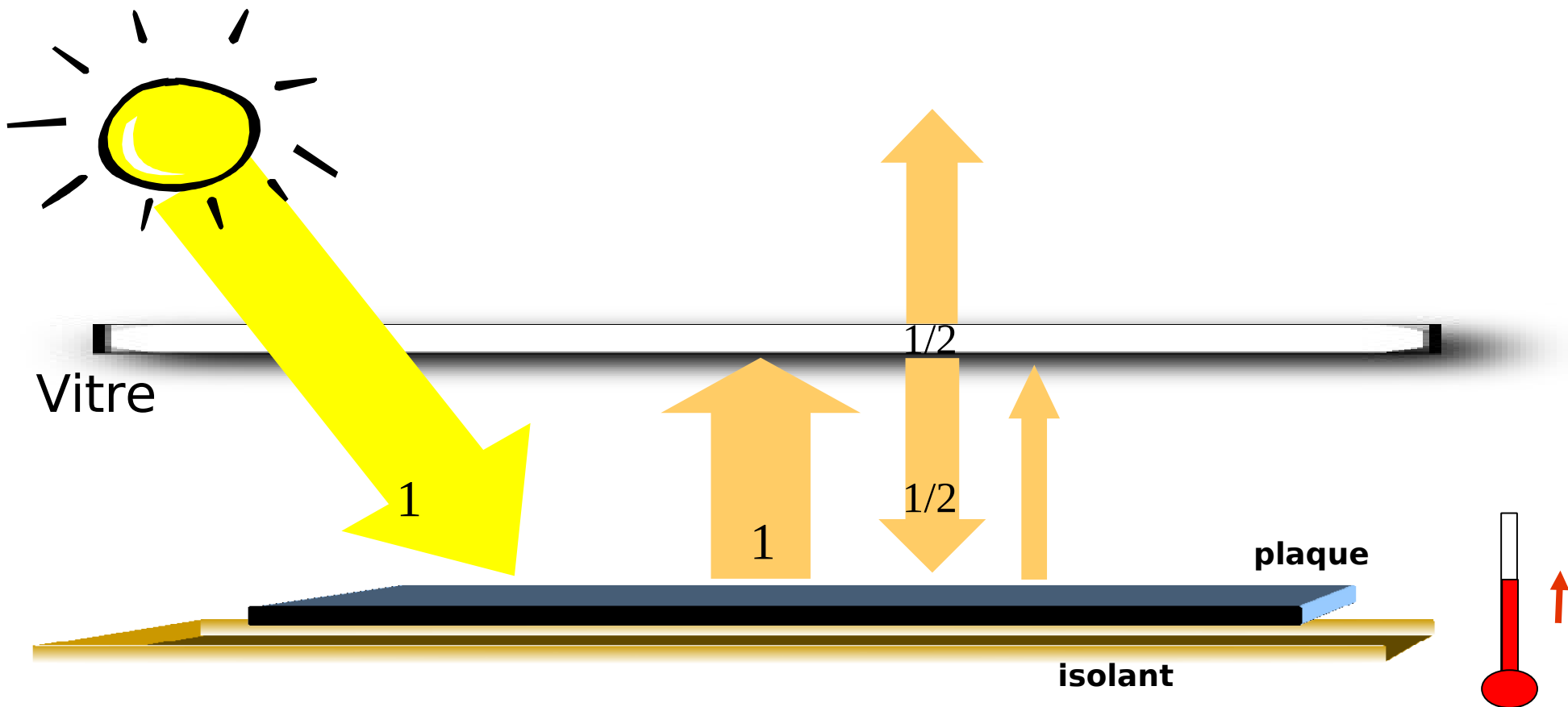
## 5) L'effet de serre



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

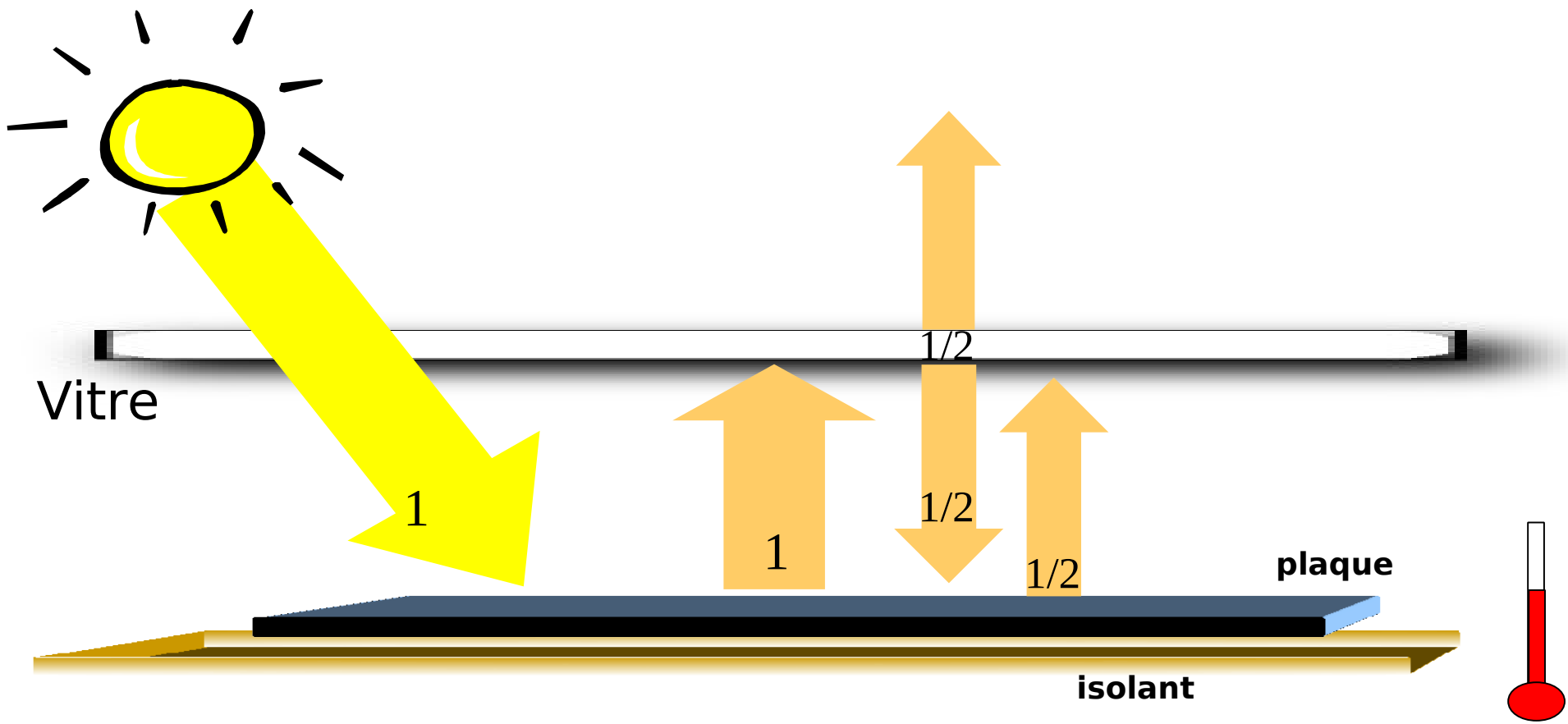


## 5) L'effet de serre



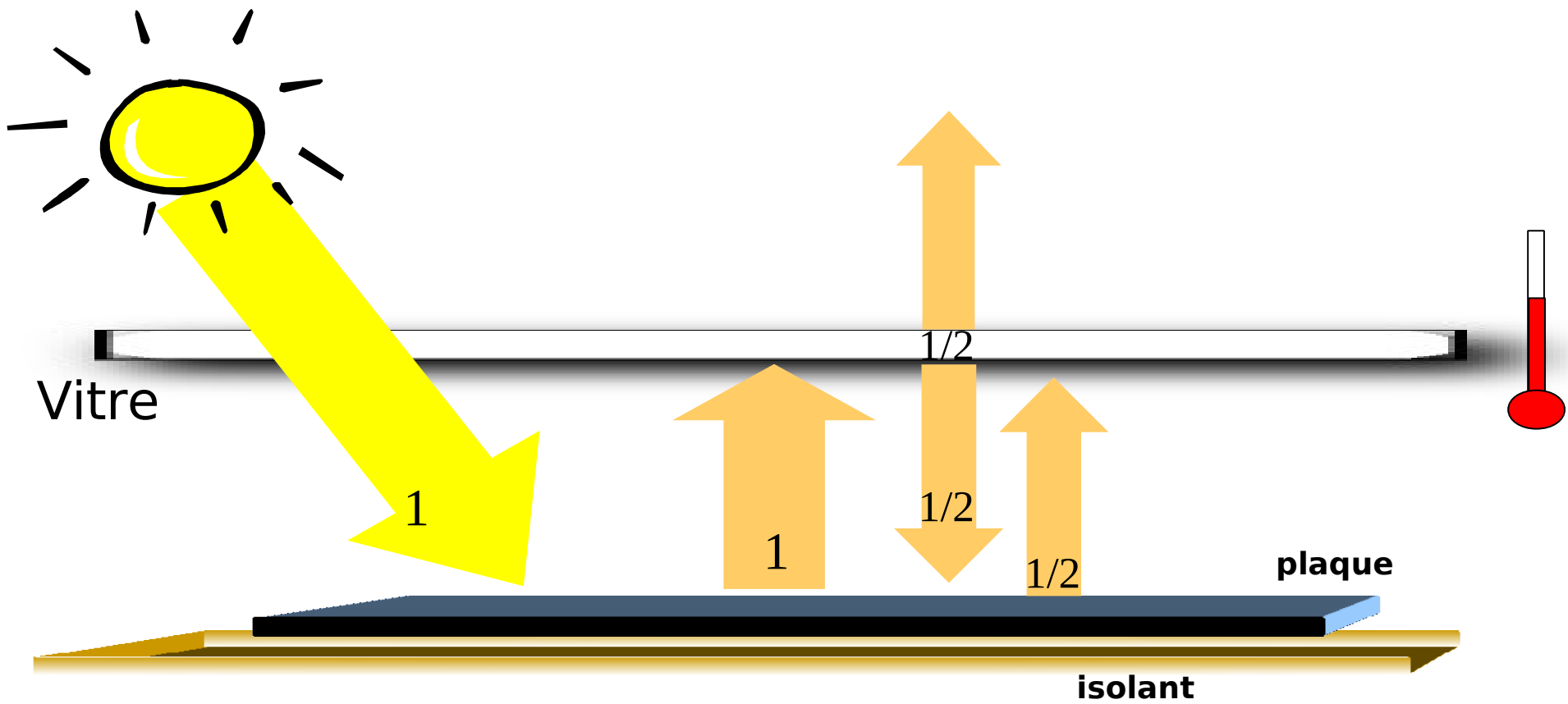
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



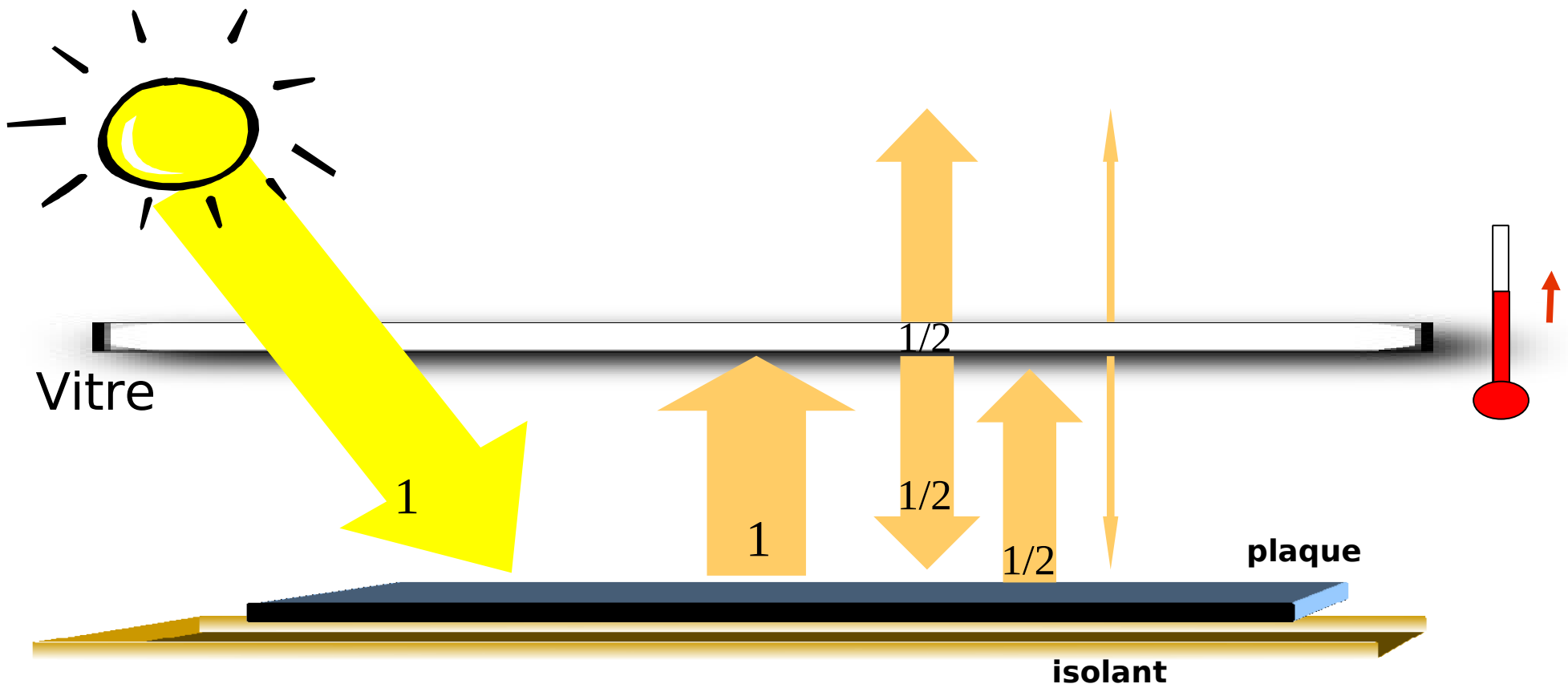
Jusqu'à ce qu'elle atteigne une nouvelle température d'équilibre.

## 5) L'effet de serre



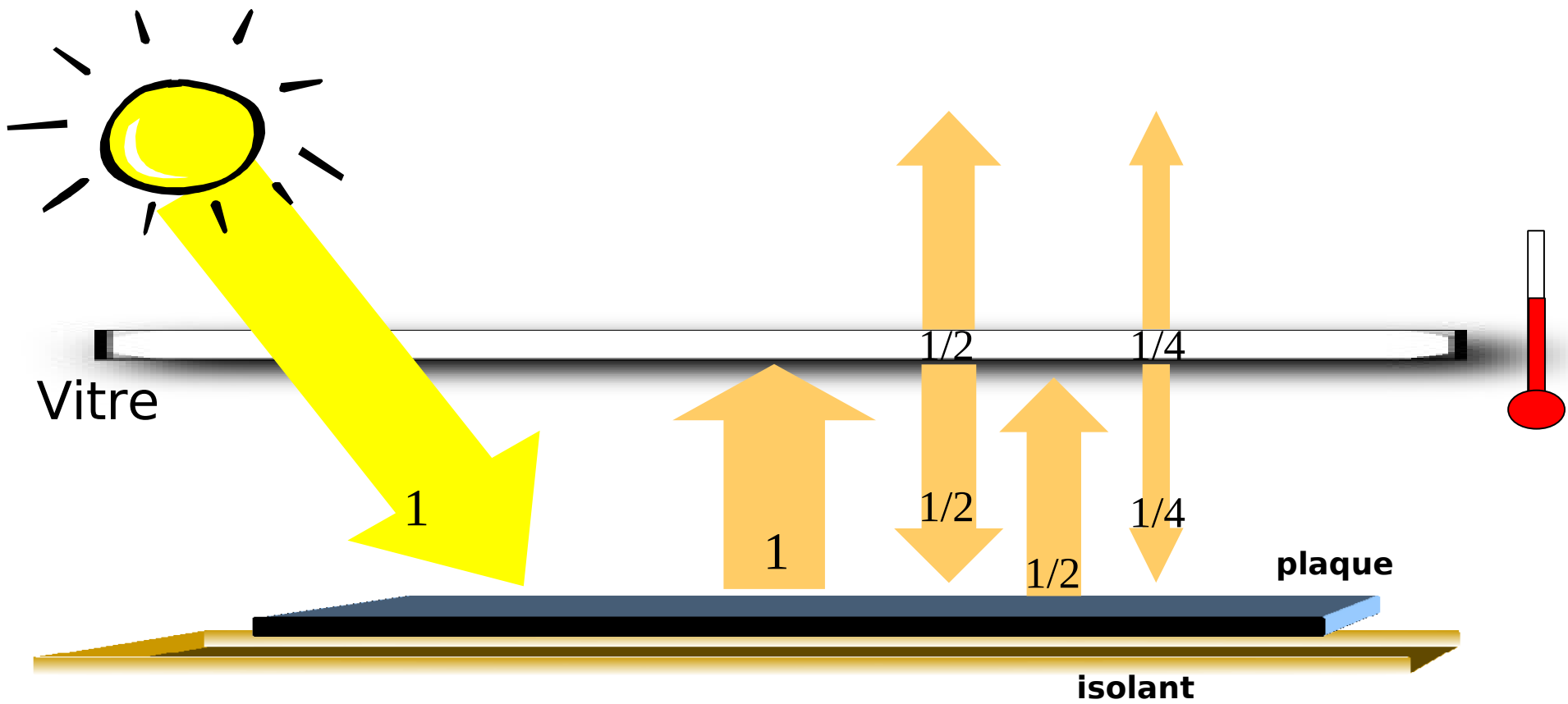
Ce rayonnement supplémentaire émis par la plaque est de nouveau absorbé par la vitre dont la température augmente encore.

## 5) L'effet de serre



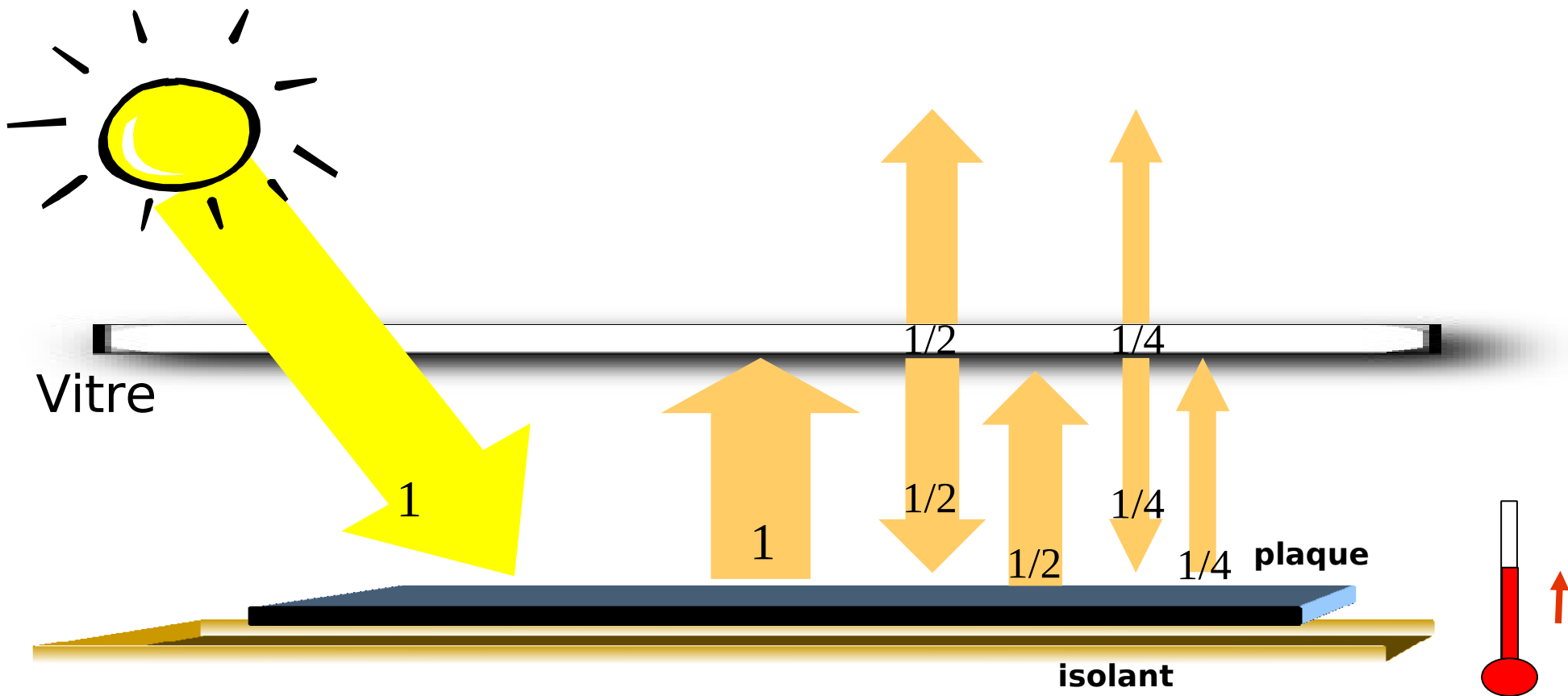
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge, moitié vers le haut, moitié vers le bas.

## 5) L'effet de serre



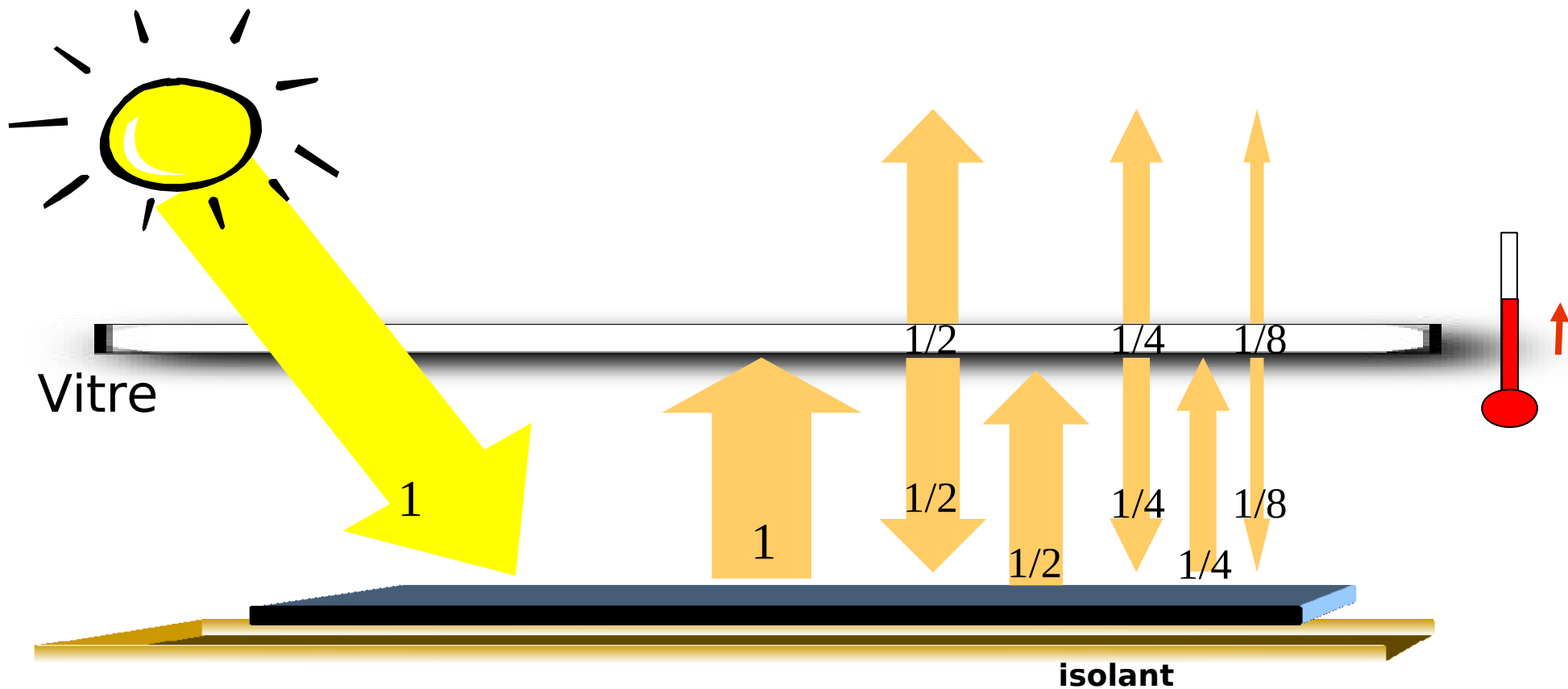
Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 5) L'effet de serre



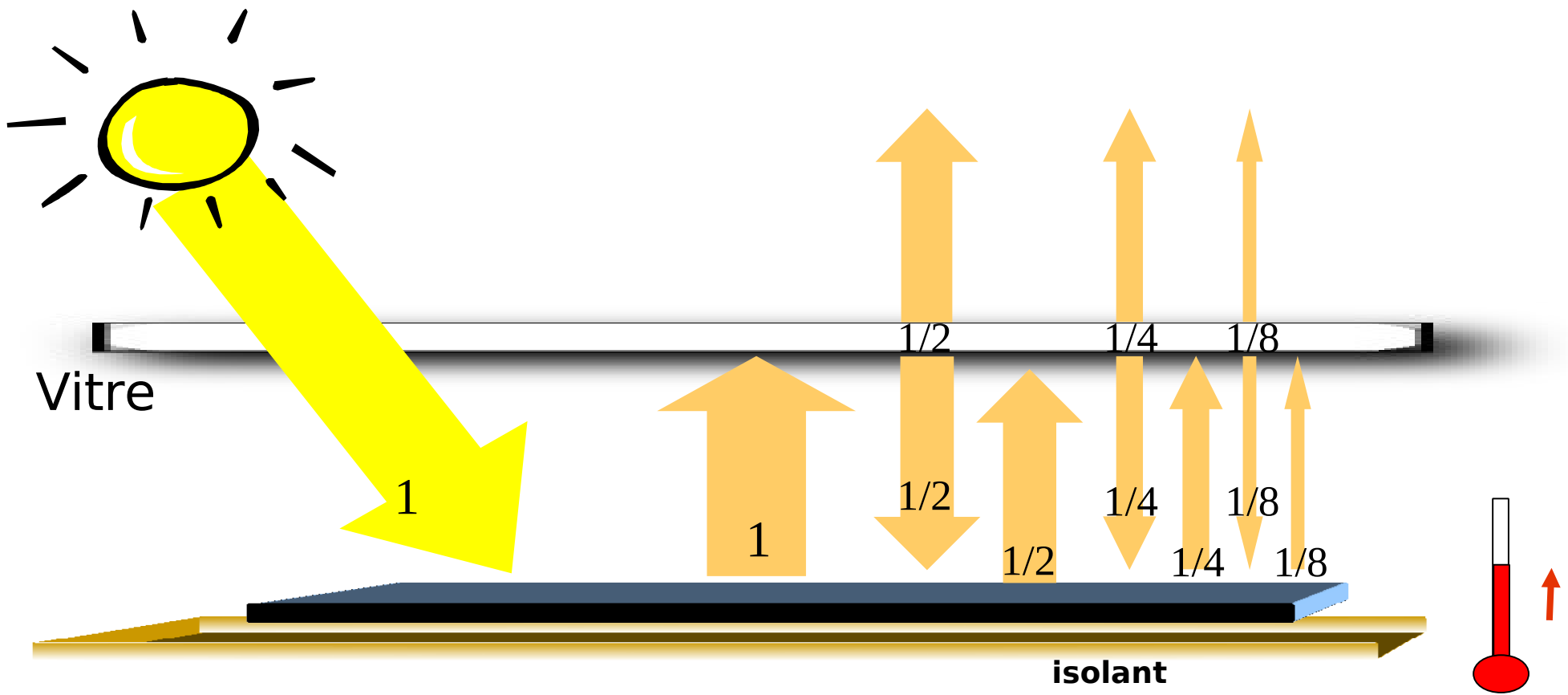
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.

## 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.

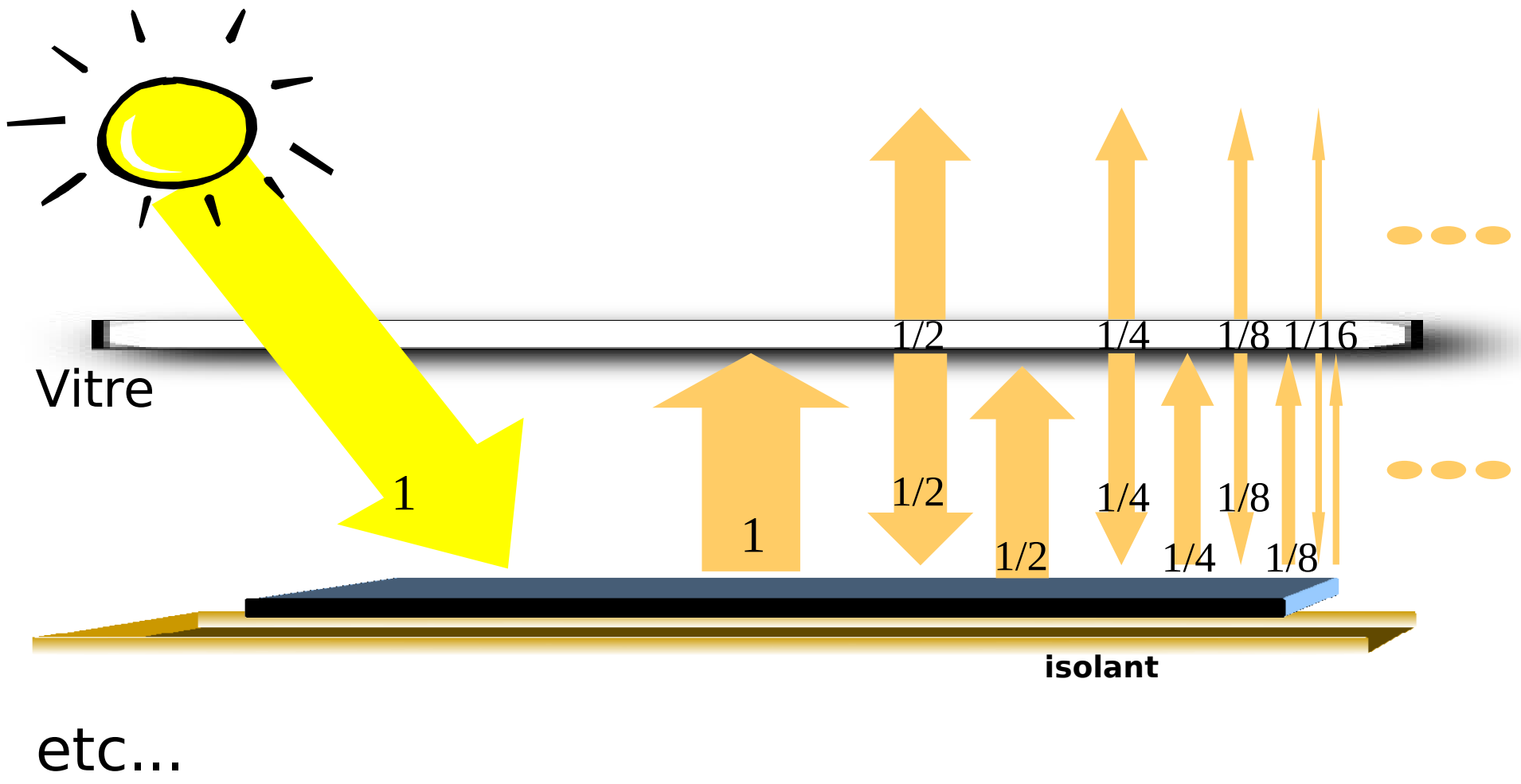
## 5) L'effet de serre



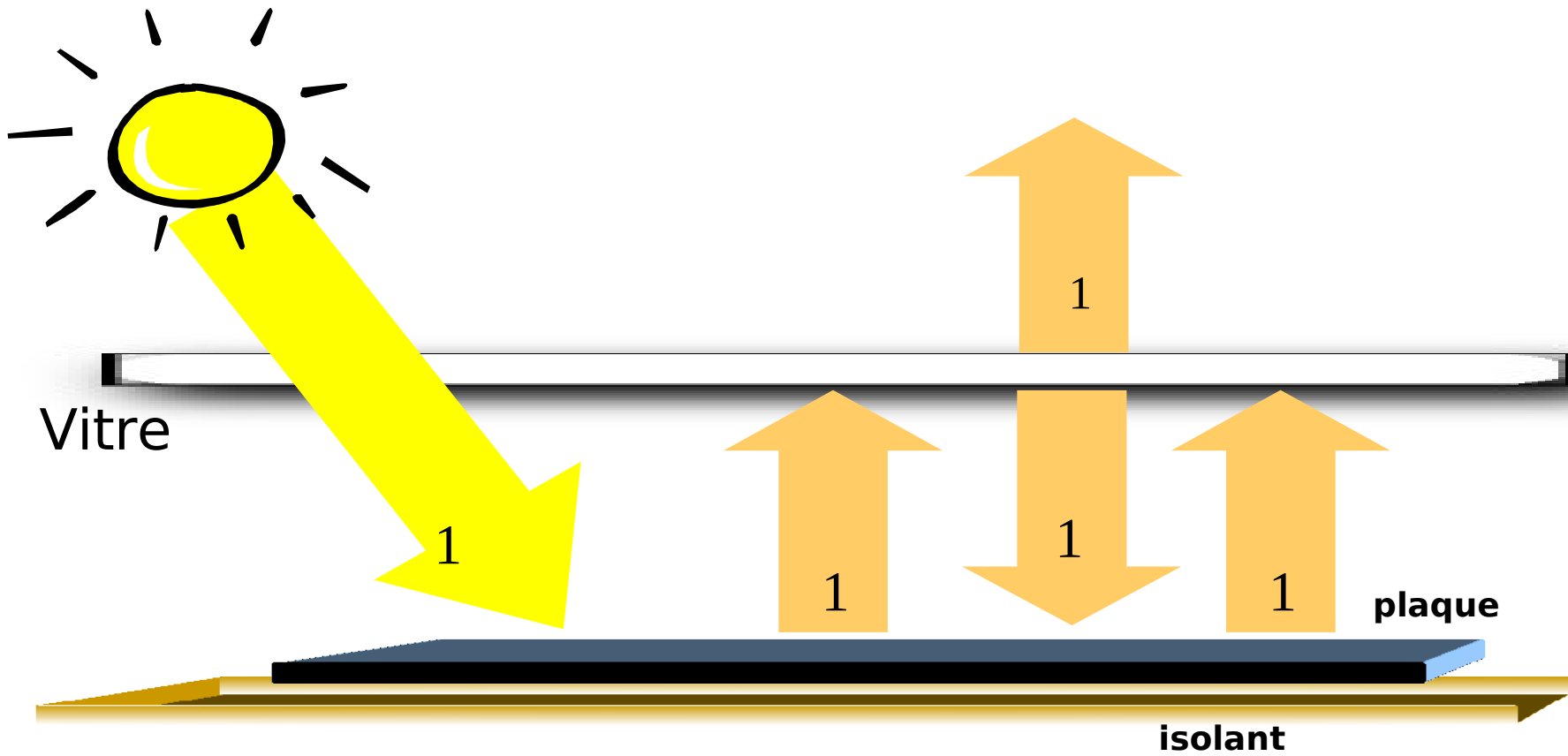
Comme la plaque reçoit plus d'énergie, sa température augmente et donc émet davantage de rayonnement infrarouge. Elle atteint sa température d'équilibre lorsque elle perd autant d'énergie qu'elle en reçoit.



# 5) L'effet de serre

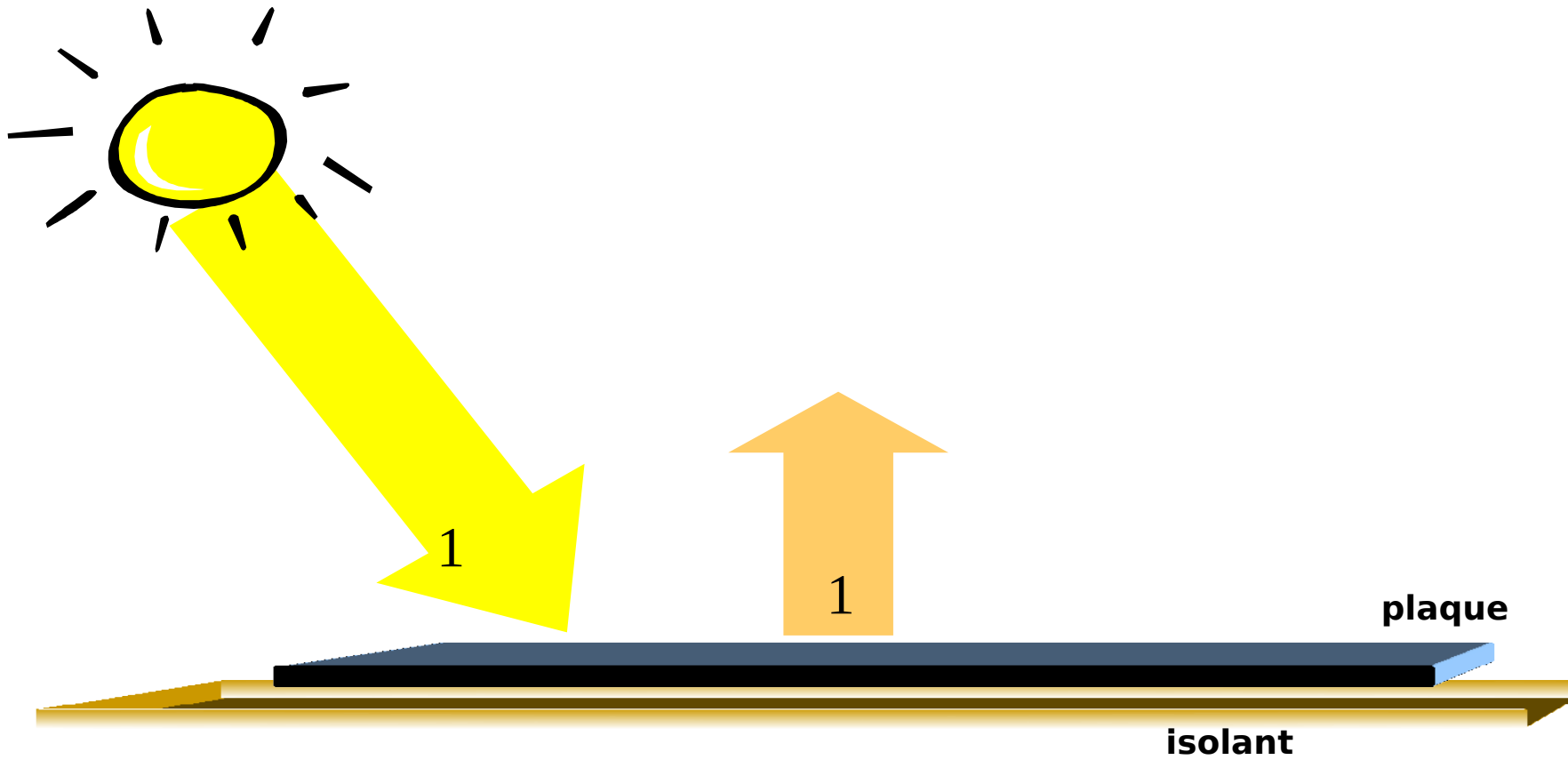


## 5) L'effet de serre



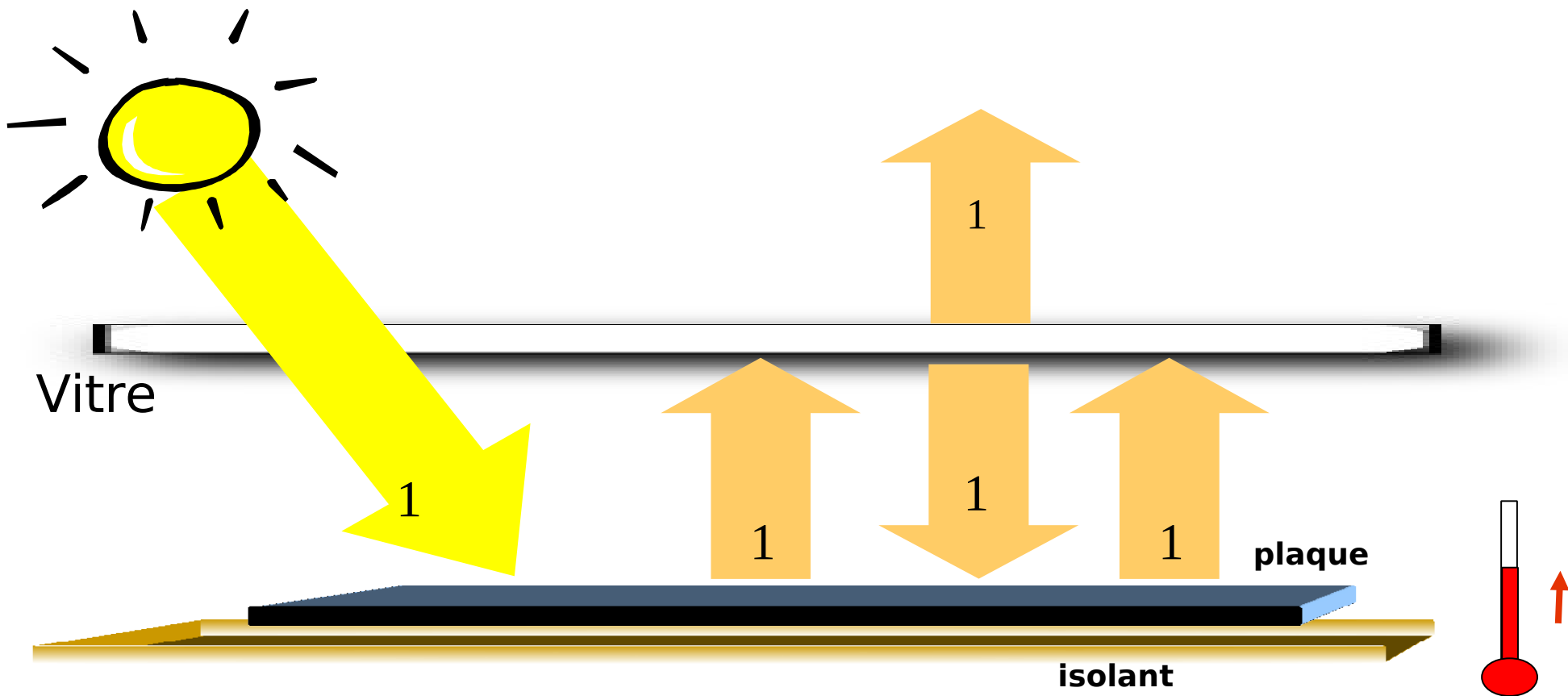
et si on fait la somme...

## 5) L'effet de serre



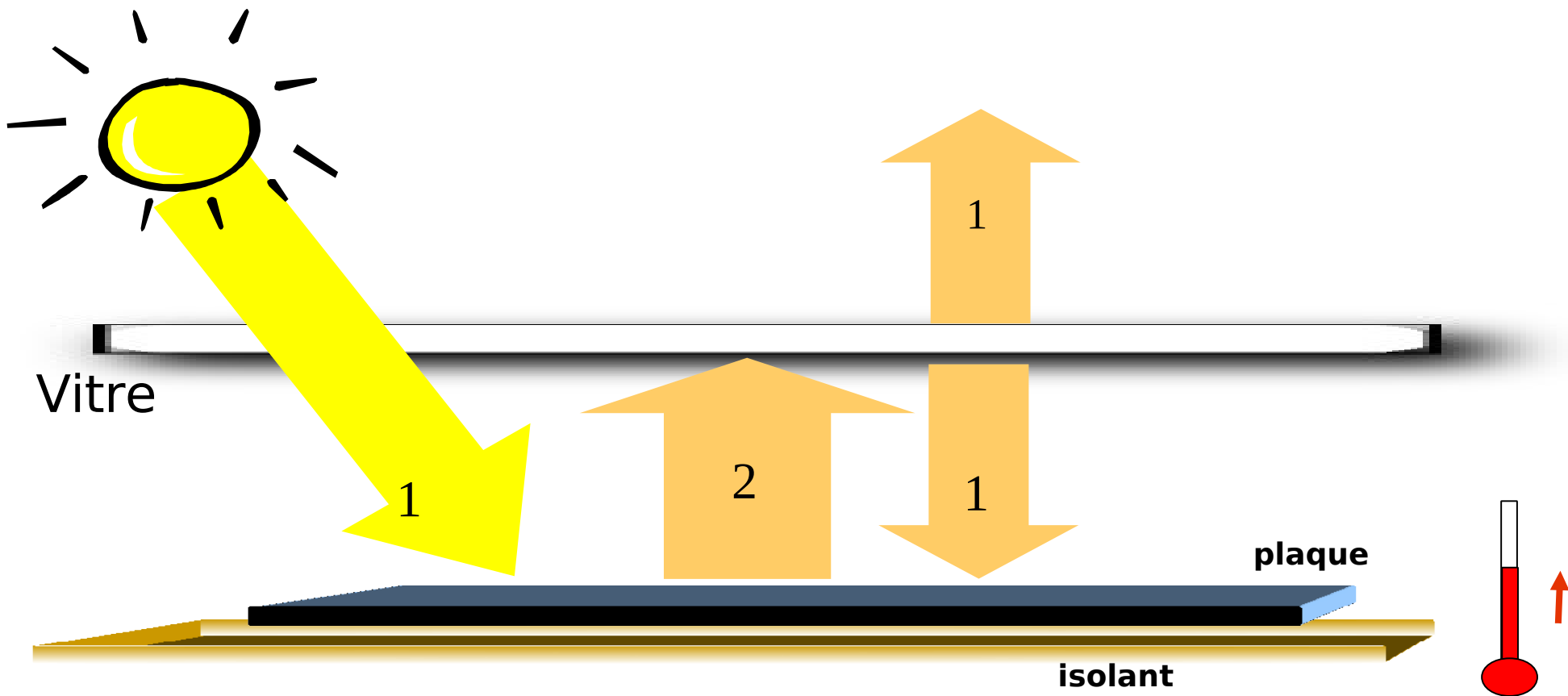
Si on résume le déroulement précédent, ...

## 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.

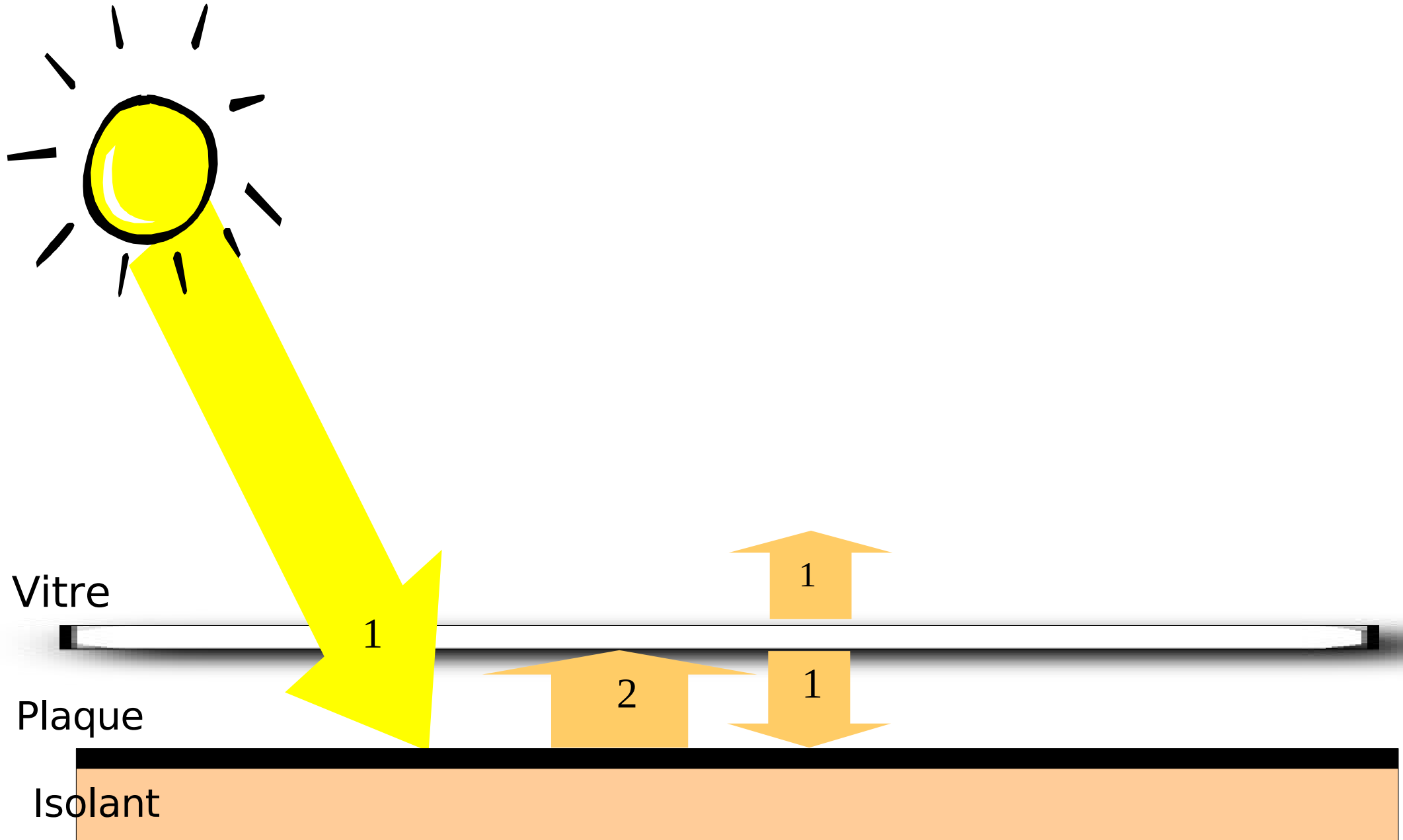
## 5) L'effet de serre

**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

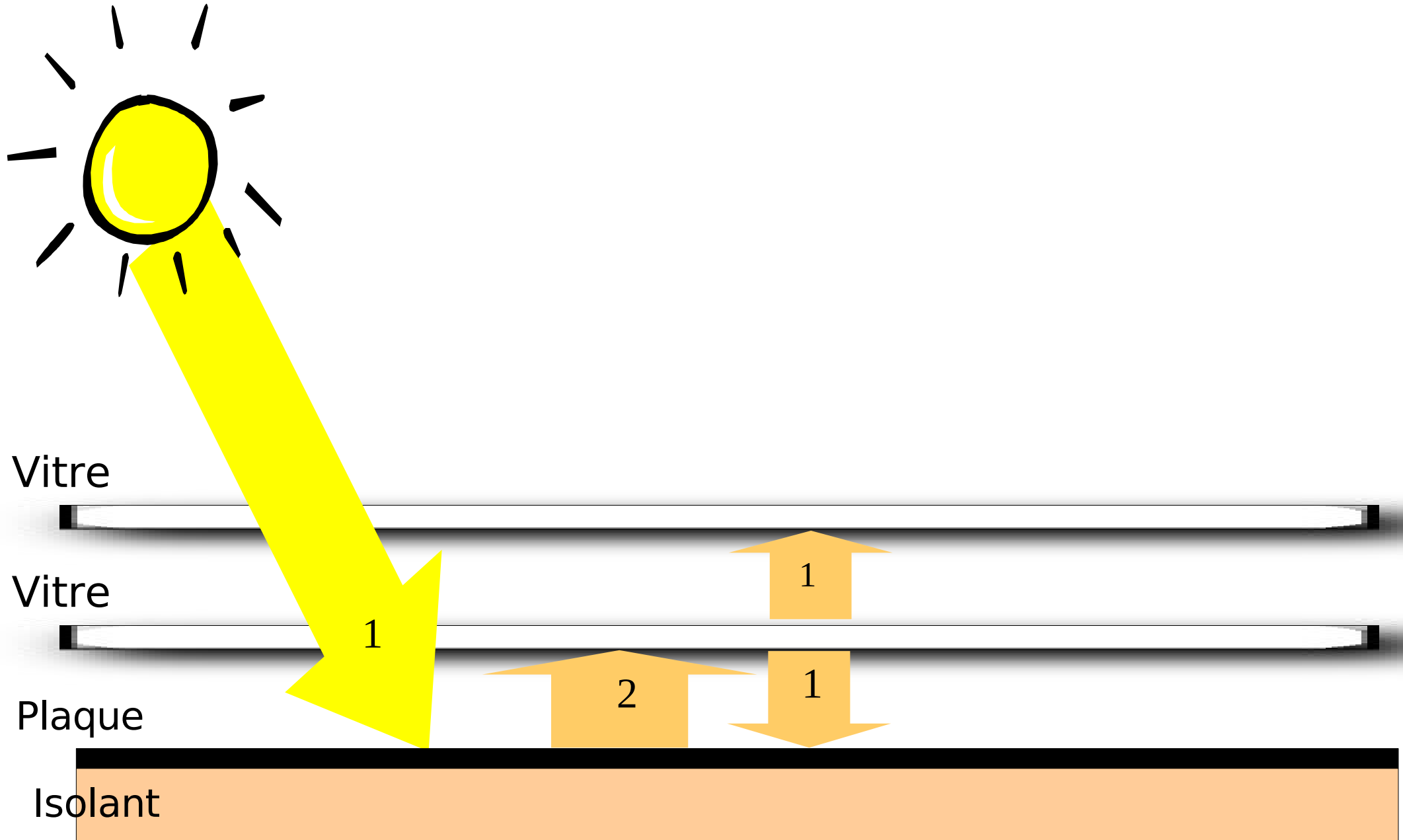
La vitre **absorbe** le rayonnement infrarouge, ne le réfléchit pas

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.

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

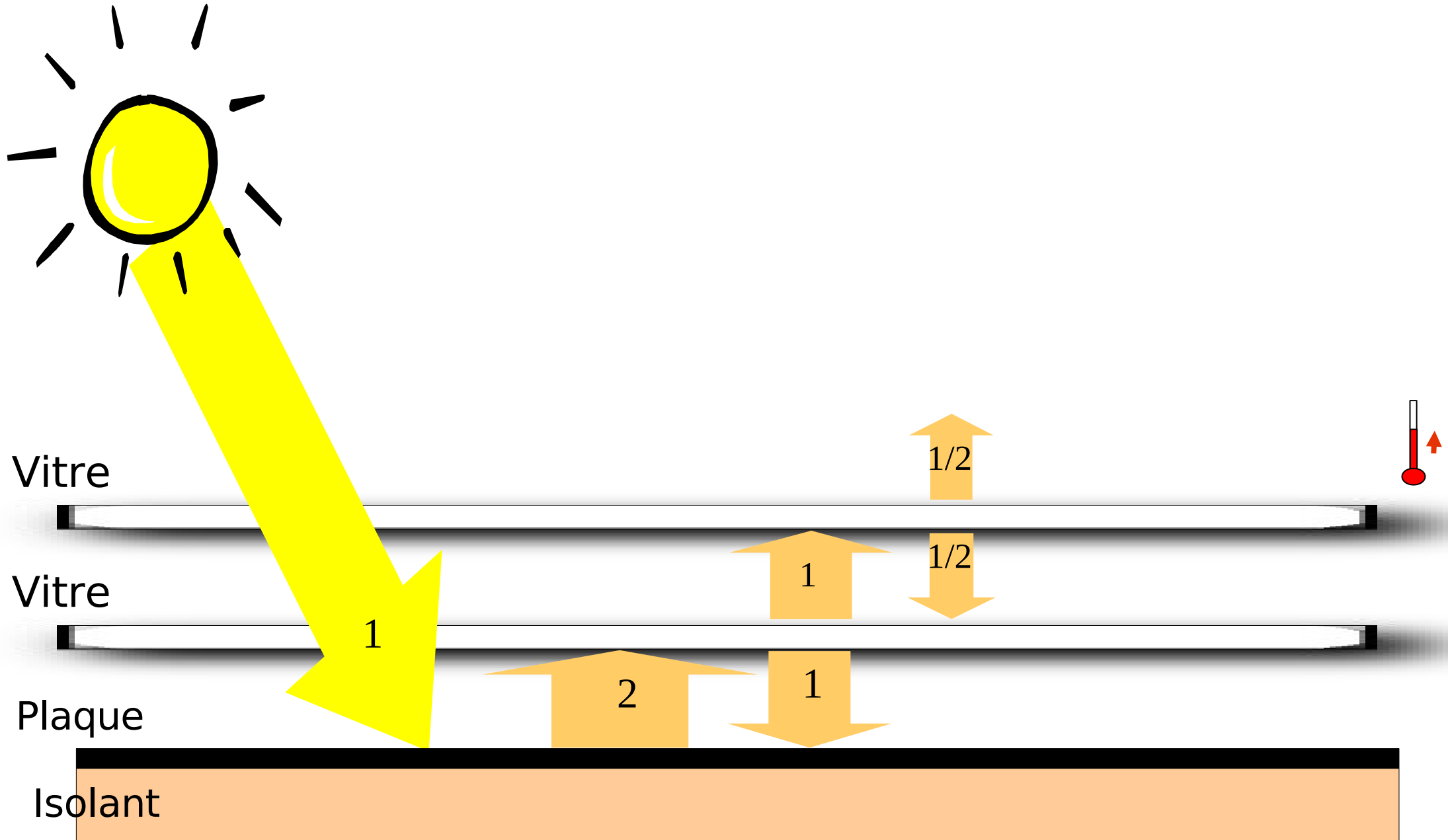


6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?

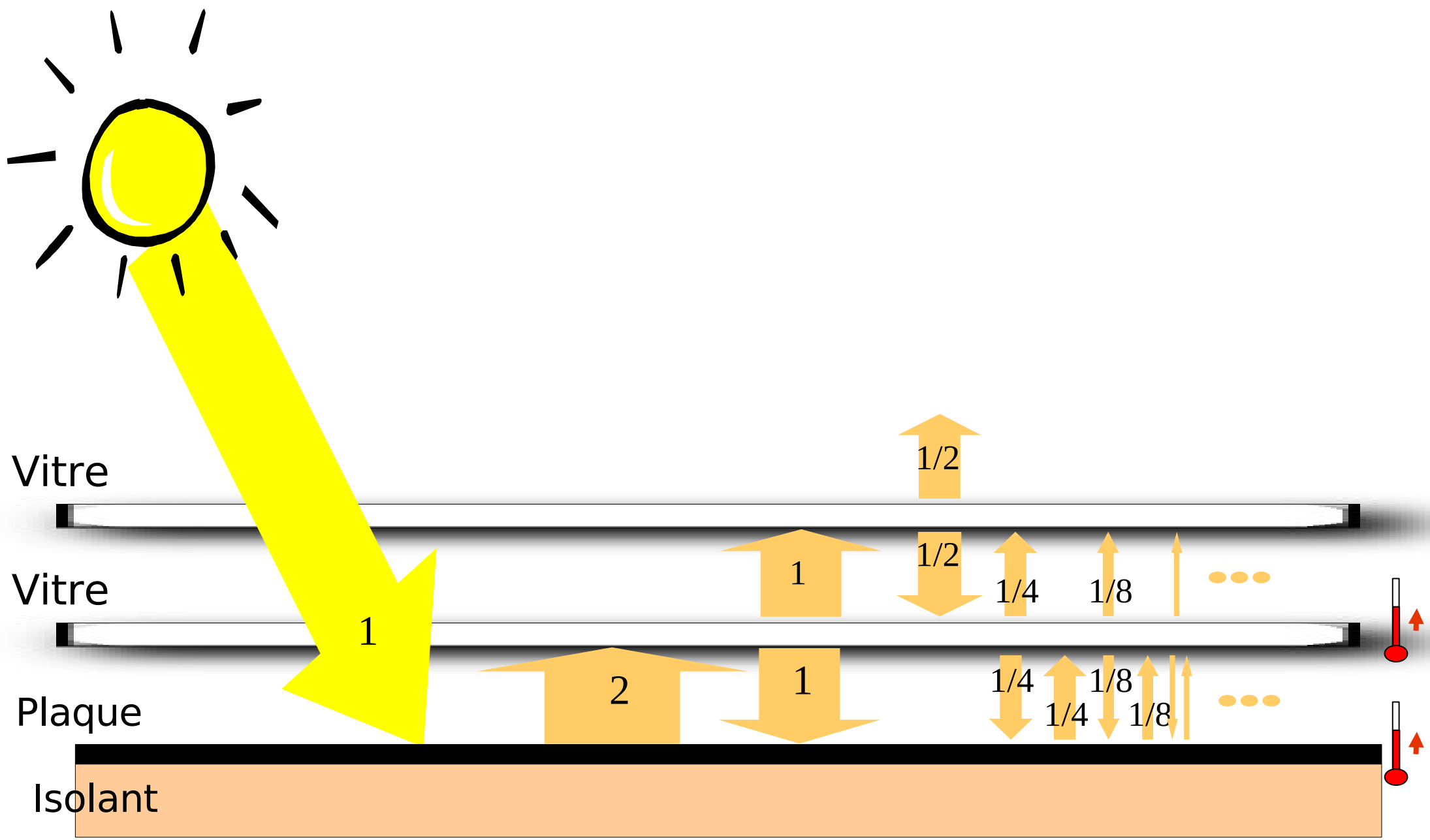




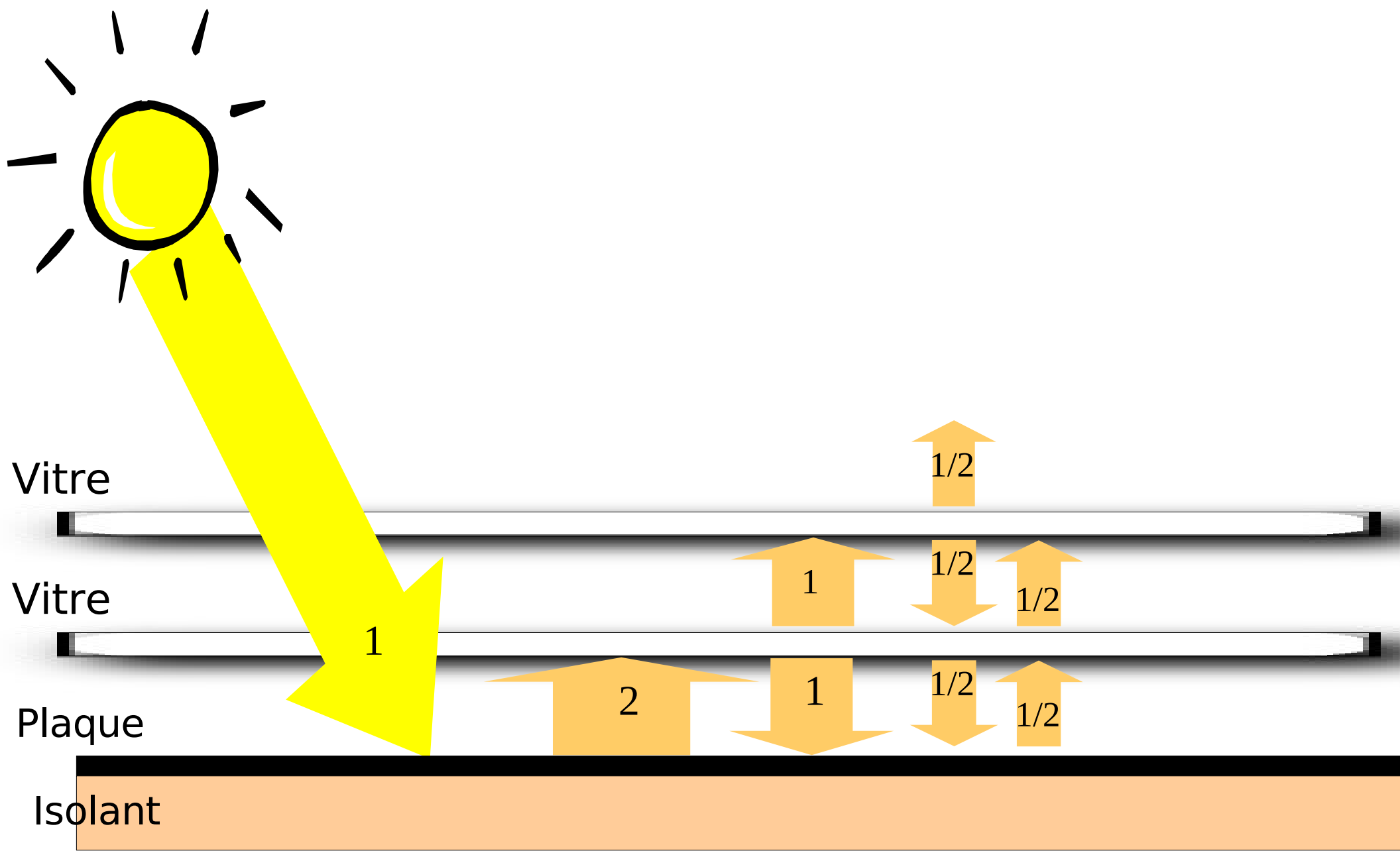
6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



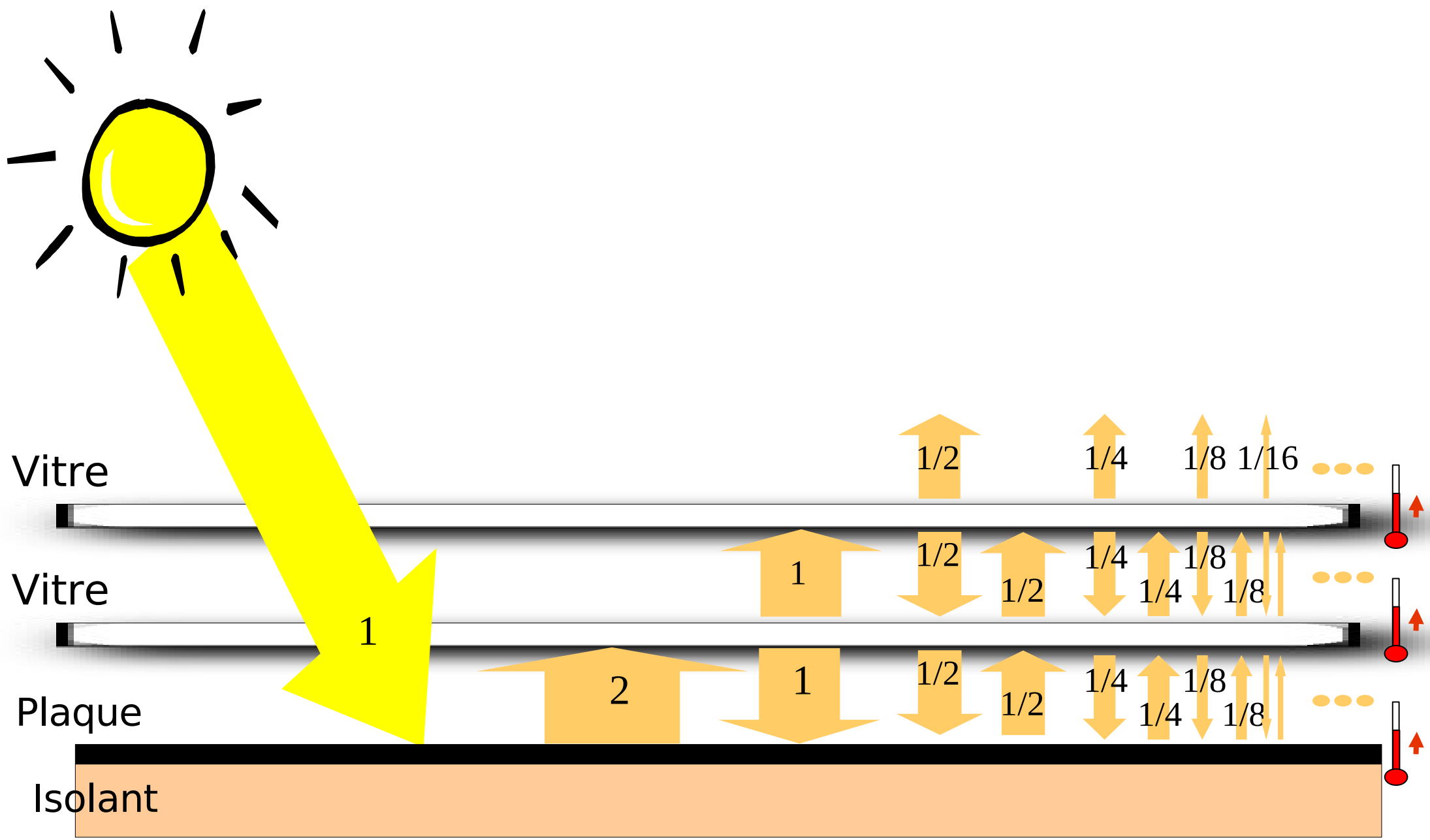
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



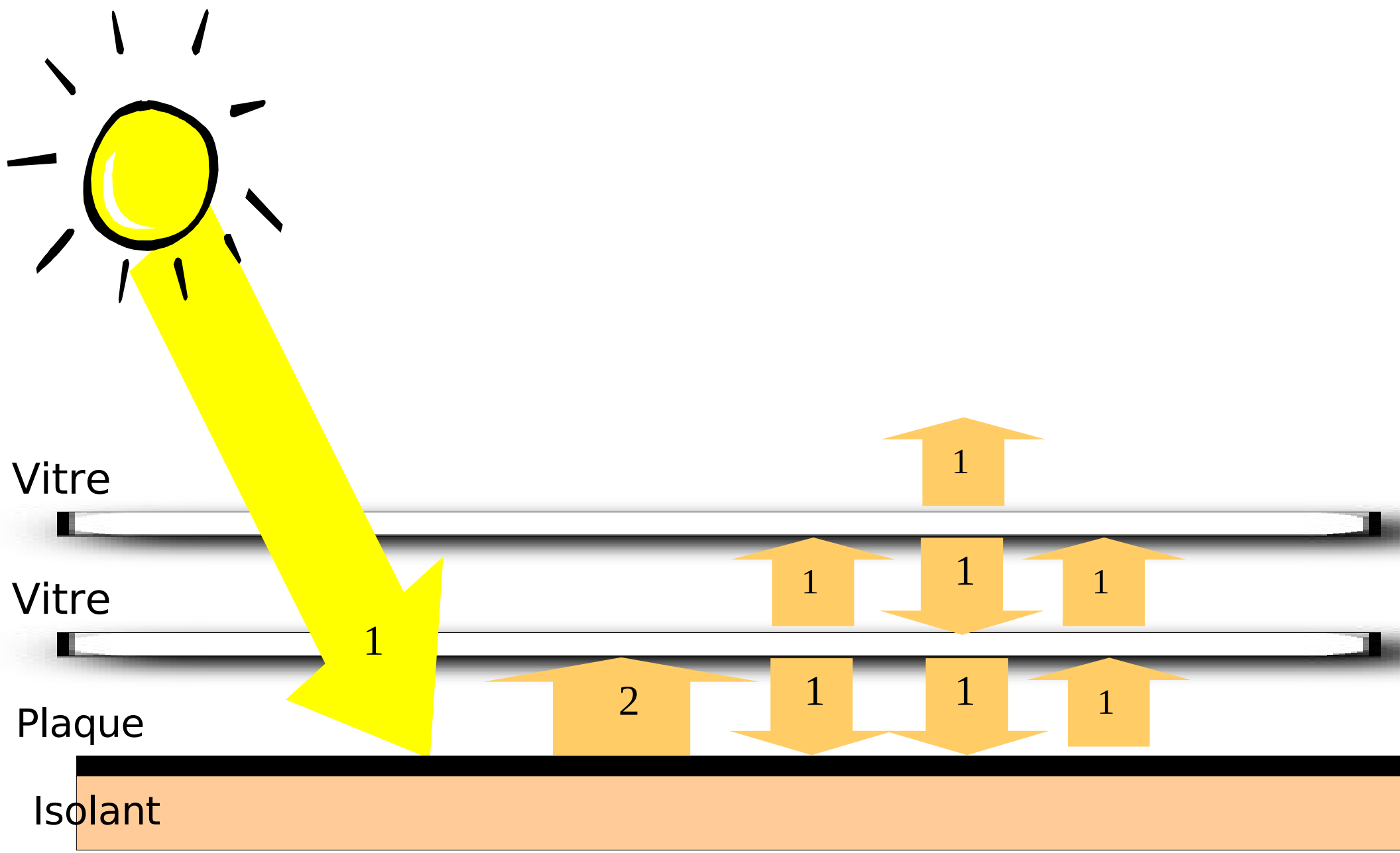
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



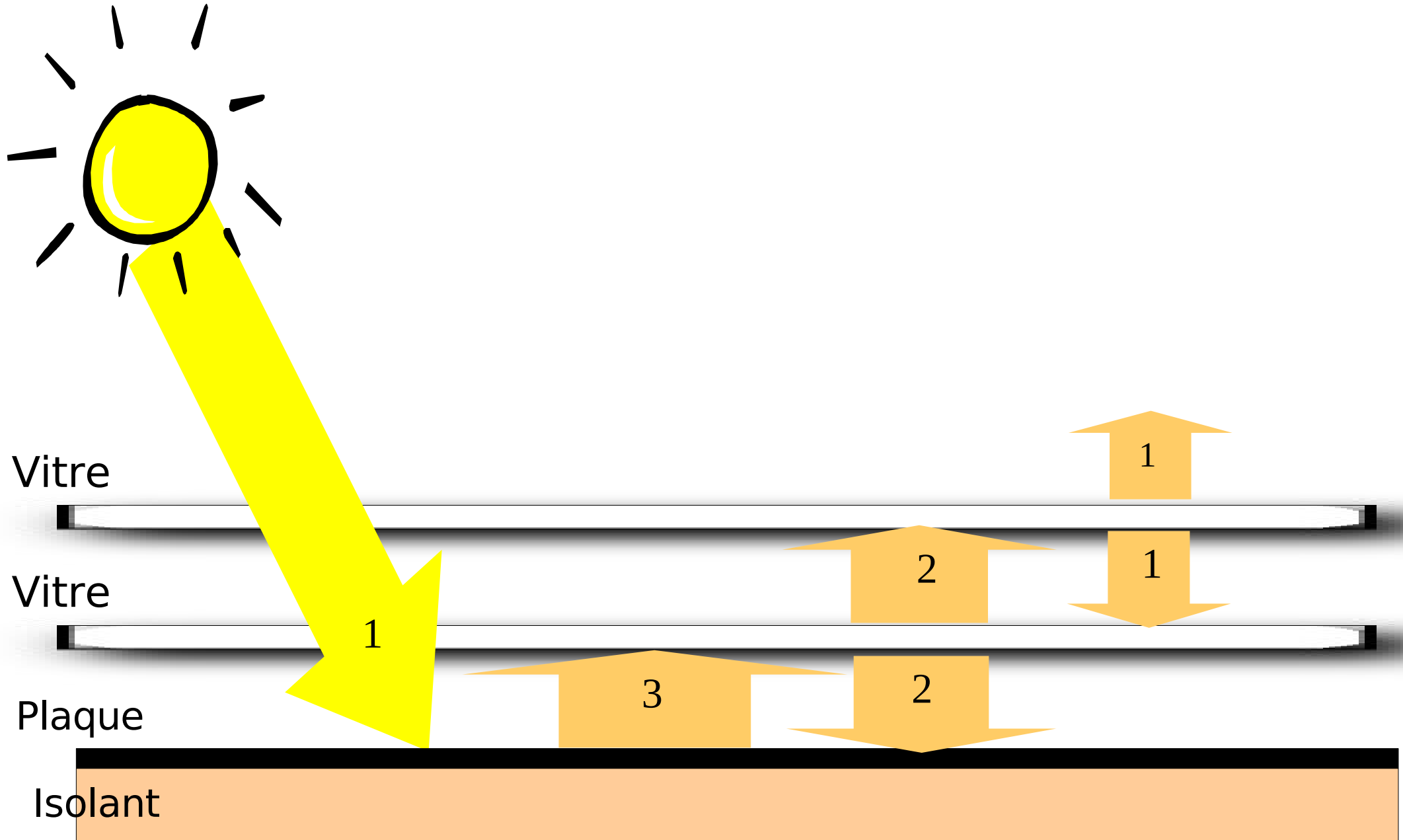
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



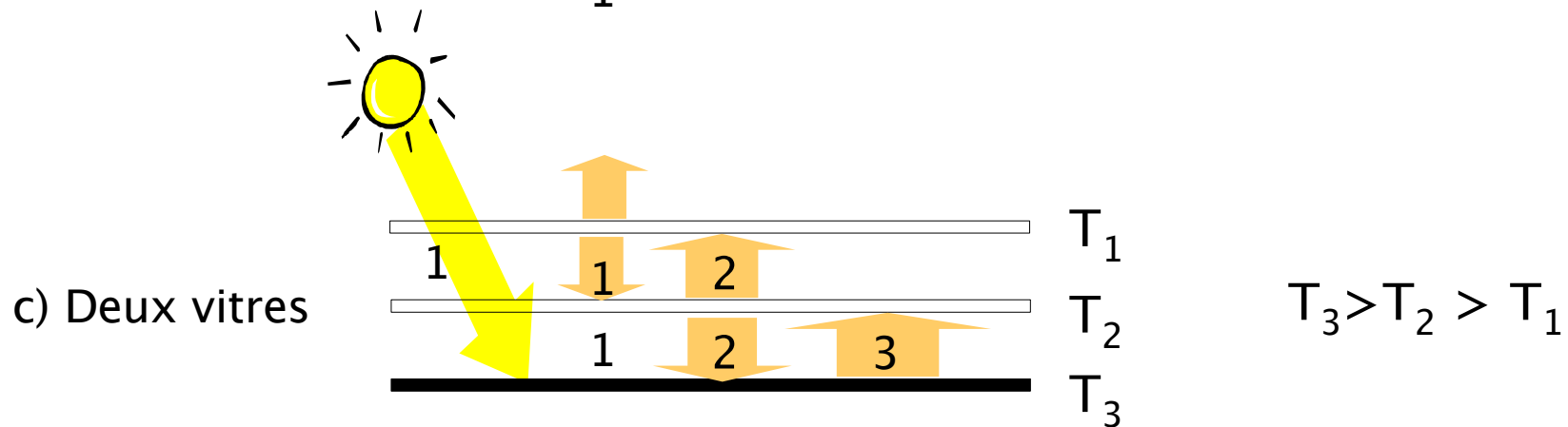
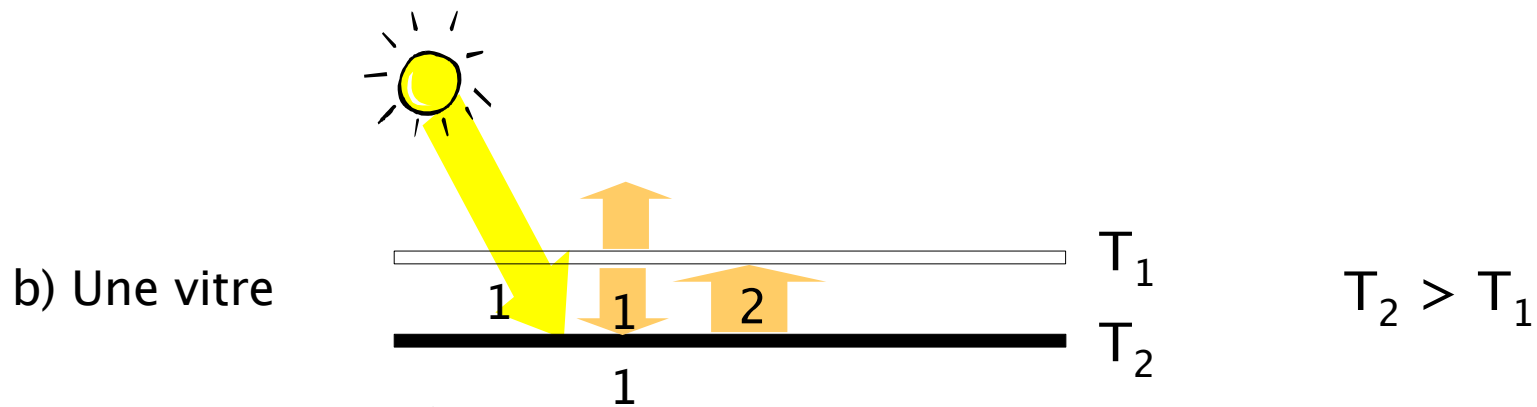
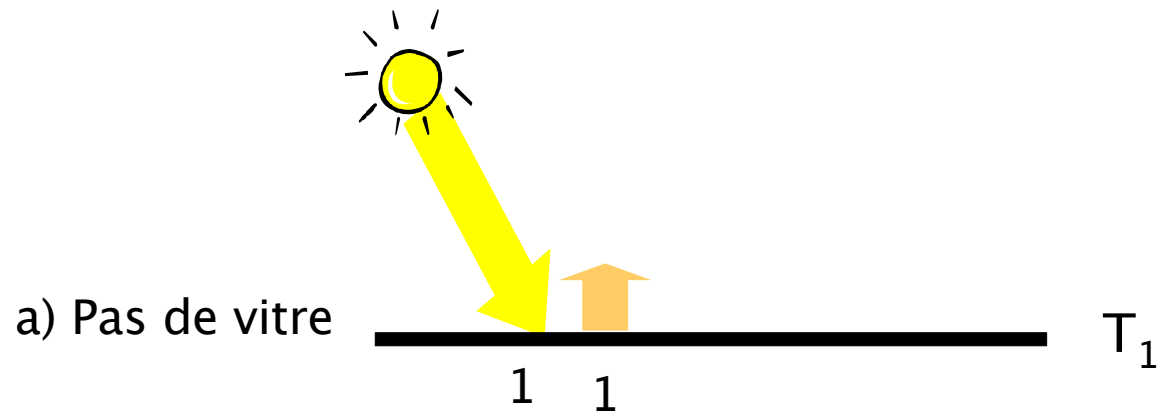
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



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



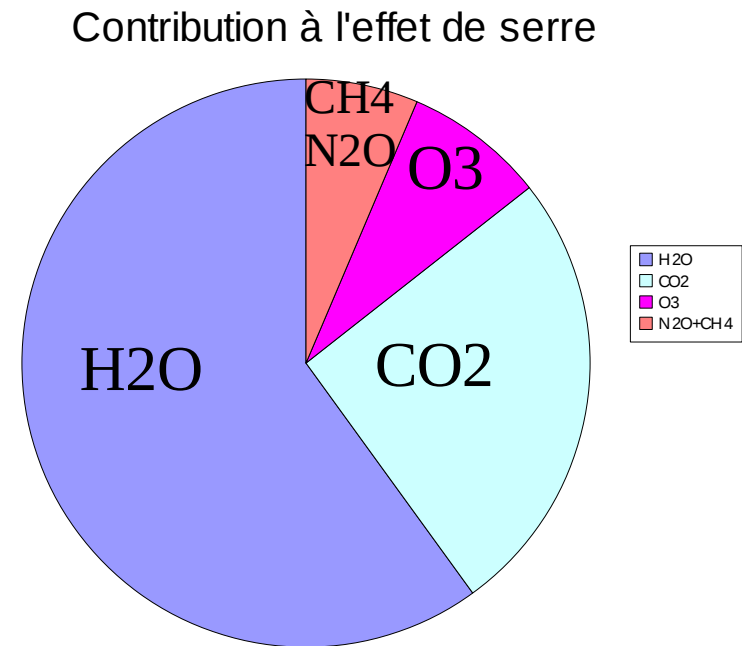
# 6) Il y a-t-il un effet de serre maximum ?



# 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%  |

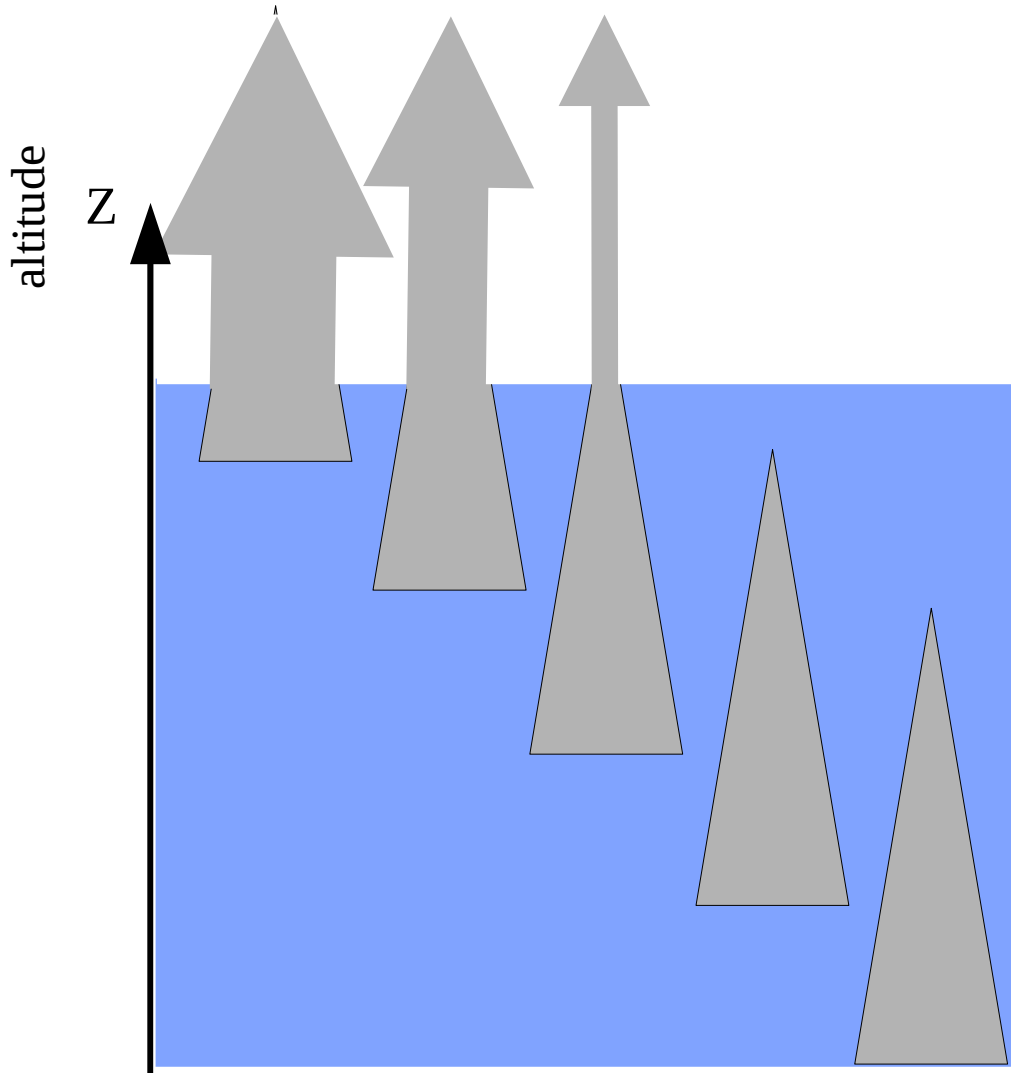


Source: Meehl and Trenberth, 1997

- 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



# Altitude d'émission

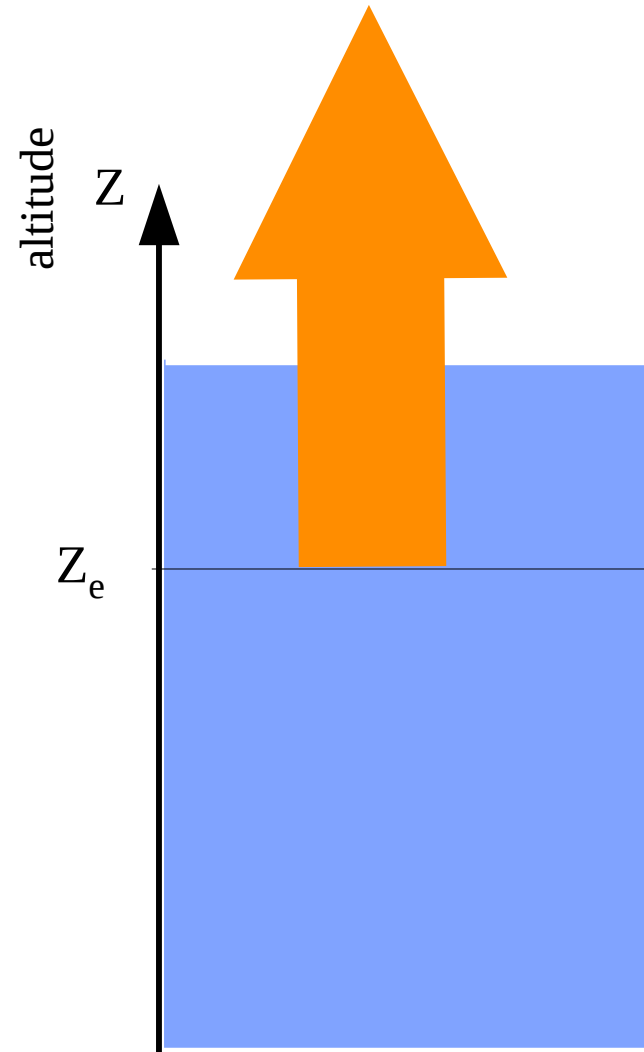
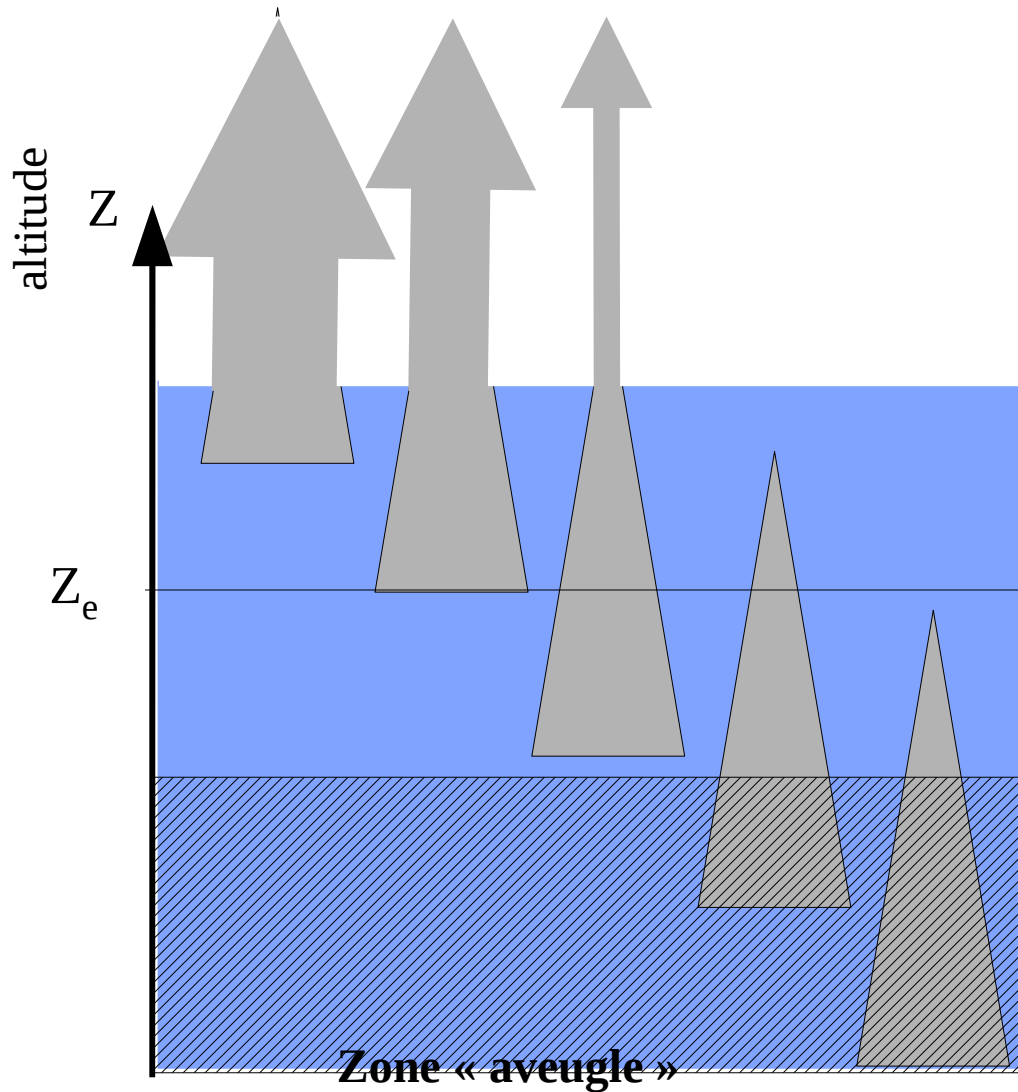


Densité du flux radiatif échangé entre un volume de gaz à l'altitude  $z$  et l'espace:

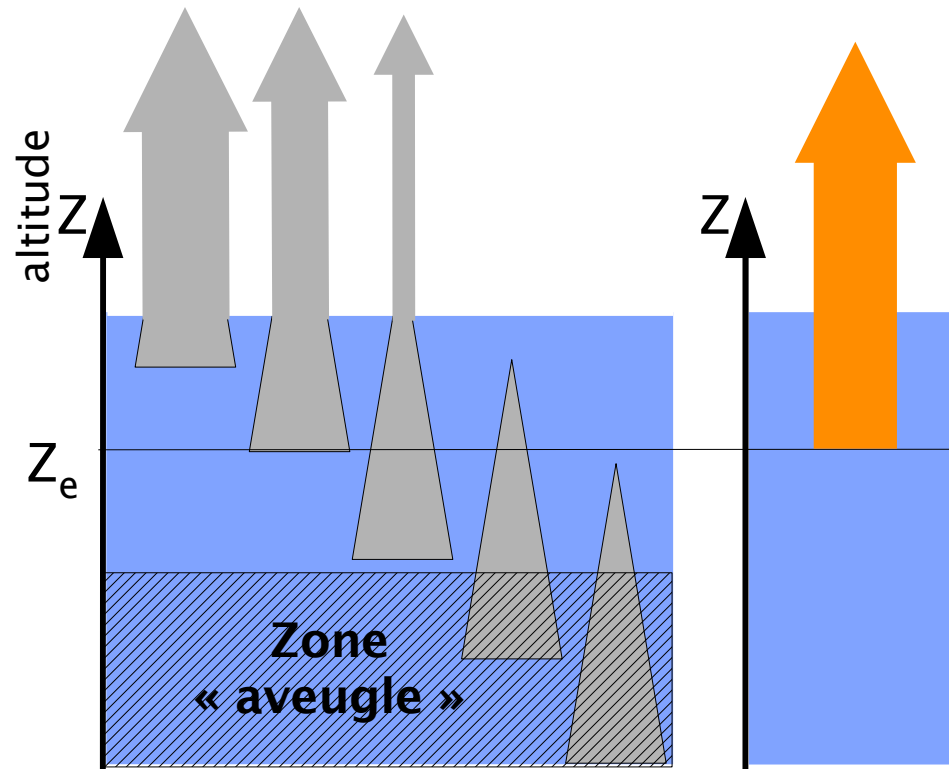
$$\frac{\partial \Psi_{\nu}(z)}{\partial m} = \underbrace{\kappa_{\nu} B_{\nu}(T)}_{\text{flux émis}} \underbrace{\exp(-\kappa_{\nu} \cdot M(z))}_{\text{transmissivité}}$$

avec: **flux émis** **transmissivité**  
 $M(z)$ : masse d'atmosphère entre  $z$  et l'espace  
 $\kappa_{\nu}$ : coefficient d'absorption par unité de masse  
 $B_{\nu}(T)$ : fonction de Planck

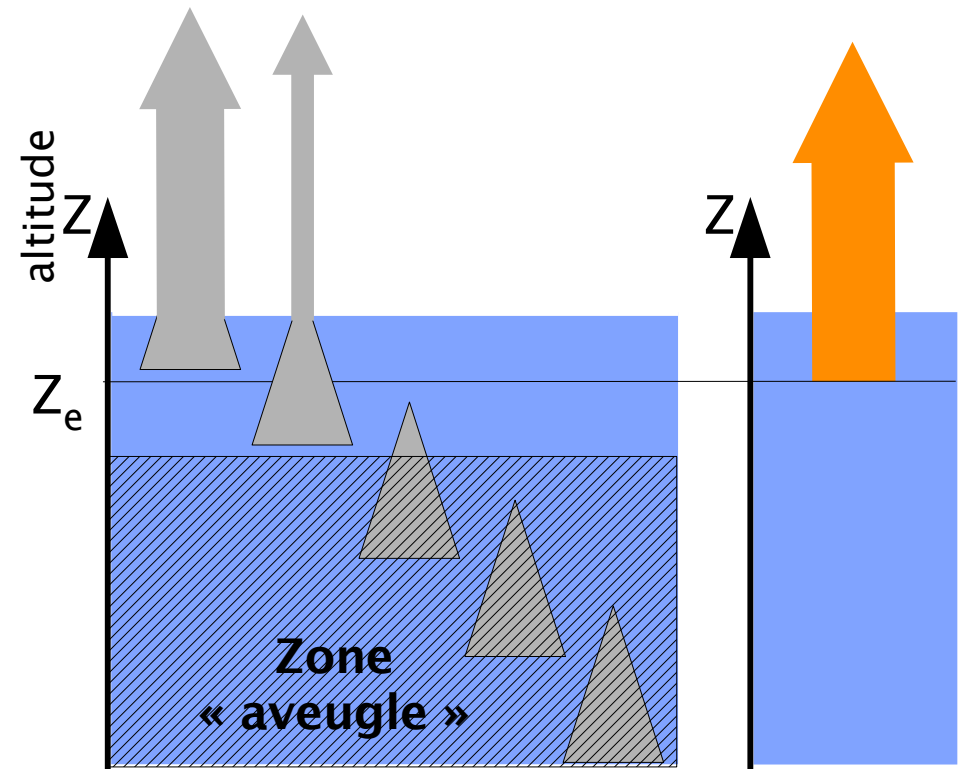
# Altitude d'émission



# Altitude d'émission



Configuration de référence

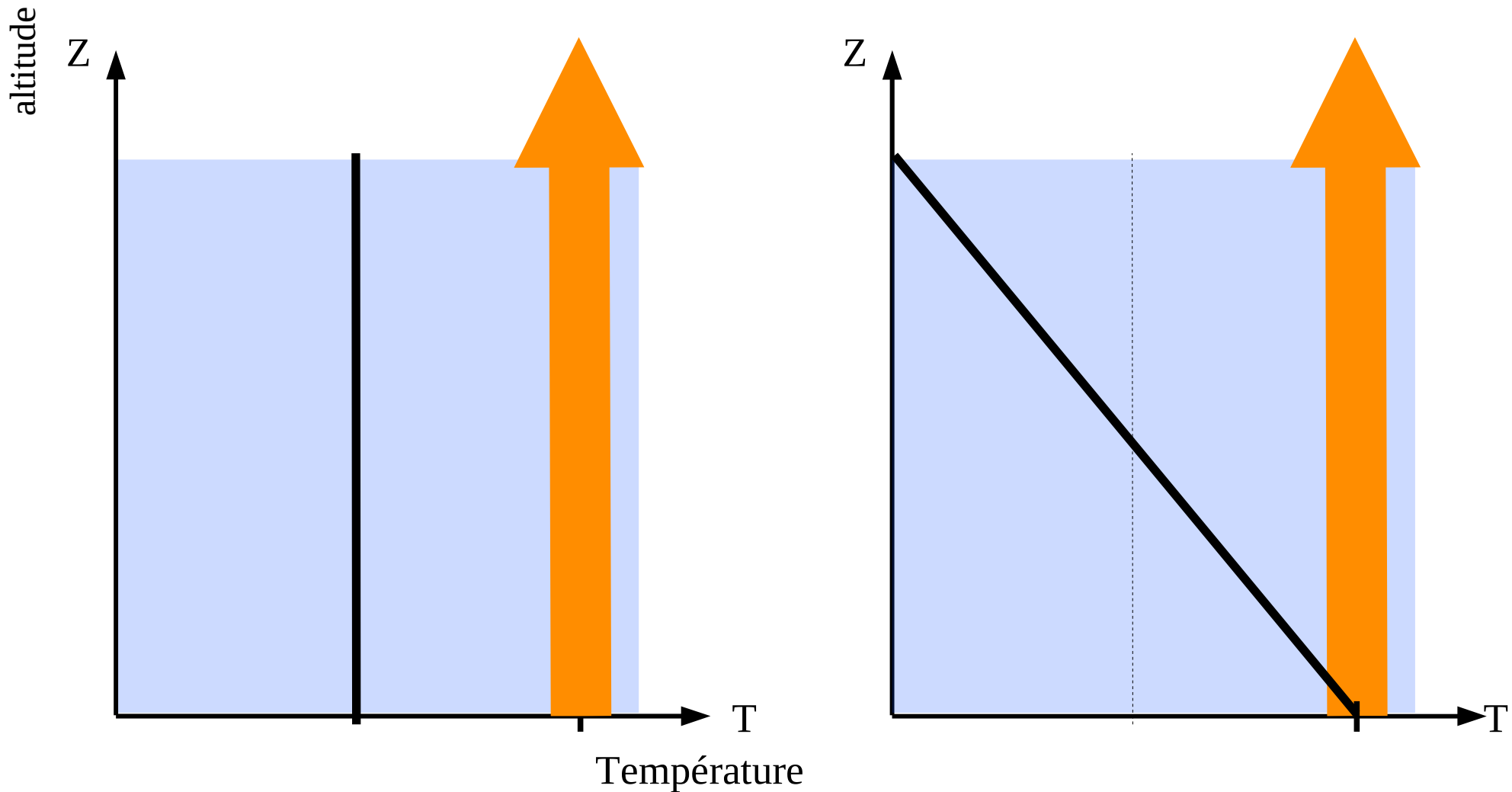


Doublement de la quantité d'absorbant

# Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant :  $\sigma \cdot T(z_e)^4$

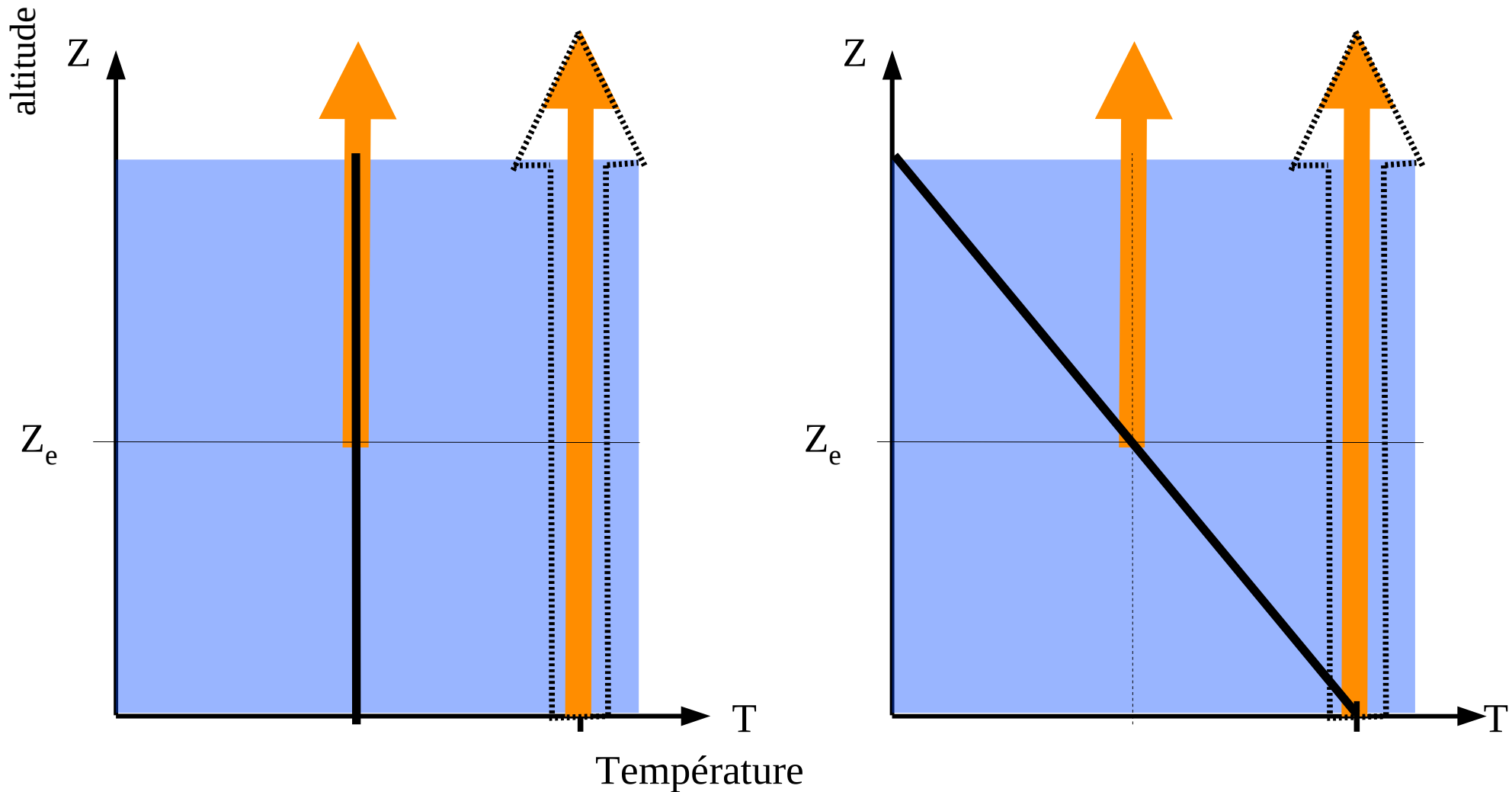
**$z_e$** : altitude d'émission vers l'espace



# Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant :  $\sigma \cdot T(z_e)^4$

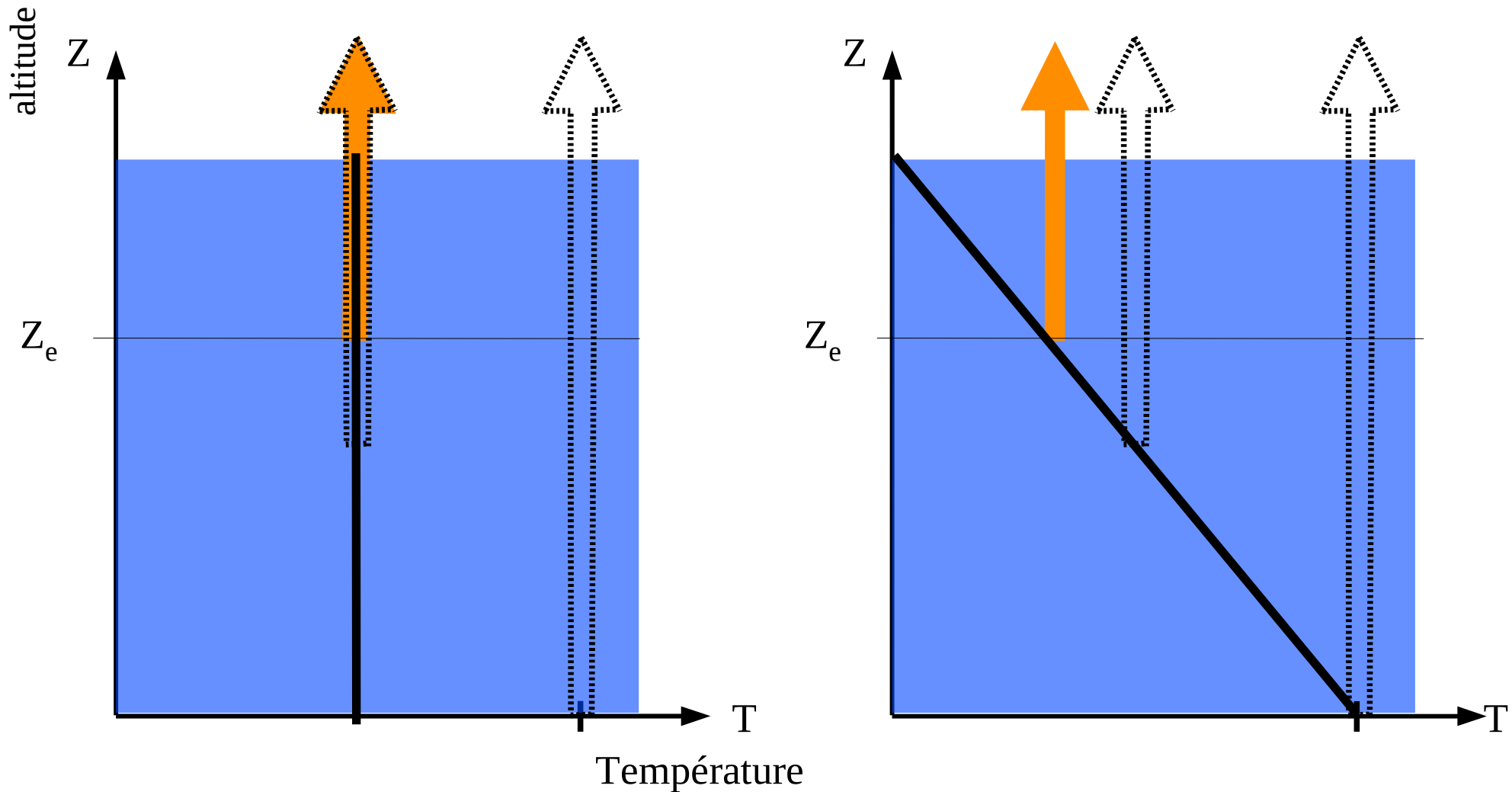
**Z<sub>e</sub>**: altitude d'émission vers l'espace



# Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant :  $\sigma \cdot T(z_e)^4$

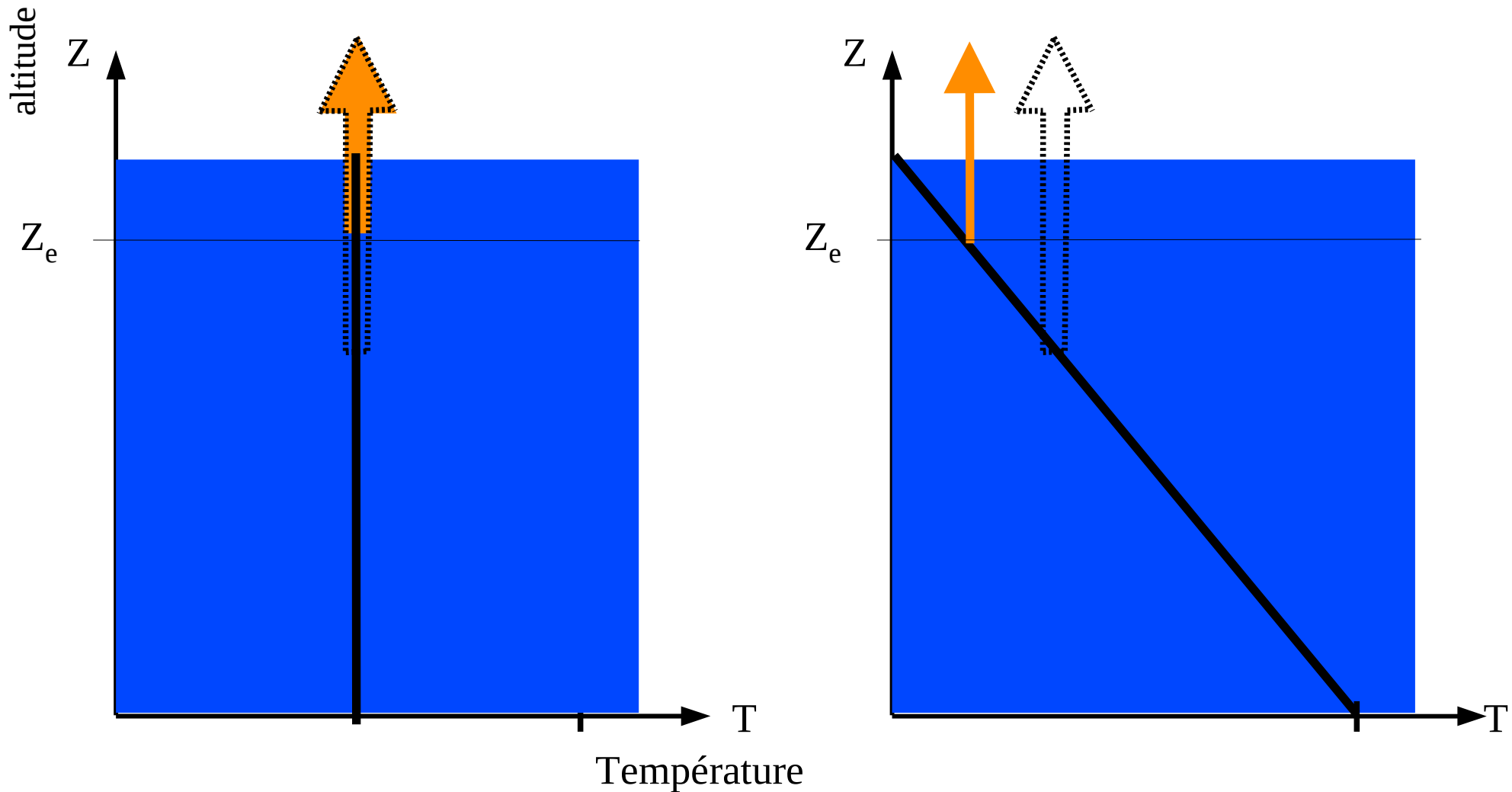
$Z_e$ : altitude d'émission vers l'espace



# Effet de serre dans un milieu isotherme ou stratifié

Rayonnement IR sortant :  $\sigma \cdot T(z_e)^4$

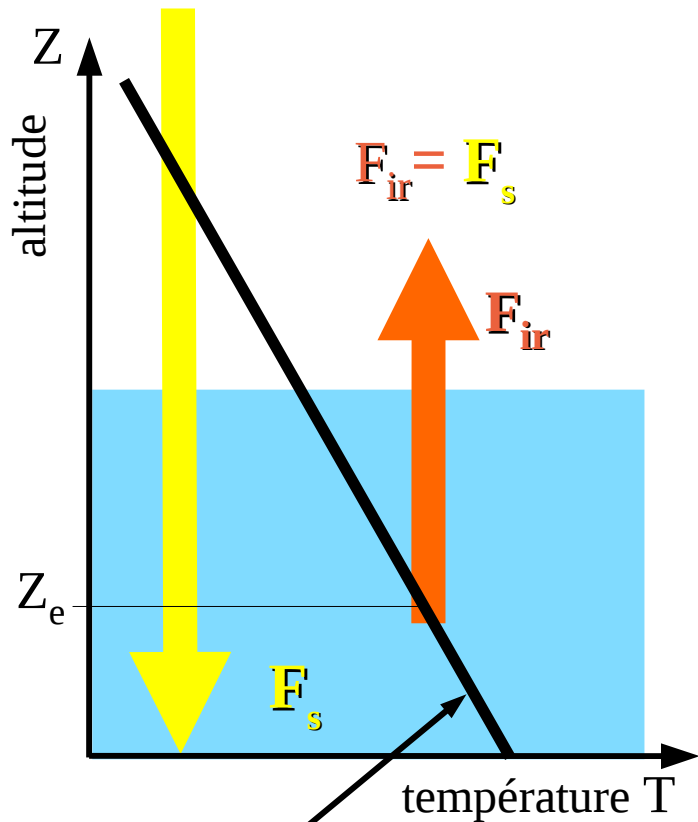
**Z<sub>e</sub>**: altitude d'émission vers l'espace



# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

Rayonnement solaire net  $F_s$

Rayonnement IR sortant  $F_{ir}$



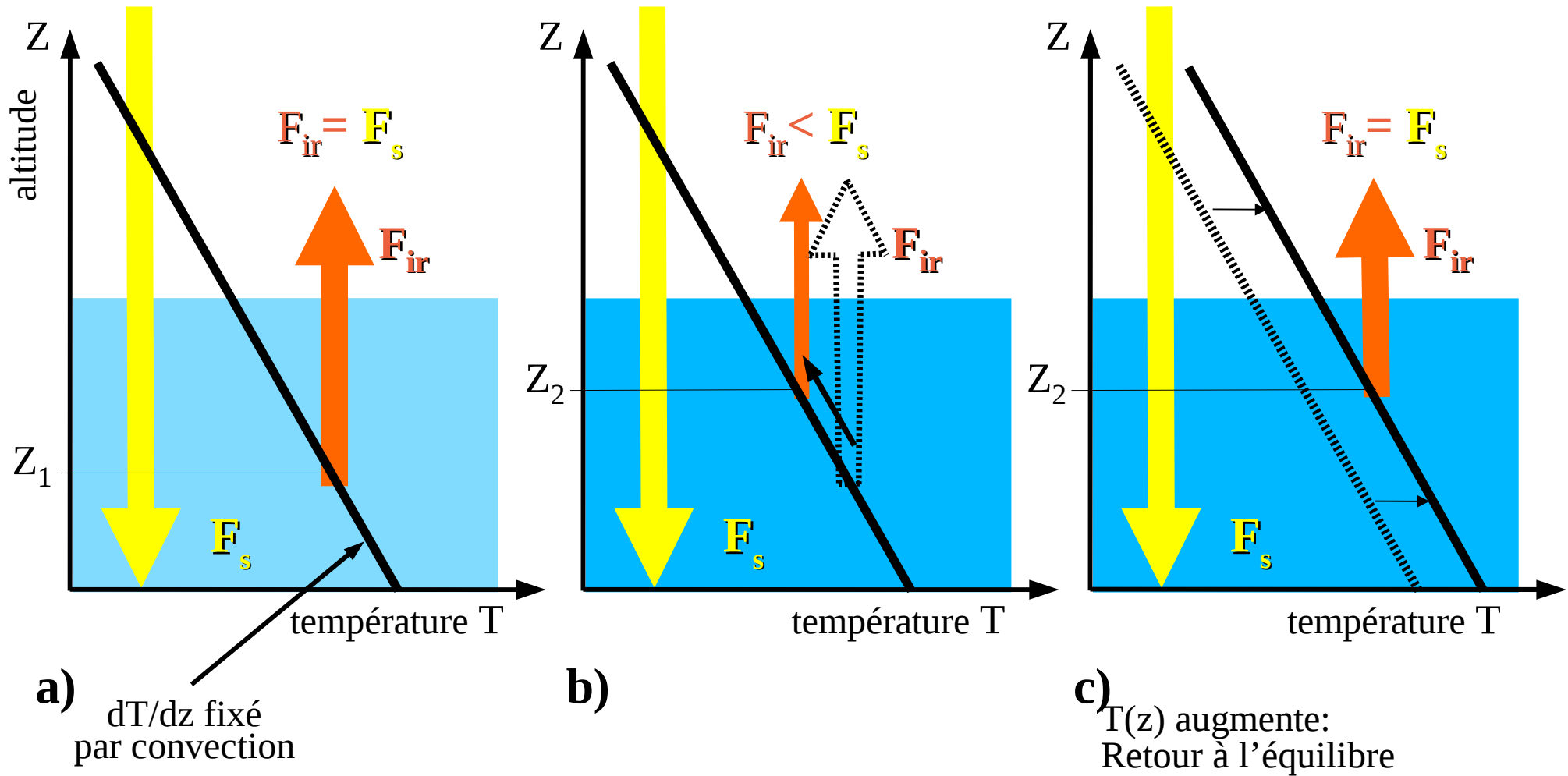
$Z_e$ : altitude d'émission vers l'espace

a)  $dT/dz$  fixé  
par convection



# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

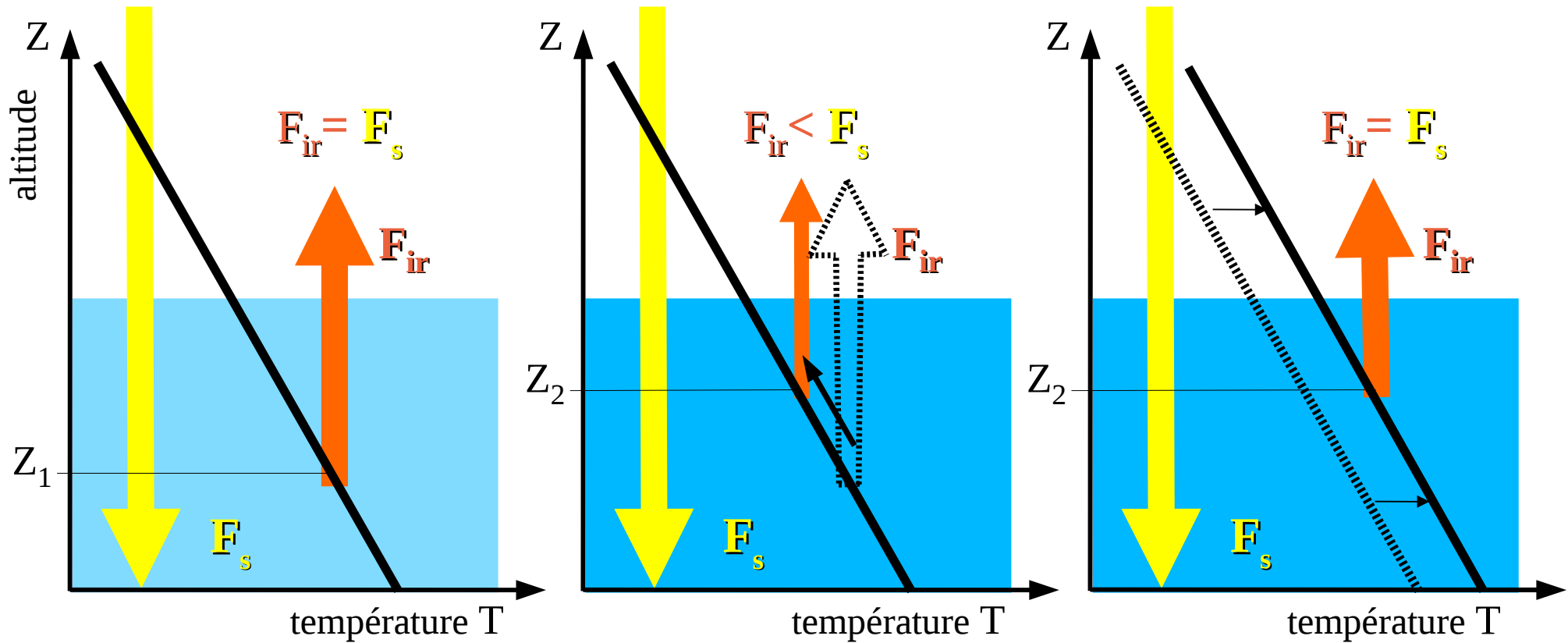
$F_s$  Rayonnement solaire net

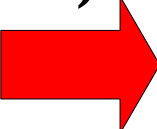


# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

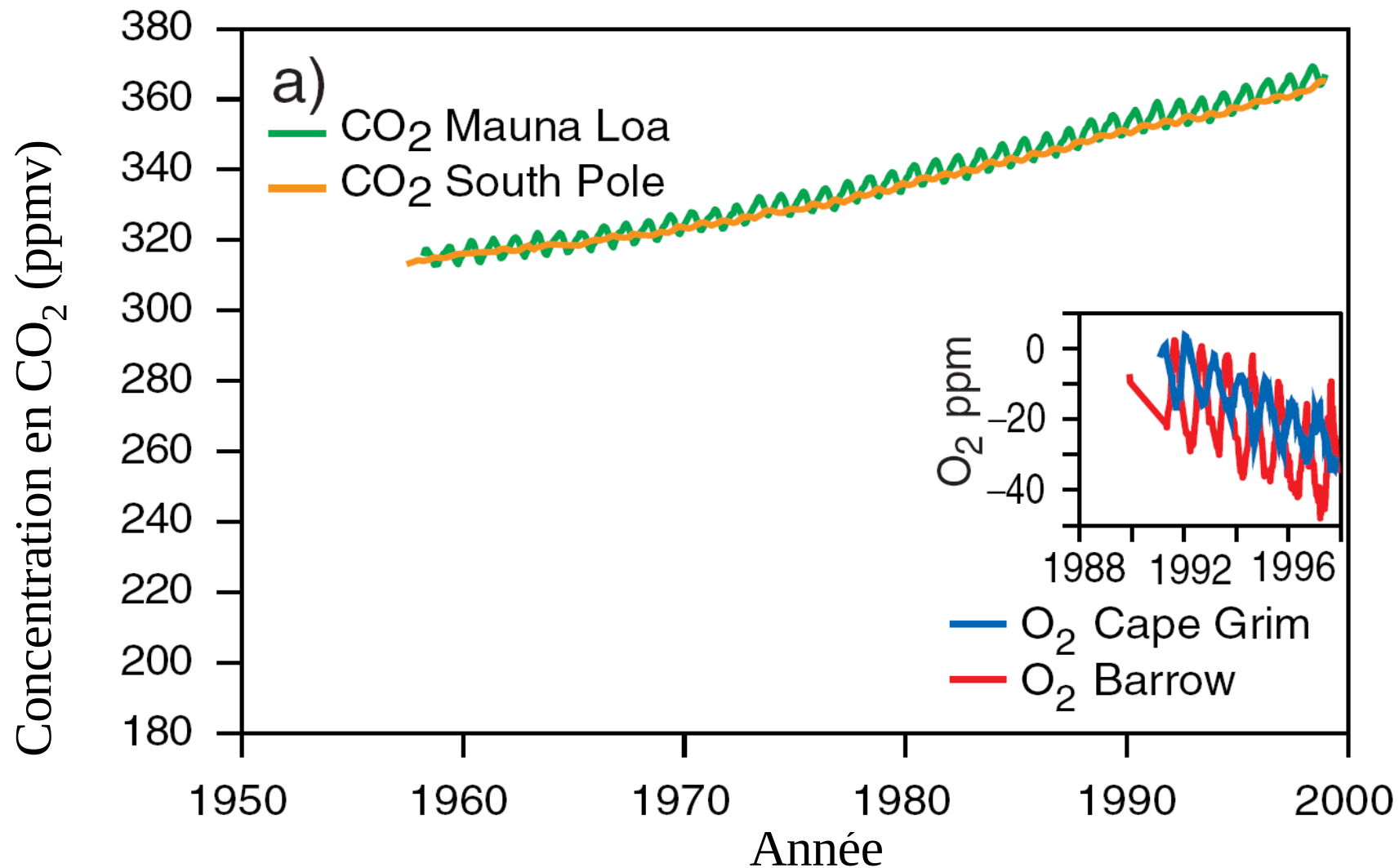
Rayonnement solaire net  $F_s$

Rayonnement IR sortant  $F_{ir}$

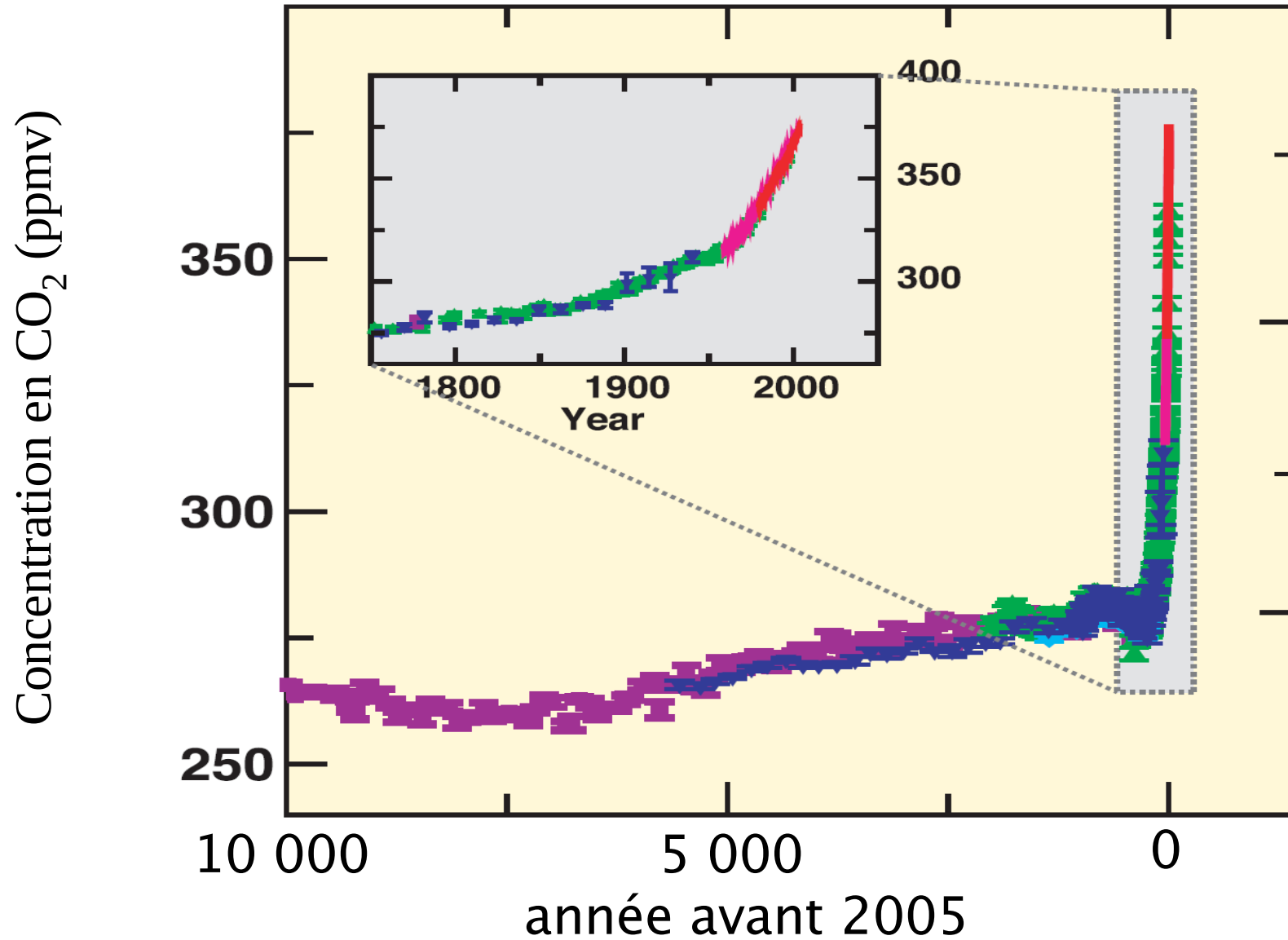


a)  Pour une atmosphère stratifiée, il faut considérer les **flux au sommet de l'atmosphère**, et non les flux en surface (premiers calculs fin des années 1960)

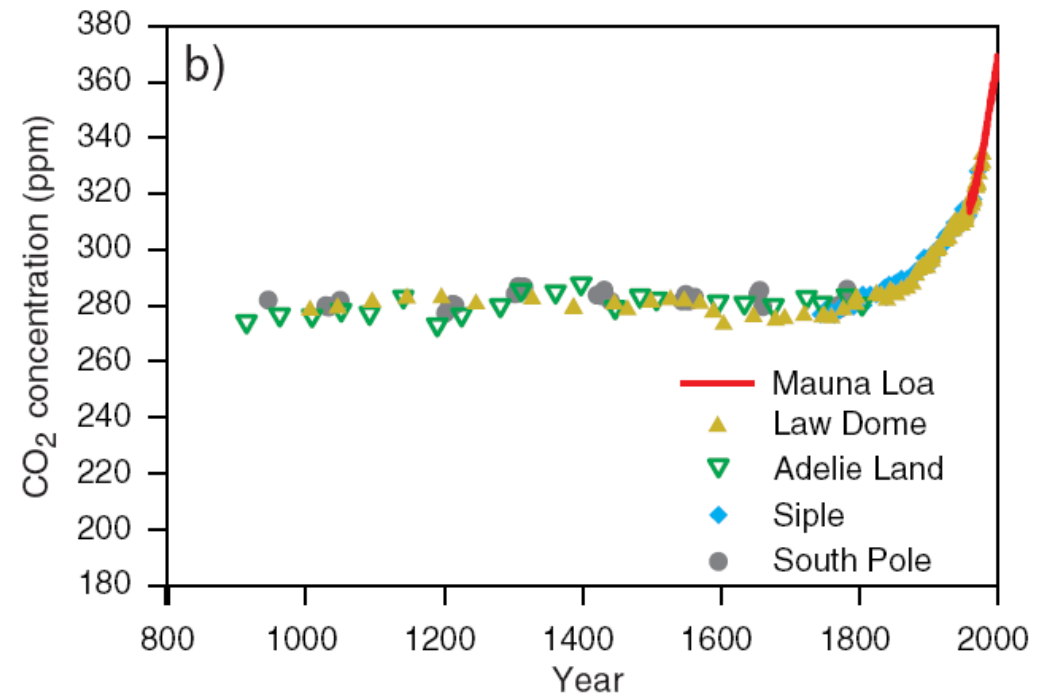
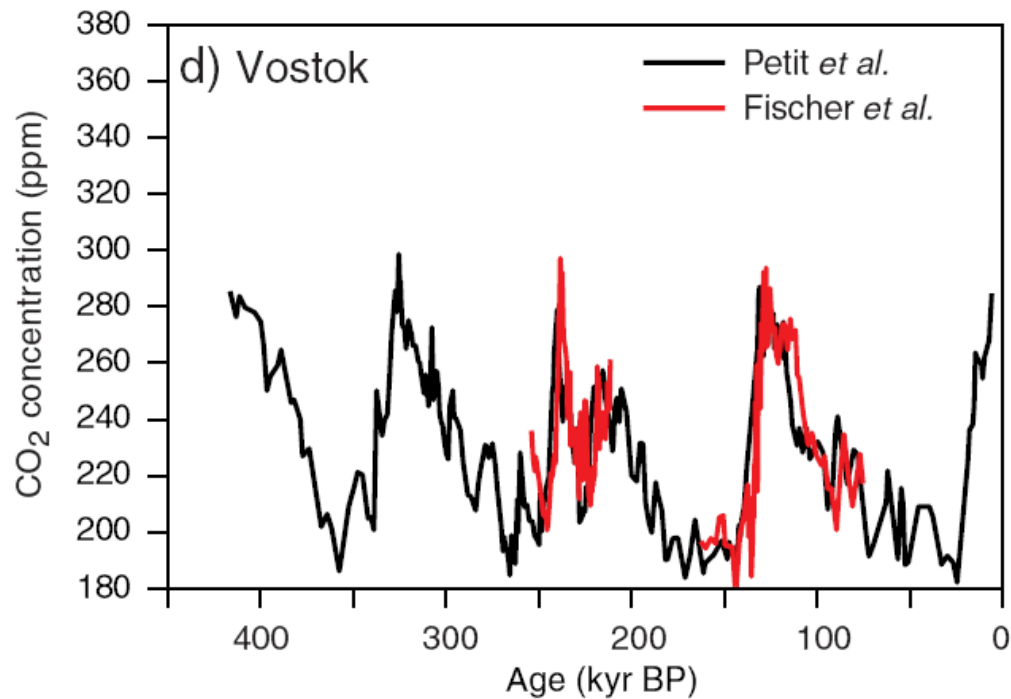
La concentration de CO<sub>2</sub>: on la mesure directement à partir des années 1960, et elle augmente!



# La concentration de CO<sub>2</sub>: évolution depuis 10 000 ans



# Les variations récentes de CO<sub>2</sub> aux regards des variations passées.

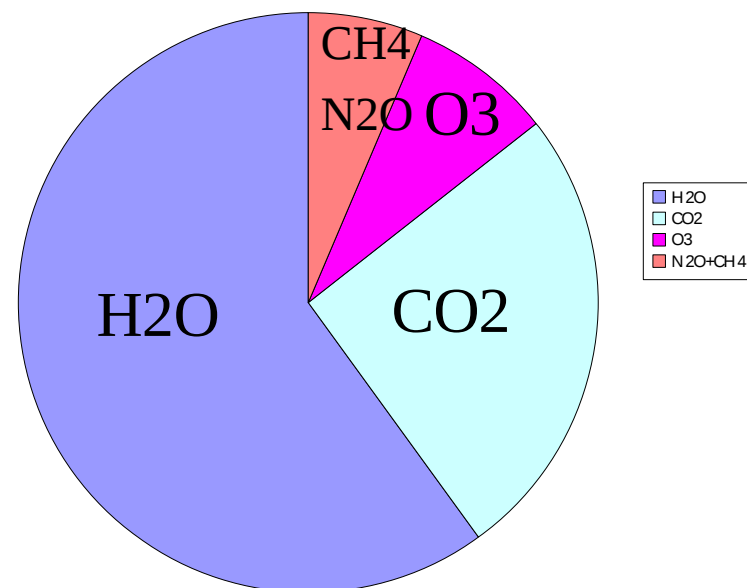


# Les contributions à l'effet de serre

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%  |

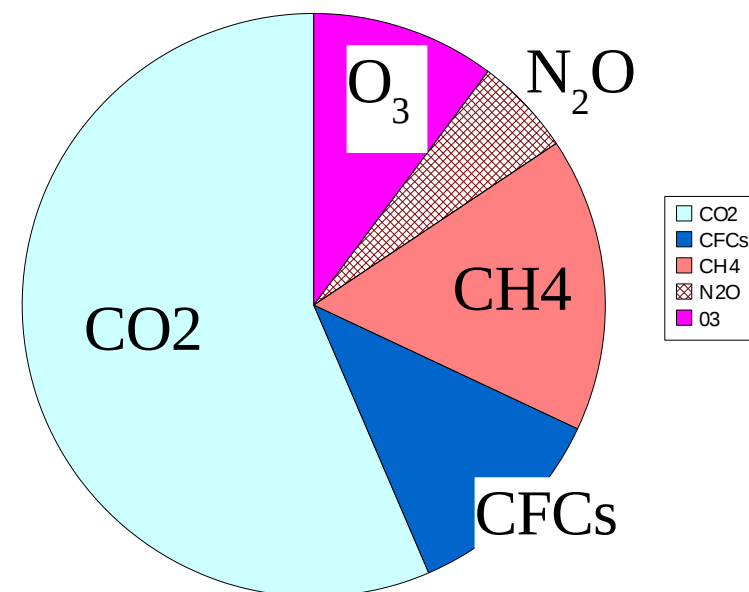
Contribution à l'effet de serre



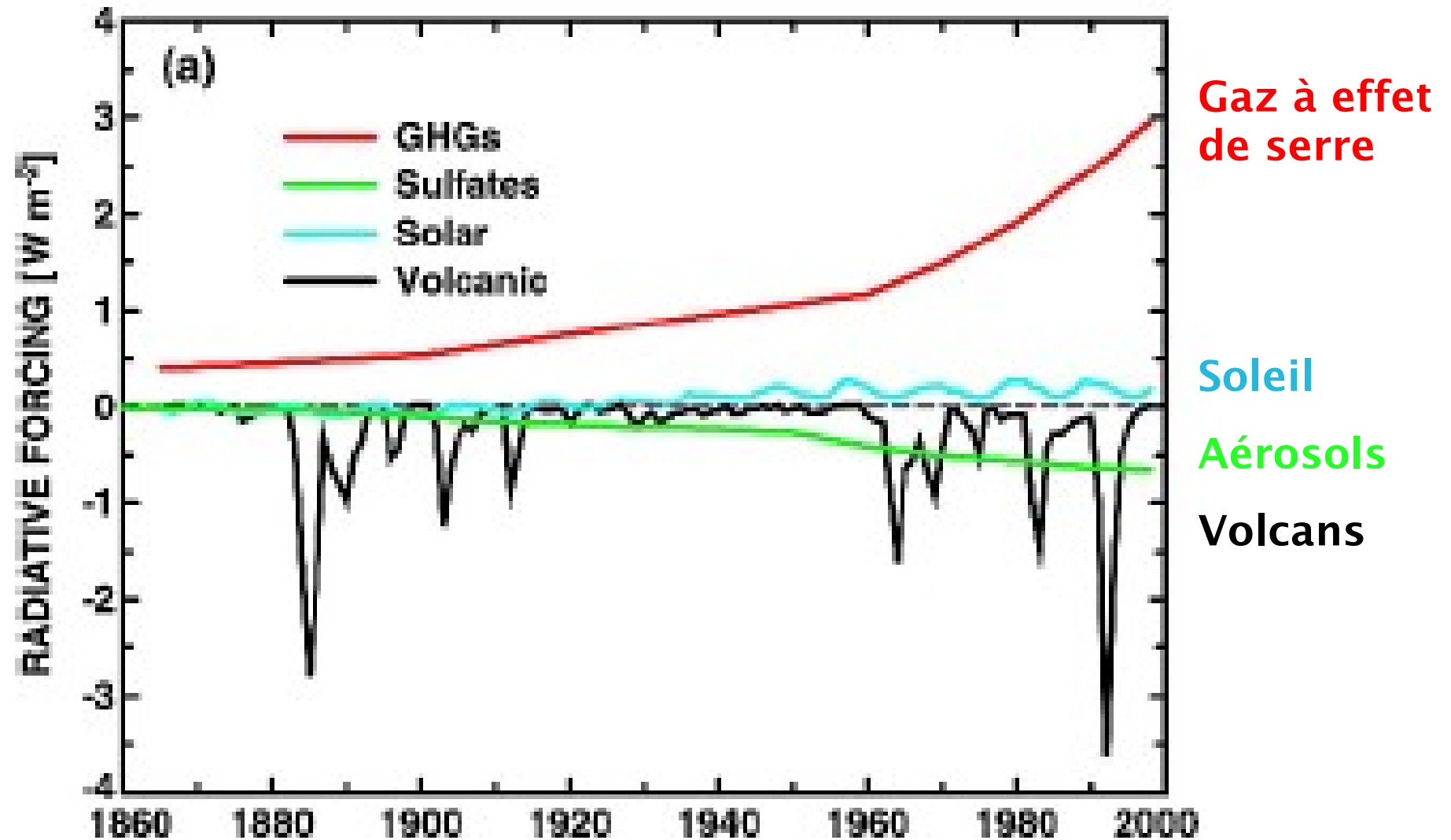
Effet de serre dus aux activités humaines

Contributions à l'accroissement de l'effet dus aux activités humaines:

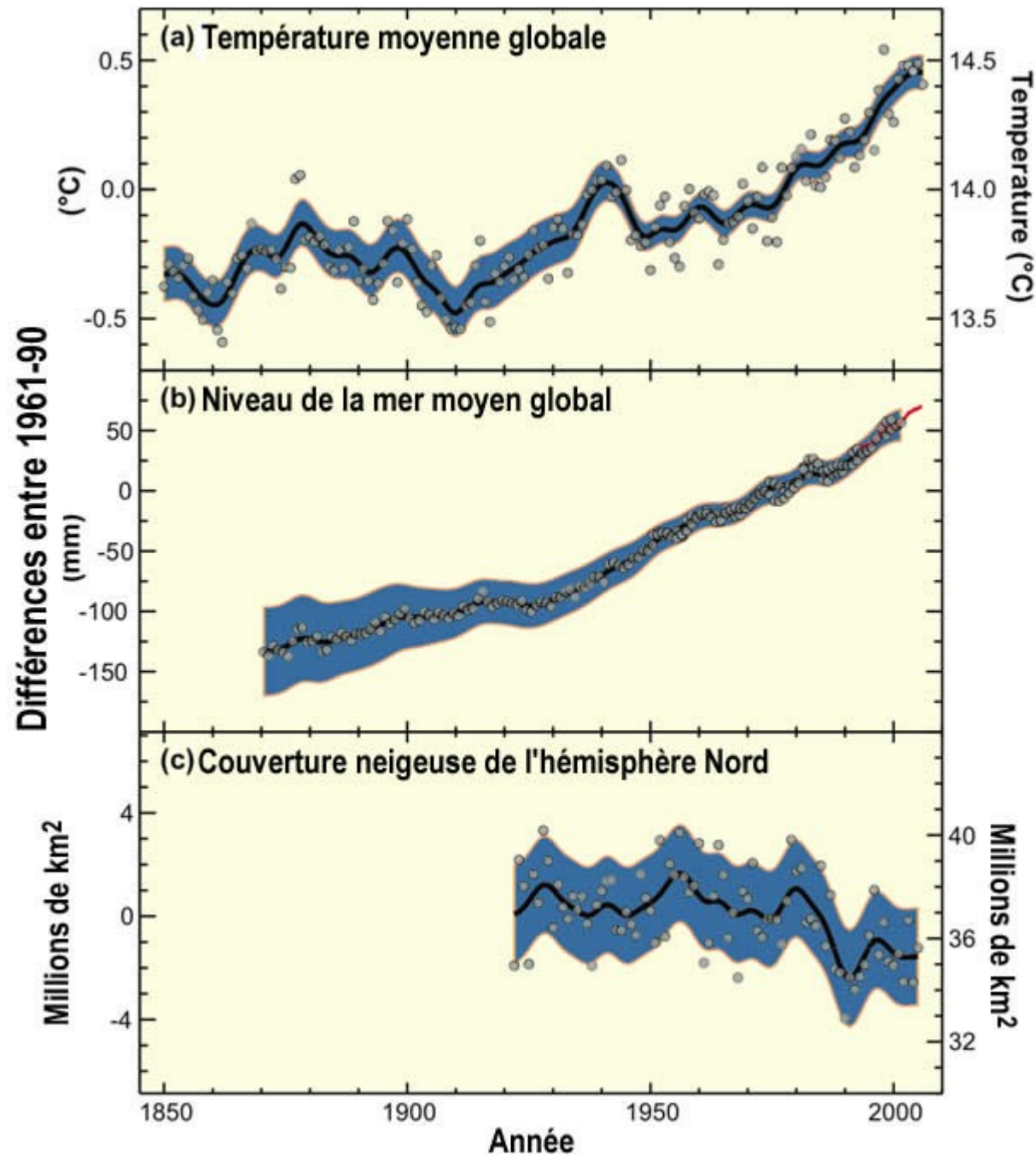
|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| •CO <sub>2</sub>            | 56% |
| •CFCs                       | 12% |
| •méthane (CH <sub>4</sub> ) | 16% |
| • ozone (O <sub>3</sub> )   | 11% |
| •N <sub>2</sub> O           | 5%  |



# Qu'elles sont les perturbations radiatives récentes?

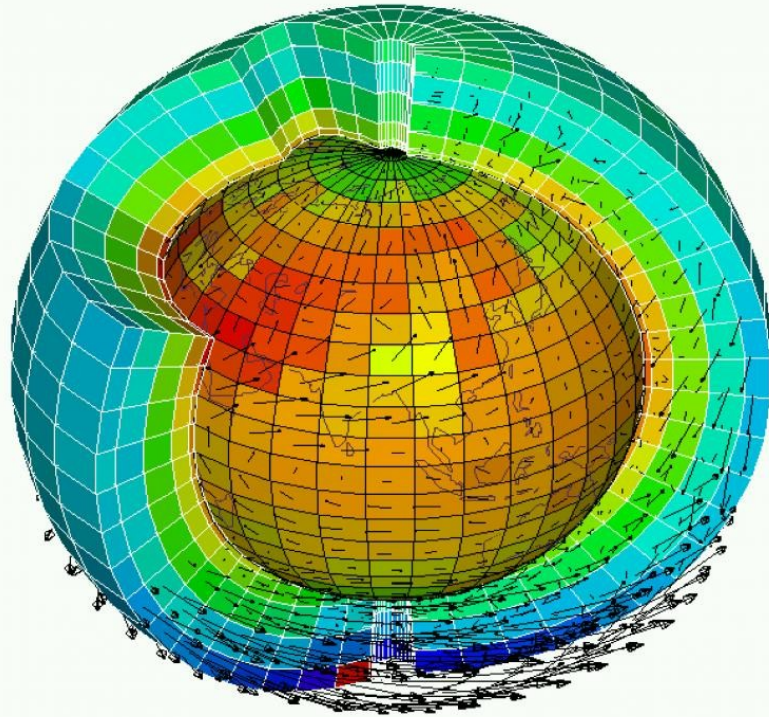


# Depuis un siècle, le climat se réchauffe et change.





# Comment le climat est-il modifiée par ces perturbations radiatives?



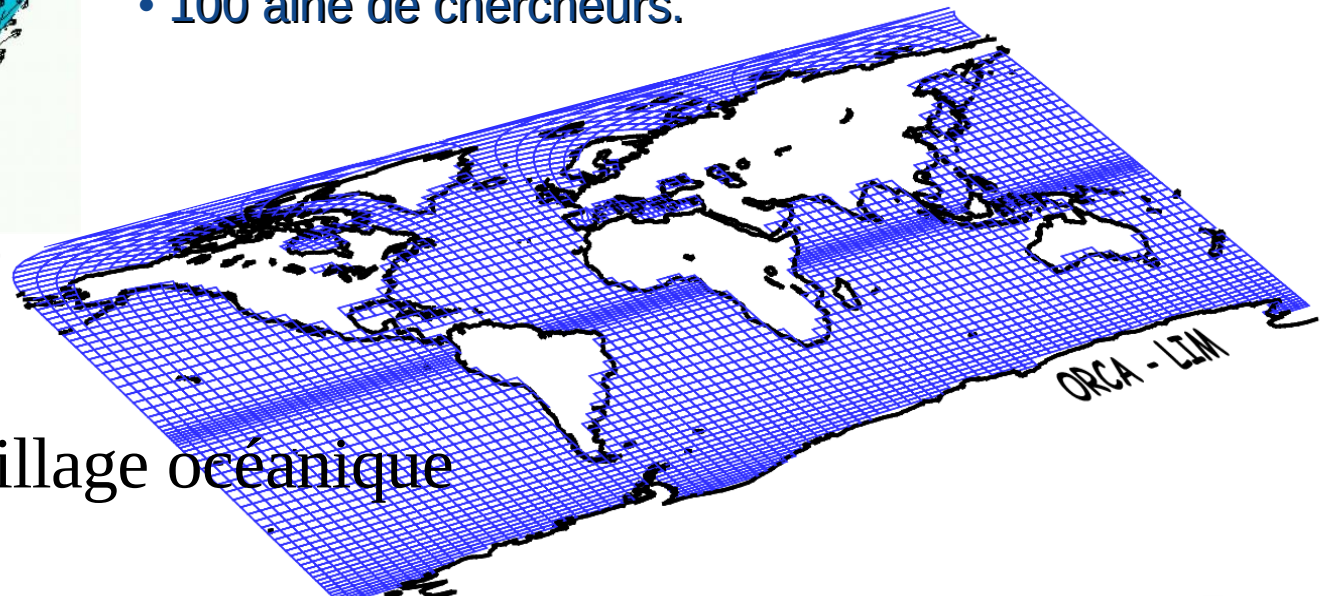
Maillage atmosphérique

## Modélisation numérique du climat :

- basée sur les équations de la physique
- mise en oeuvre sur un ordinateur (dimension finie)
- Importance des processus sous-maille (nuages, ...)

## Modèle de climat de l'IPSL :

- atmosphère, océan, cryosphère, biosphère
- 100 aine de chercheurs.



Maillage océanique

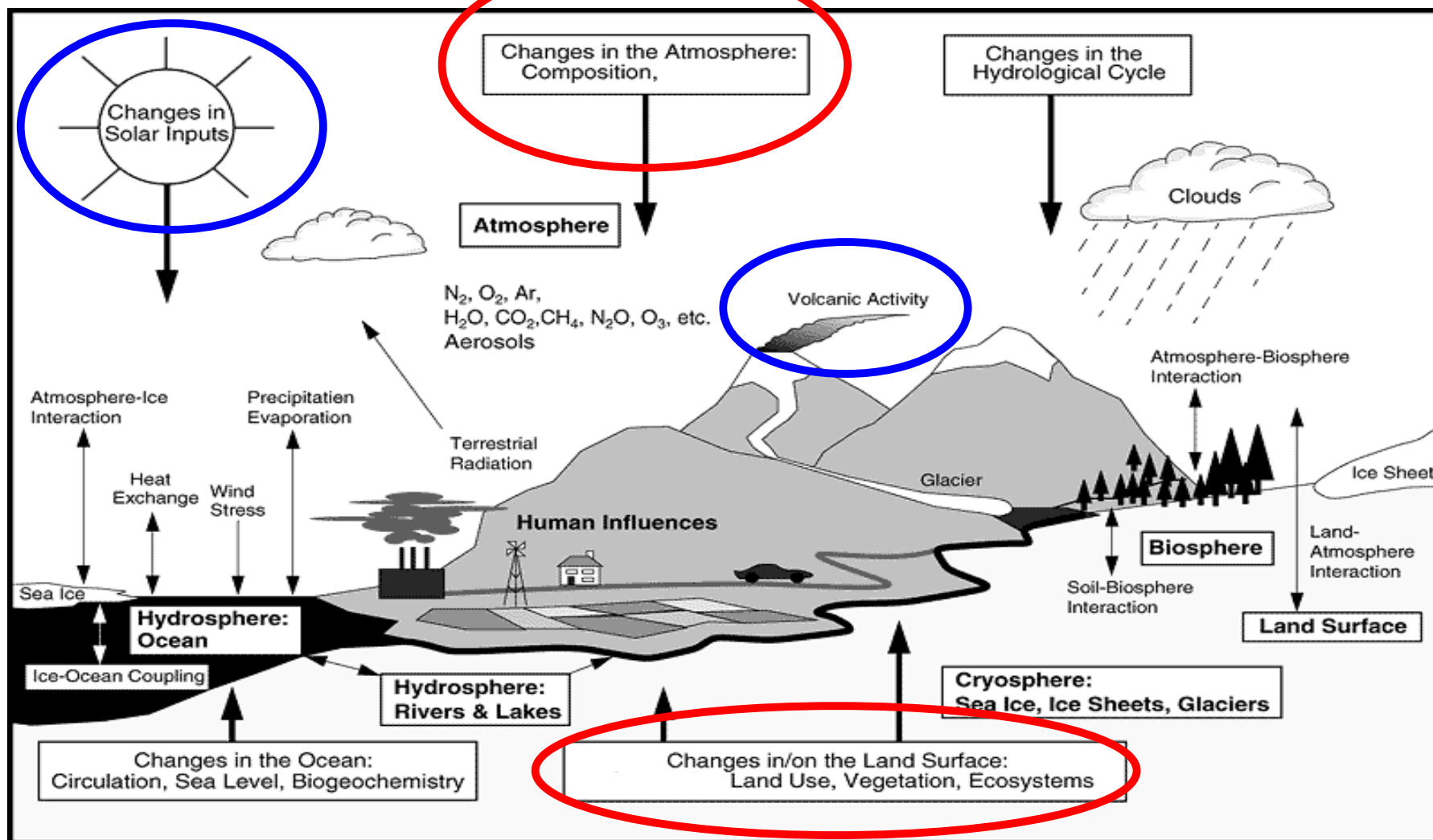
# Les perturbations du climat



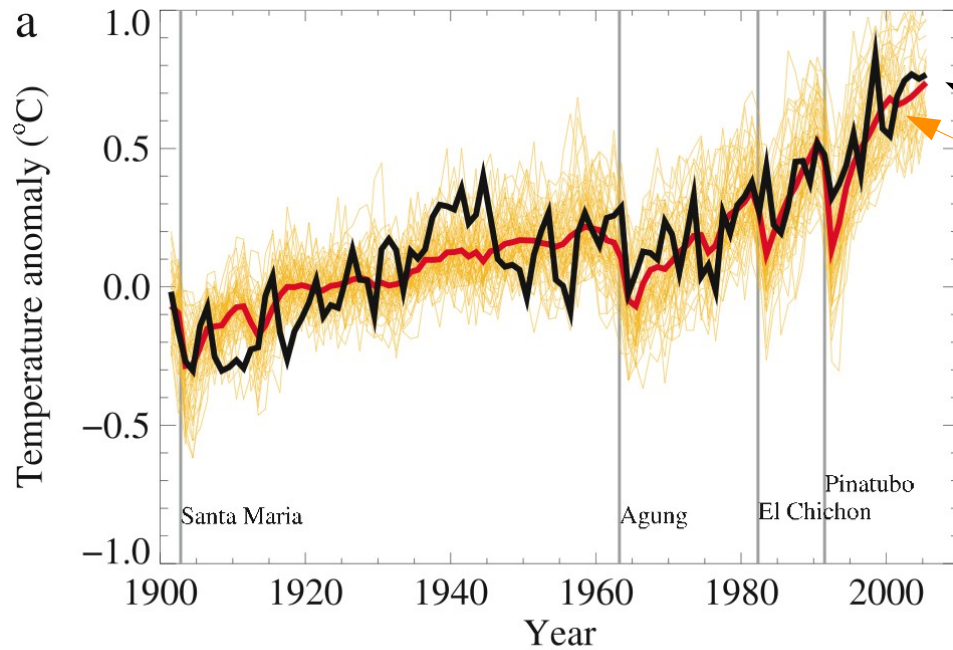
naturelles



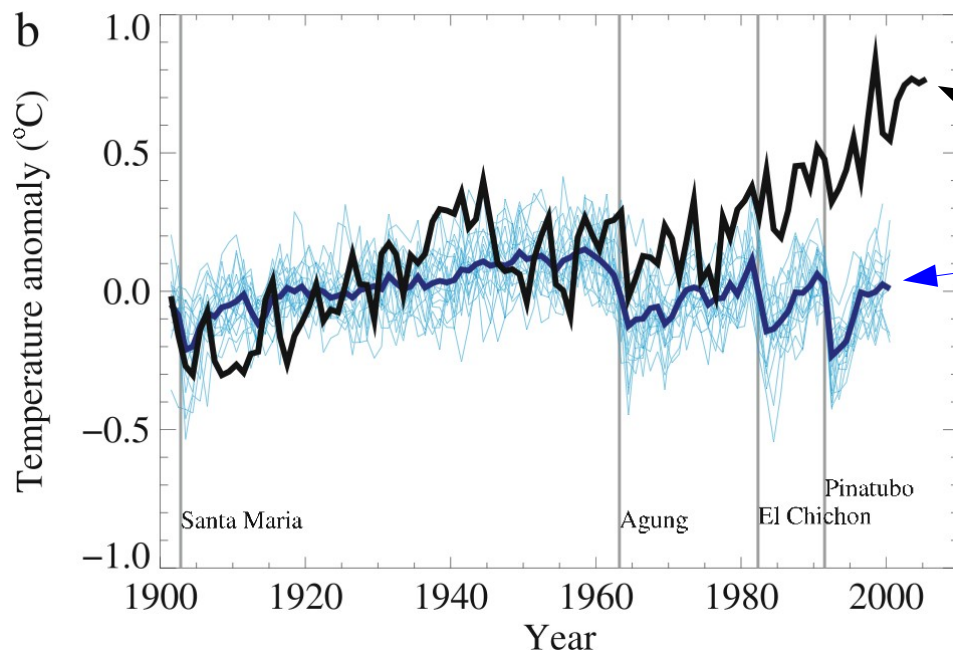
anthropiques



# L'homme a-t-il déjà changé le climat ?



Anomalie de température de la surface de la Terre **observée** et **calculée** en prenant en compte les **perturbations naturelles et les perturbations dues aux activités humaines** (accroissement observé de la quantité de **gaz à effet de serre et des aérosols**)



Anomalie de température de la surface de la Terre **observée** et **calculée** en prenant en compte **uniquement les perturbations naturelles** (éruptions volcaniques, activité solaire...)

# Les variations du climat sont-elles régulières?

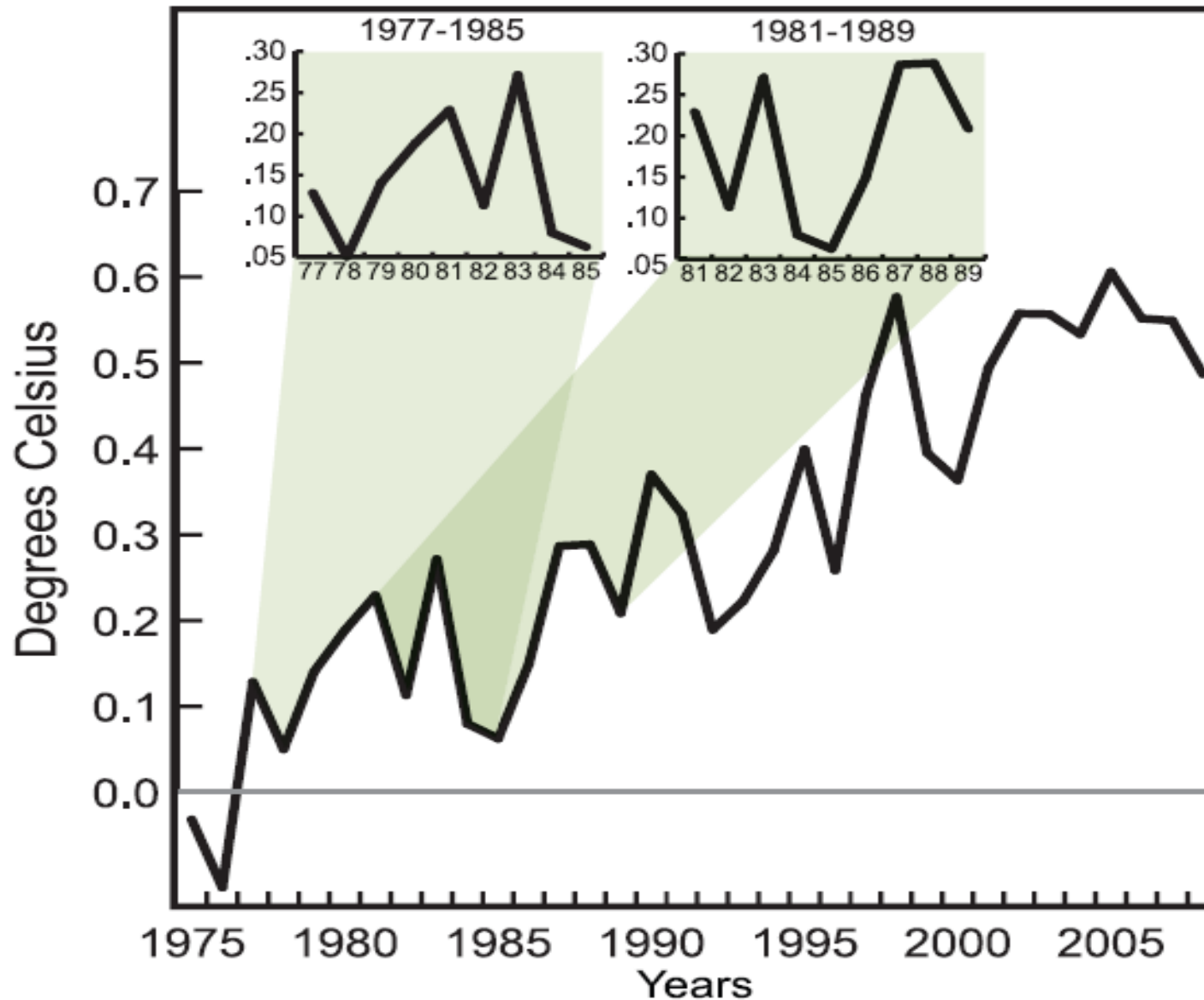
## Variations et variabilité du climat

- Le climat peut varier en réponse à des “forçages” (perturbations extérieures)
  - Forçages naturels
  - Forçages anthropiques
- Le climat varie, même sans perturbations extérieures (variabilité interne)

# Les variations du climat sont elle régulières?

## Variations et variabilité du climat

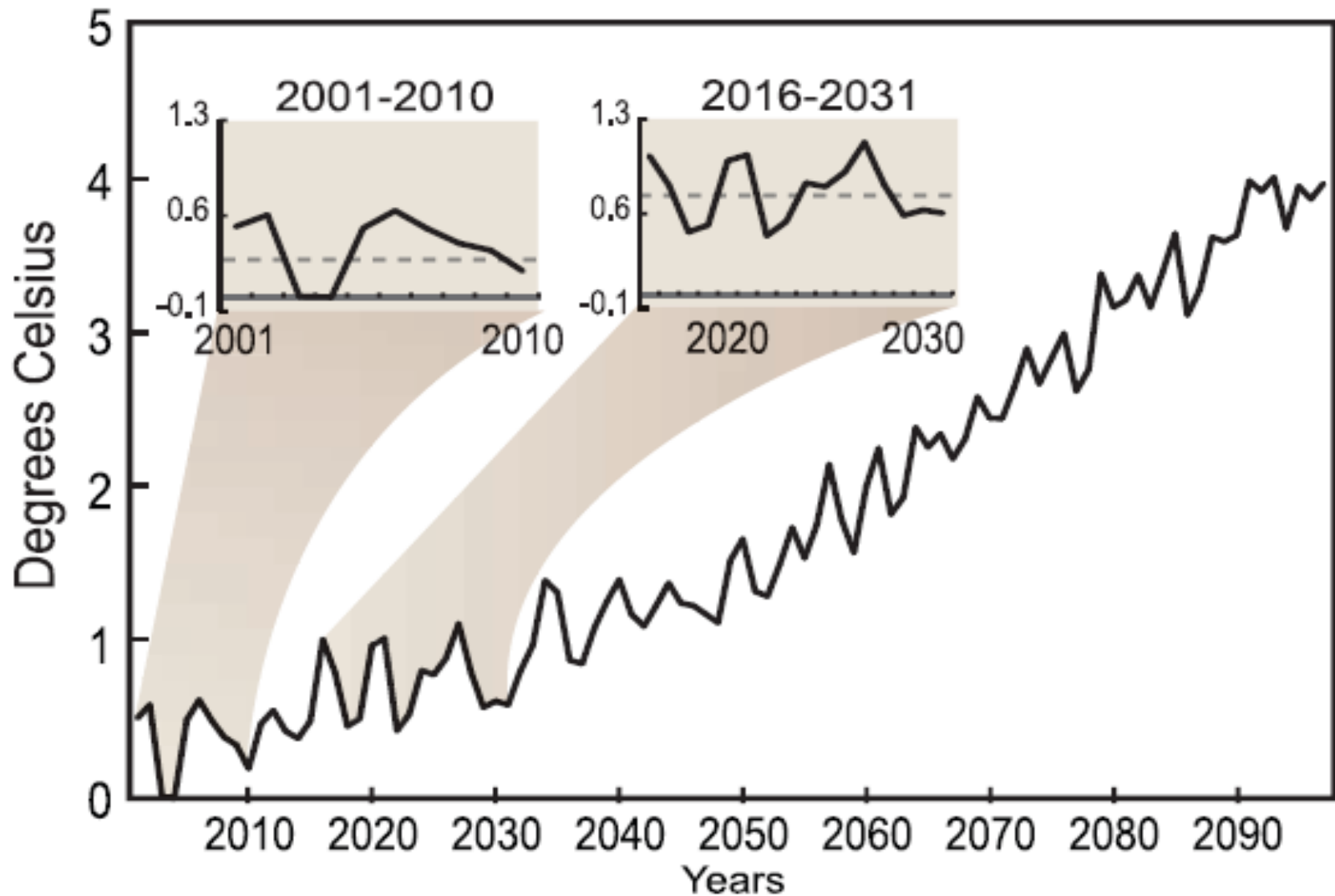
Observée



# Les variations du climat sont elle régulières?

## Variations et variabilité du climat

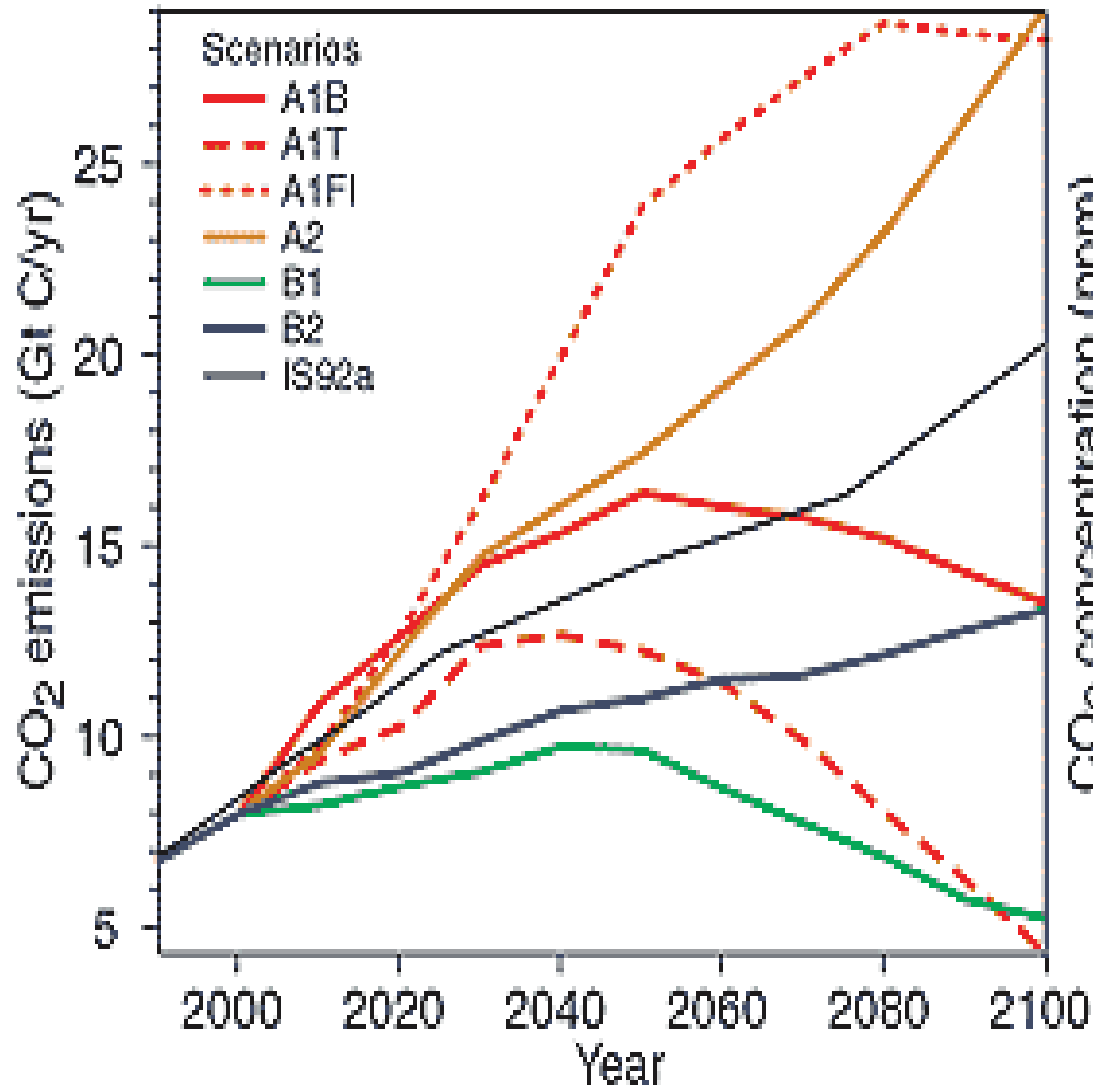
Simulée



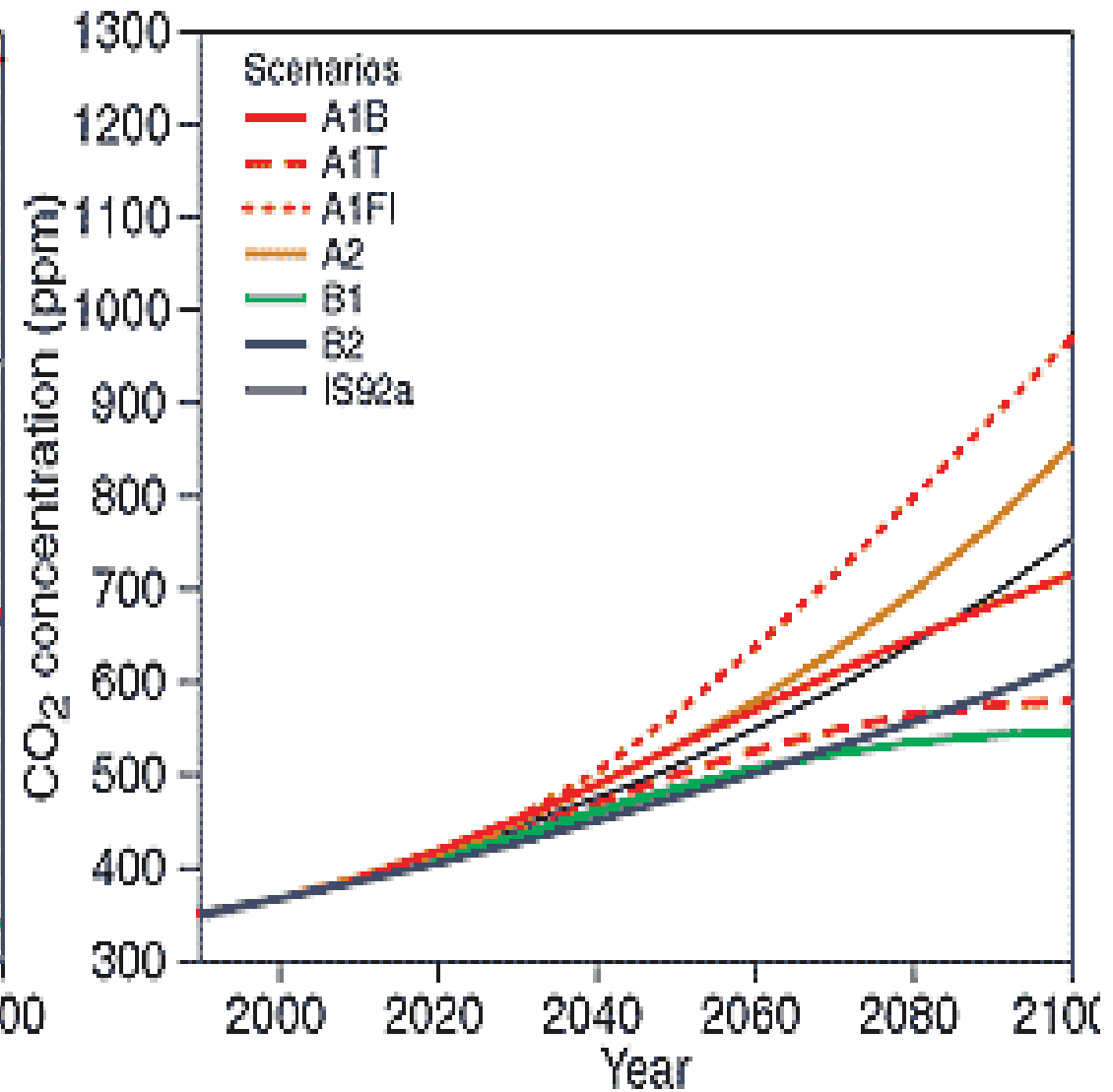
# Projections pour le futur

# Emissions et concentrations de CO<sub>2</sub>: utilisation de scénarios

(a) CO<sub>2</sub> emissions

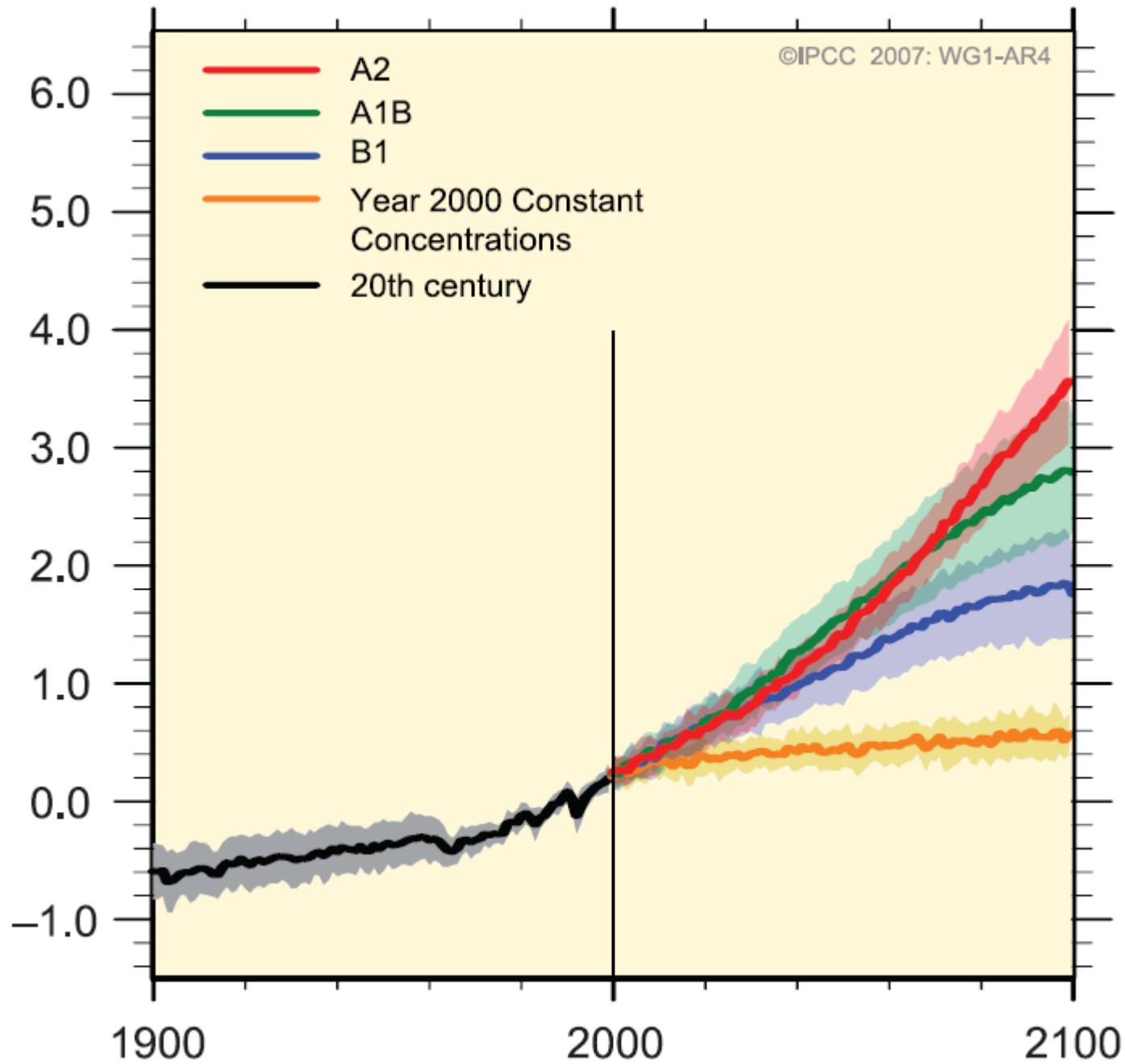


(b) CO<sub>2</sub> concentrations

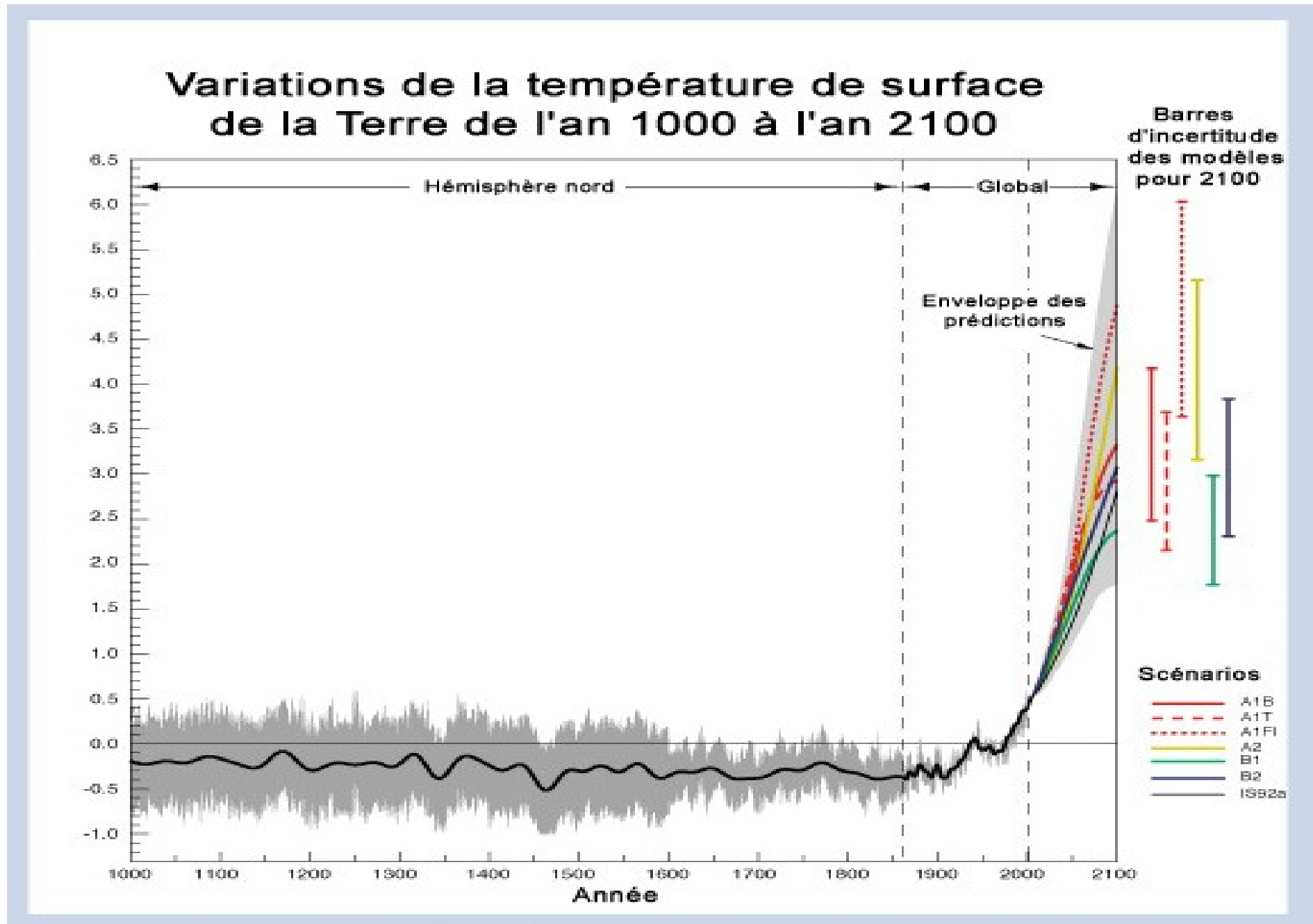




# Evolution récente et future de la température moyenne

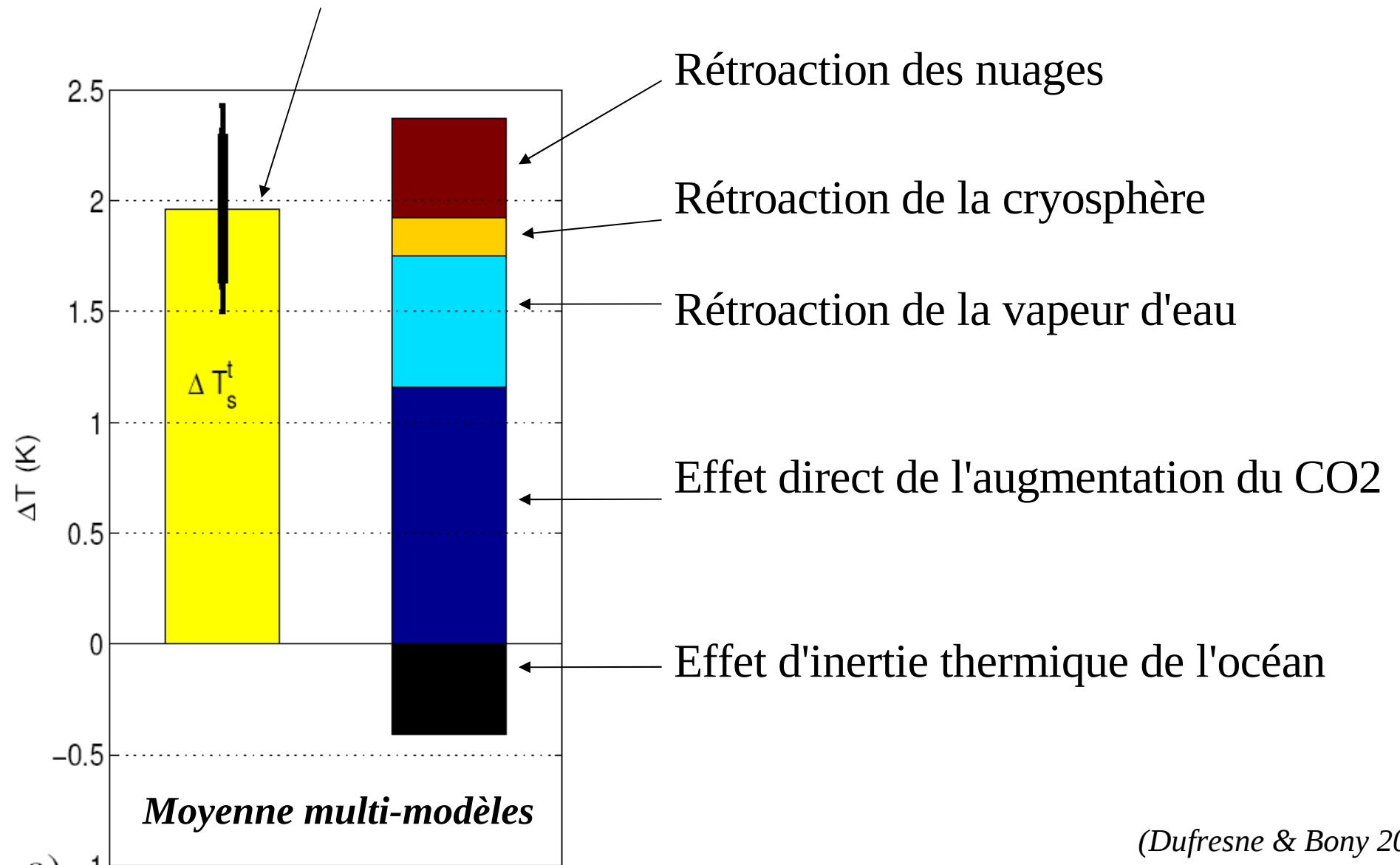


# Evolution de la température moyenne à l'échelle de 1000 ans



# Comment la température est modifiée par ces perturbations radiatives?

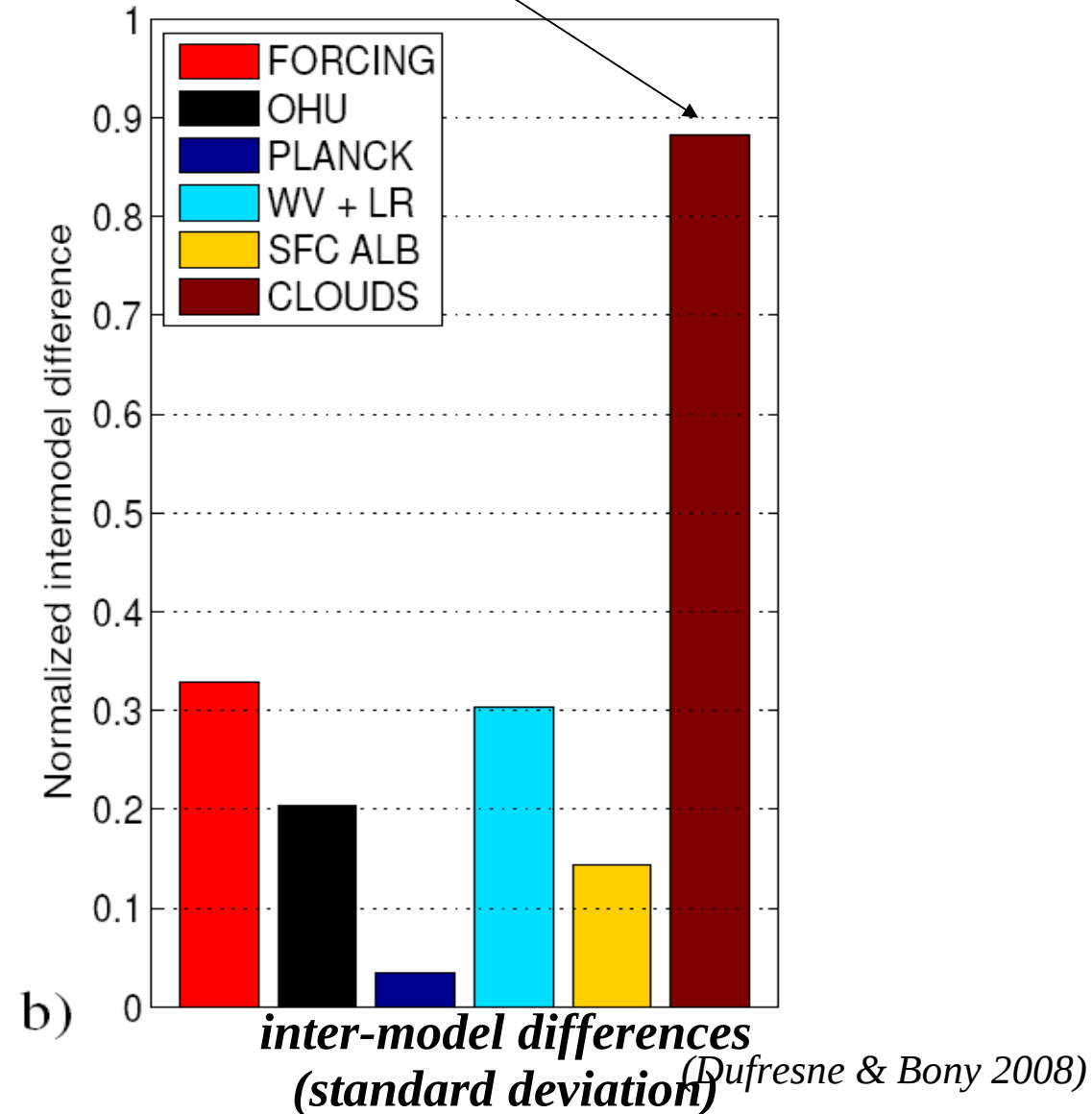
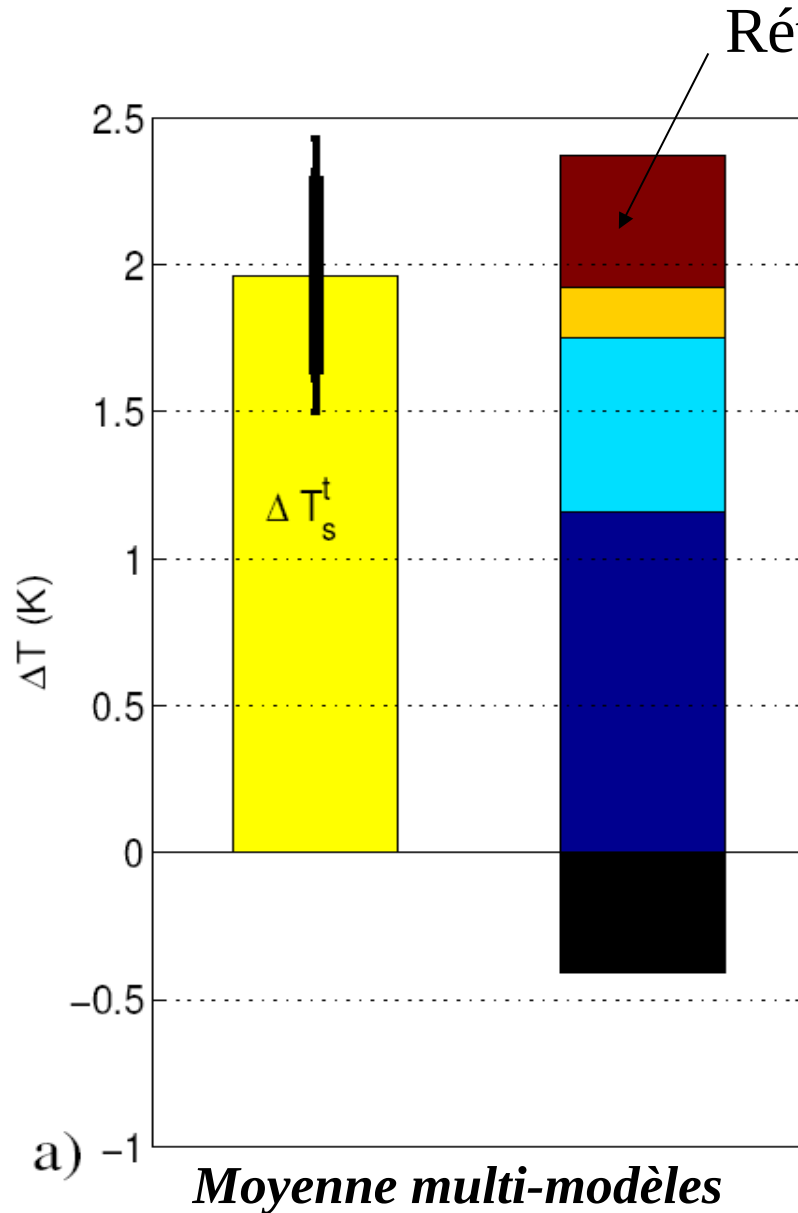
## Réchauffement global pour un doublement de CO2



# Importances des rétroactions

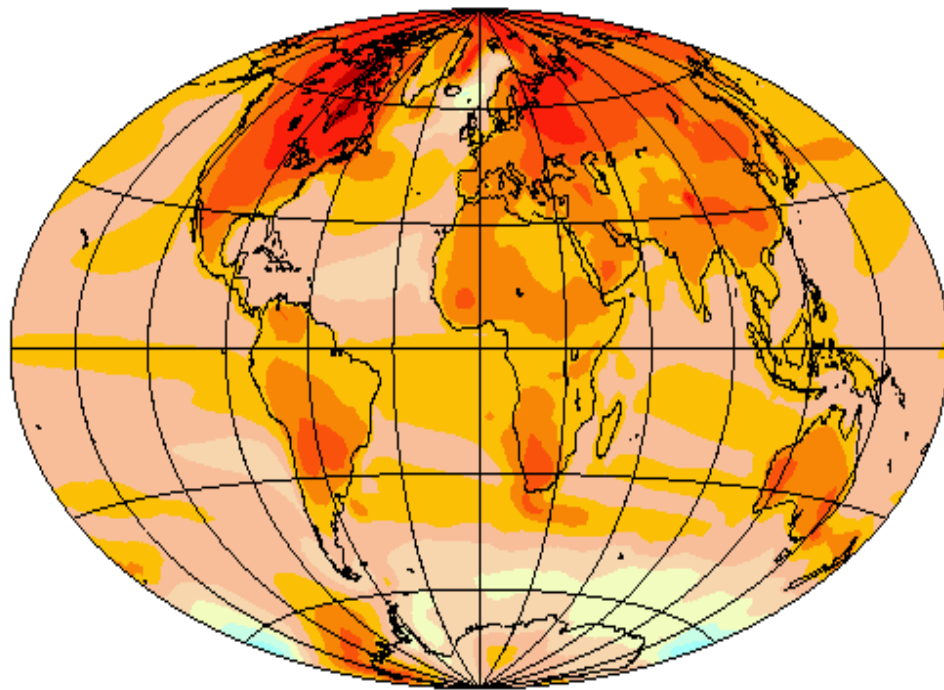
Moyenne des modèles

Dispersion entre les modèles

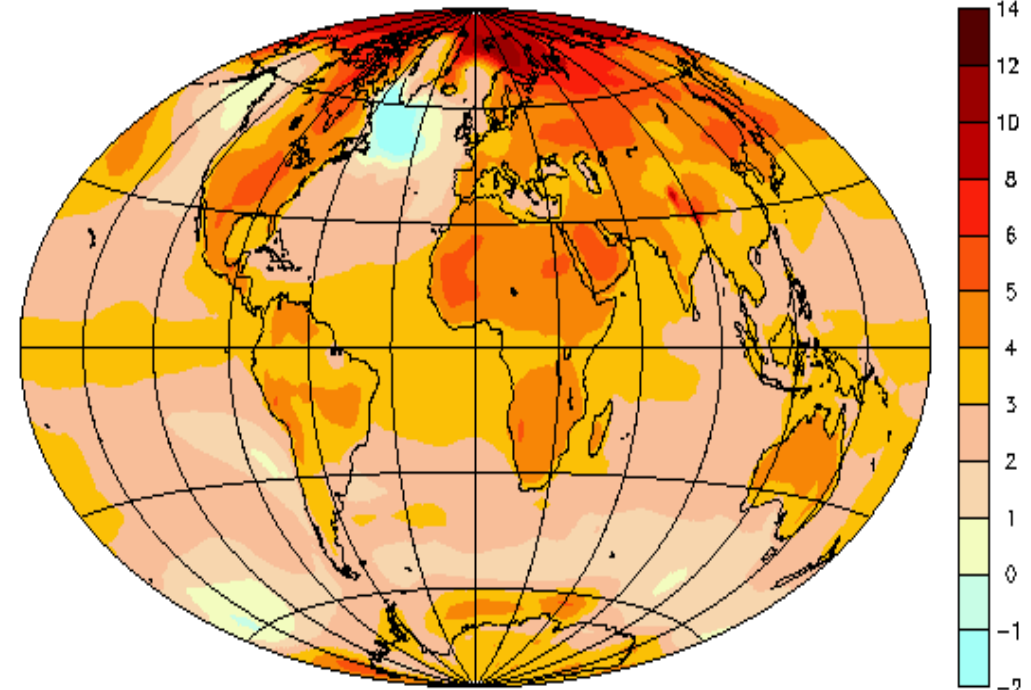


# Projection pour l'an 2100

## Changement des températures pour le scénario A2



IPCC / IPSL - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)

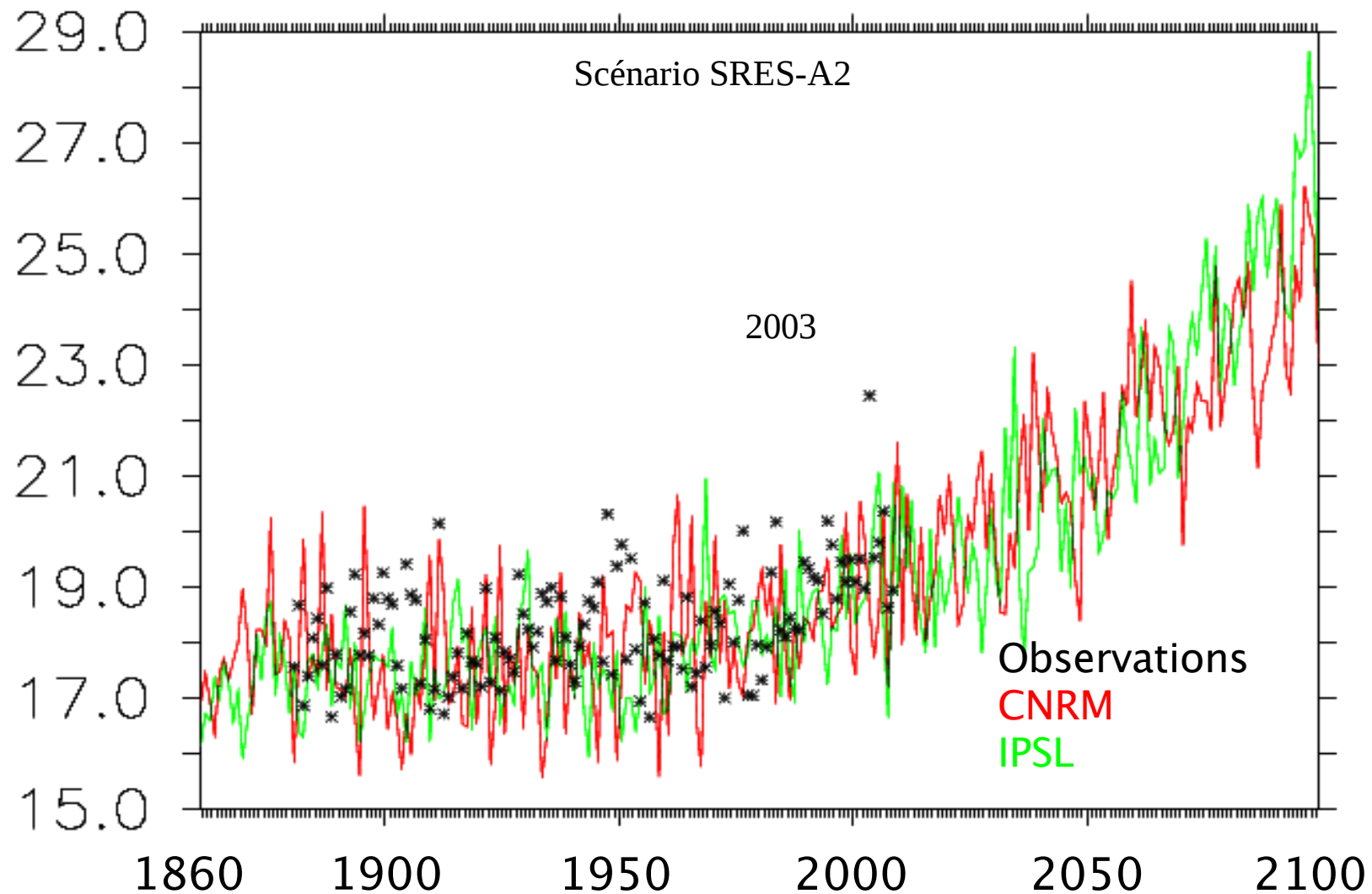


IPCC / CNRM - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)



# Que représentent ces changements de température?

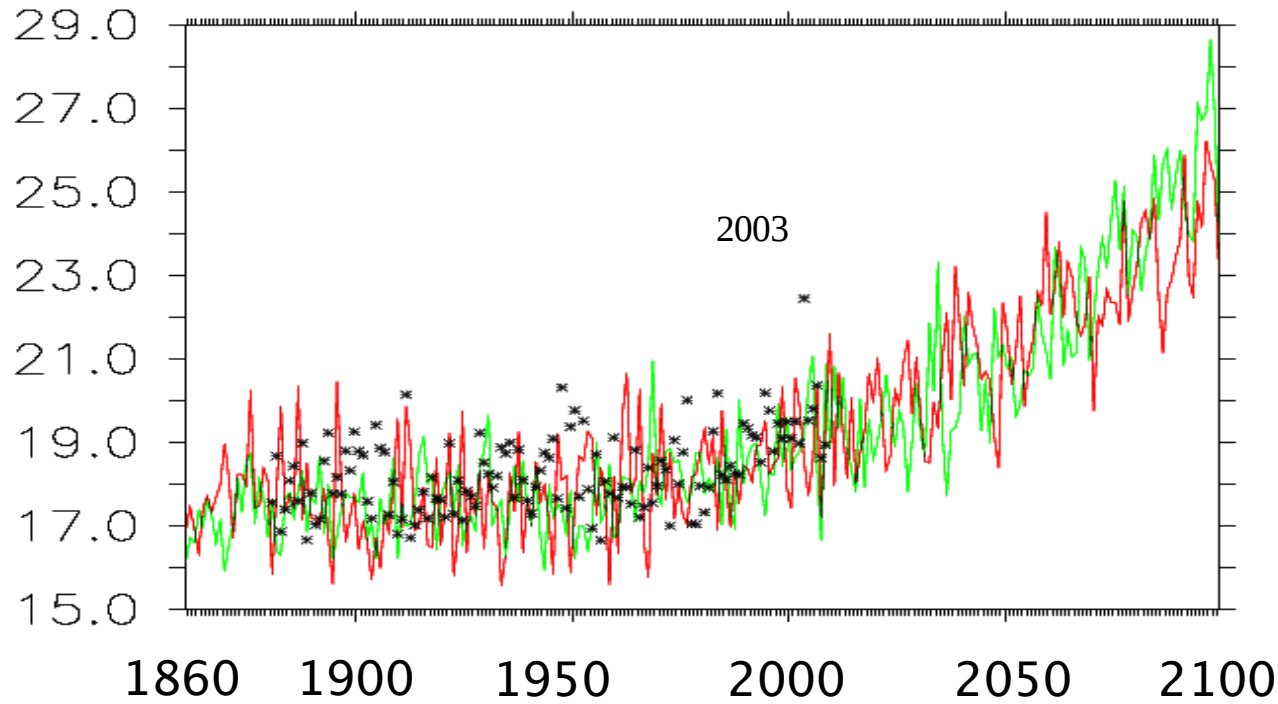
Évolution de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100



# Température estivale, moyennée sur la France, pour deux scénarios

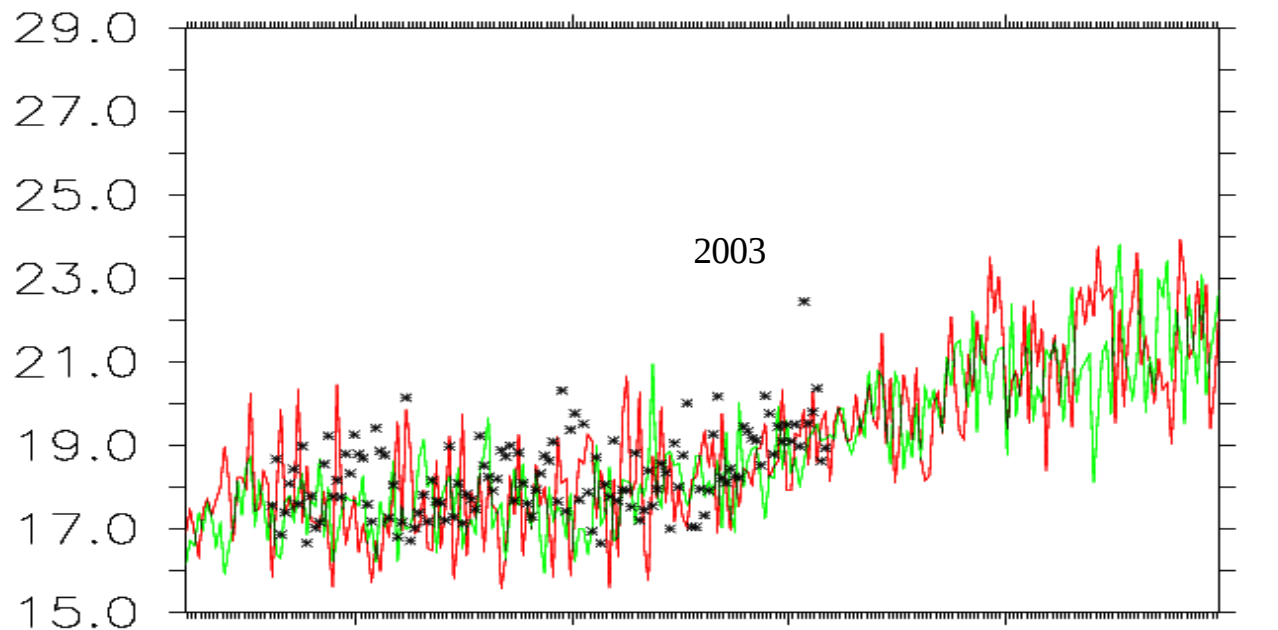
Émissions  
croissantes

SRES-A2



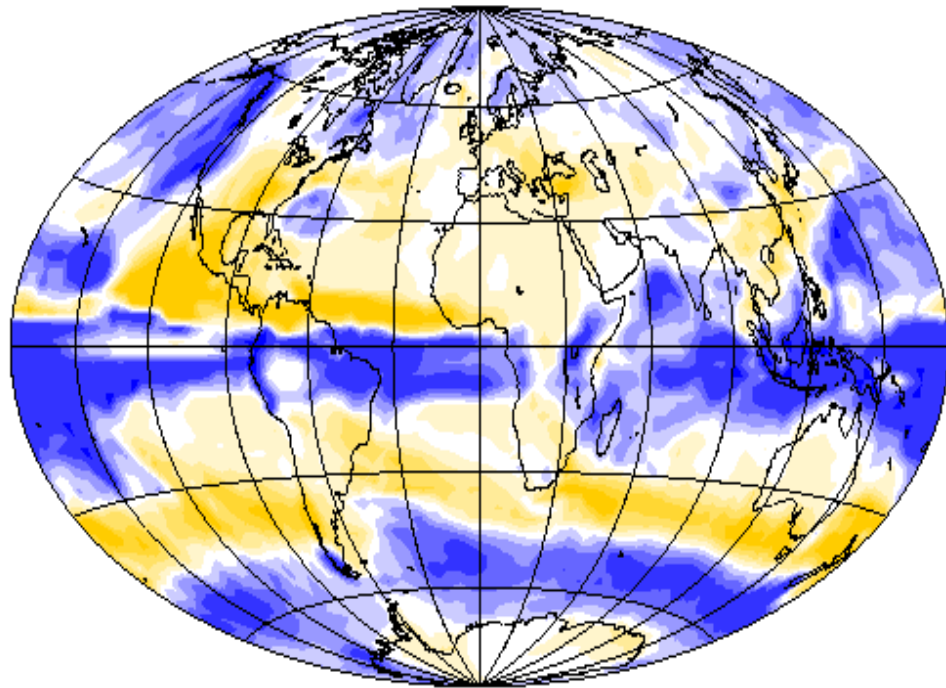
Émissions  
« stabilisées »

SRES-B1

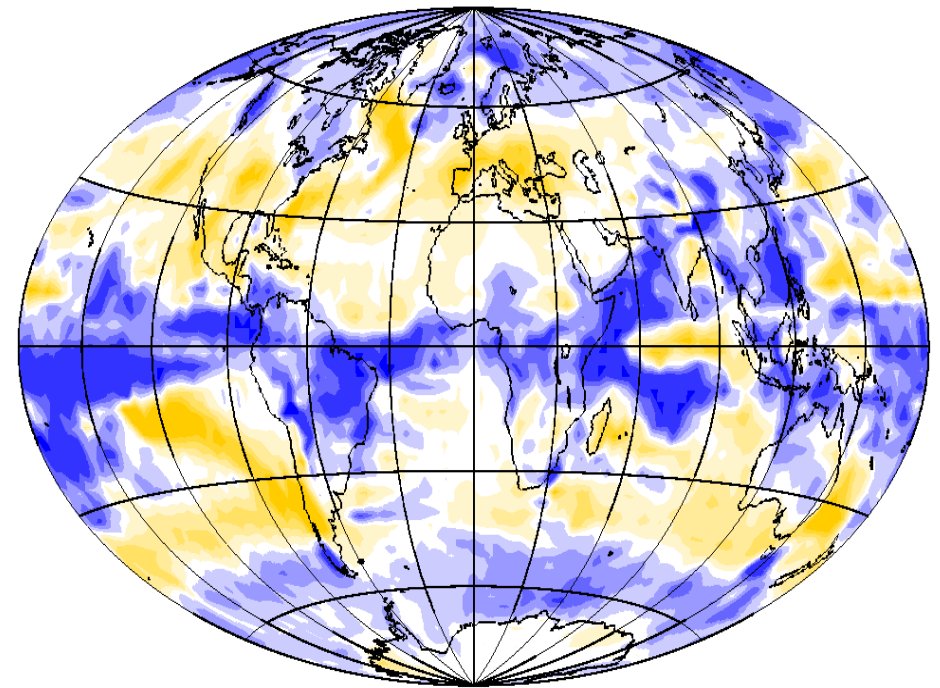


# Projection pour l'an 2100

## Changement de précipitations pour le scénario A2



IPCC / IPSL – SRESA2 scénario – Anomalies de la precipitation (mm/jour)  
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

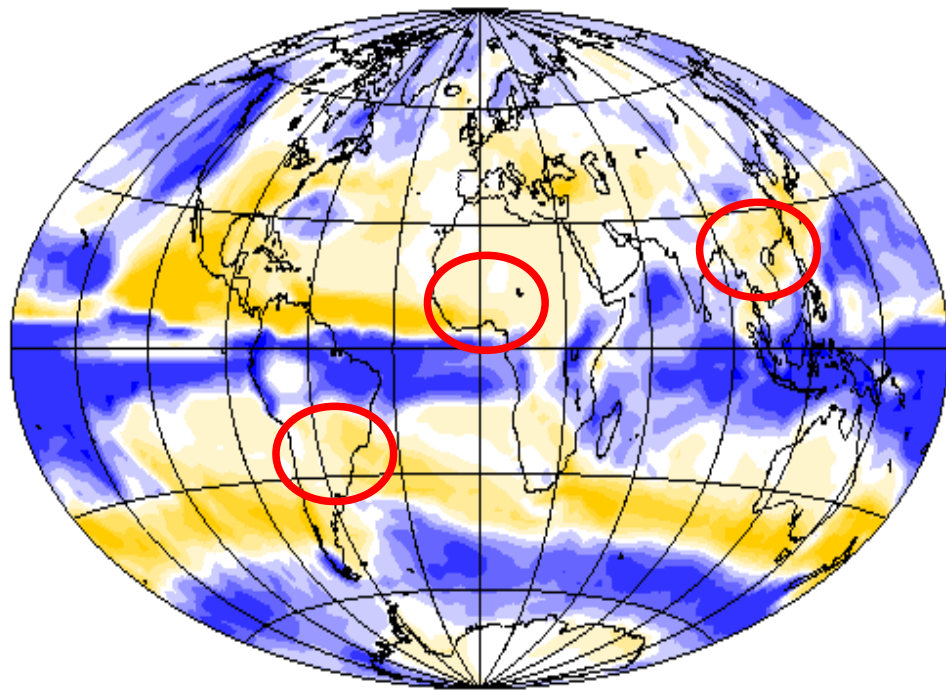


IPCC / CNRM – SRESA2 scénario – Anomalies de la precipitation (mm/jour)  
(2090–2099) comparee a (2000–2009)

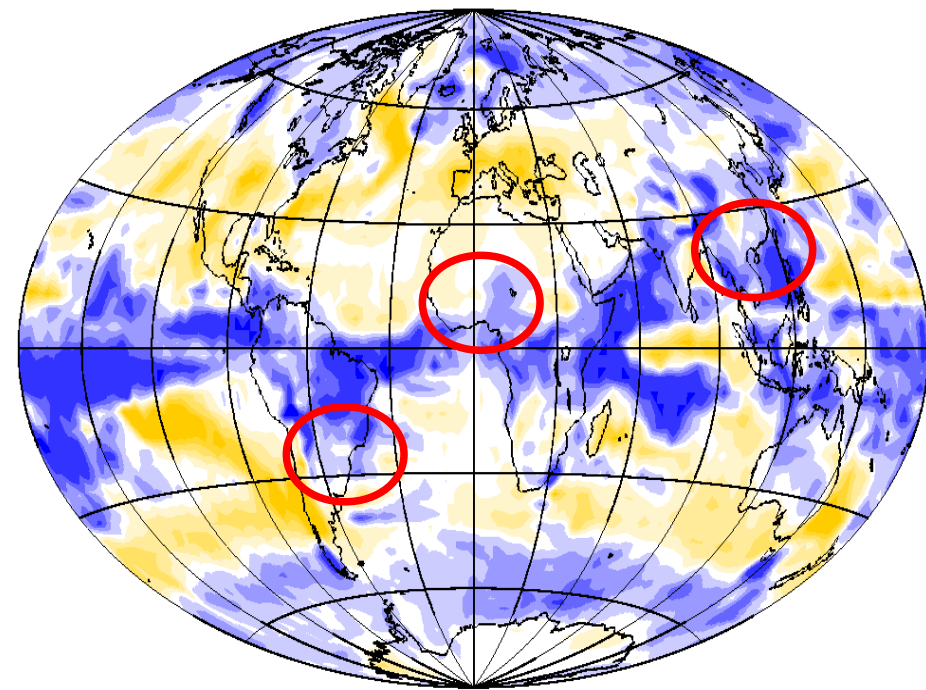


# Projection pour l'an 2100

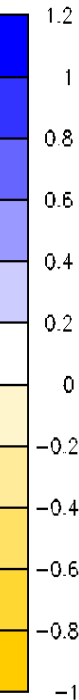
## Changement de précipitations pour le scénario A2



IPCC / IPSL – SRESA2 scénario – Anomalies de la precipitation (mm/jour)  
(2090–2099) comparee a (2000–2009)



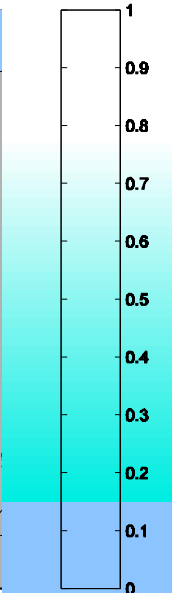
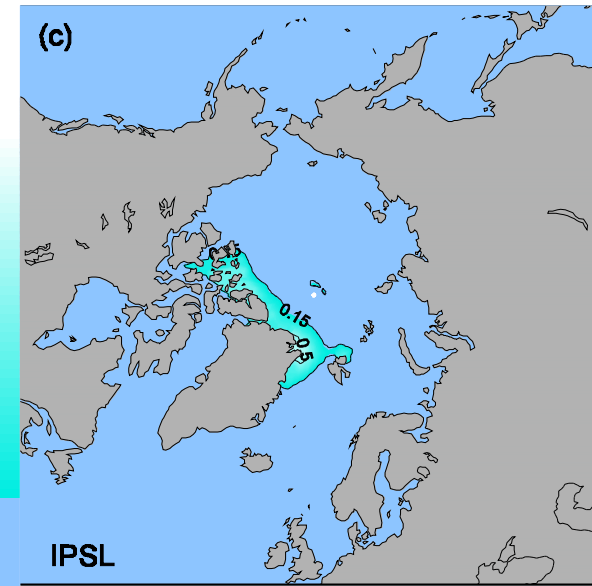
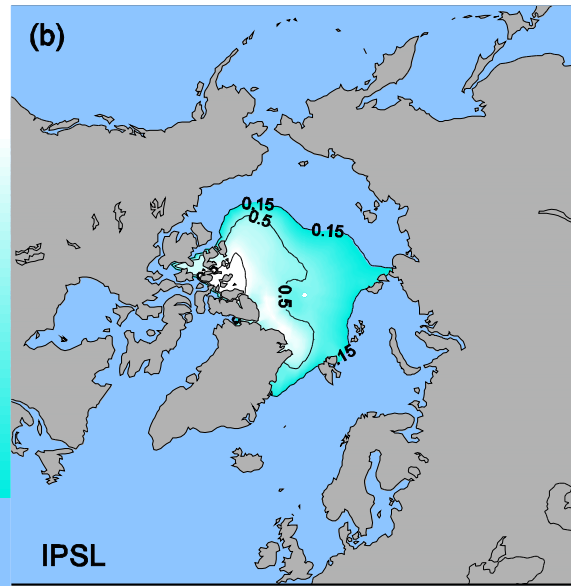
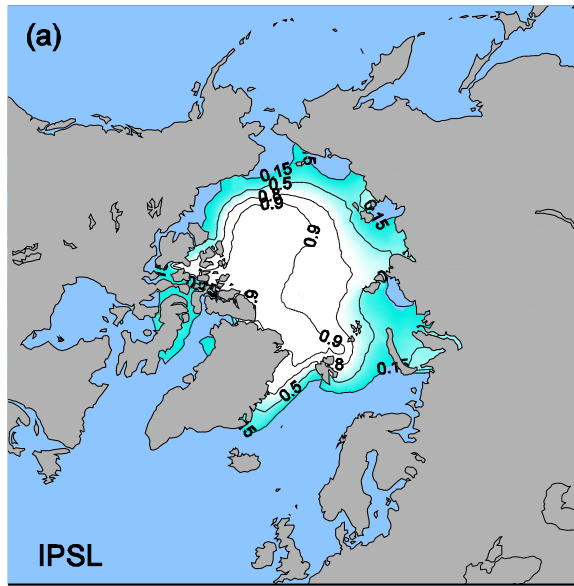
IPCC / CNRM – SRESA2 scénario – Anomalies de la precipitation (mm/jour)  
(2090–2099) comparee a (2000–2009)



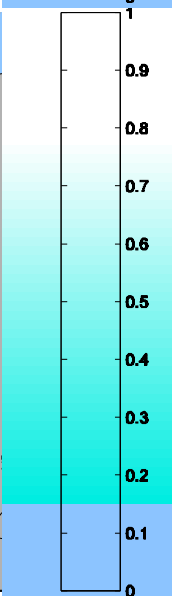
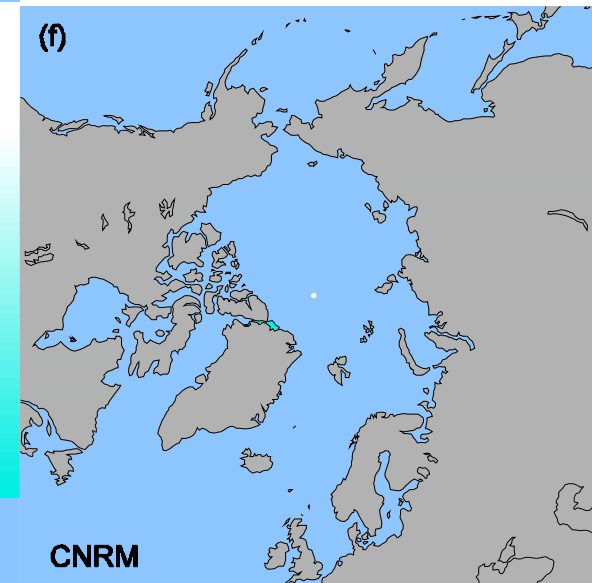
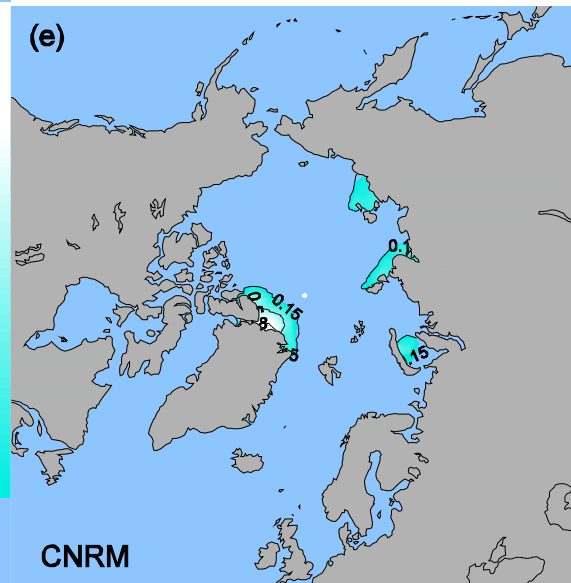
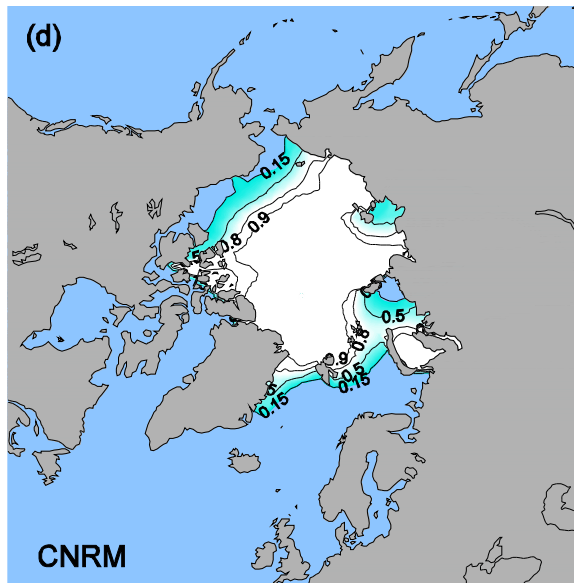
# Extension minimale de la glace de mer (été)

# Climat 21<sup>e</sup>

IPSL



CNRM



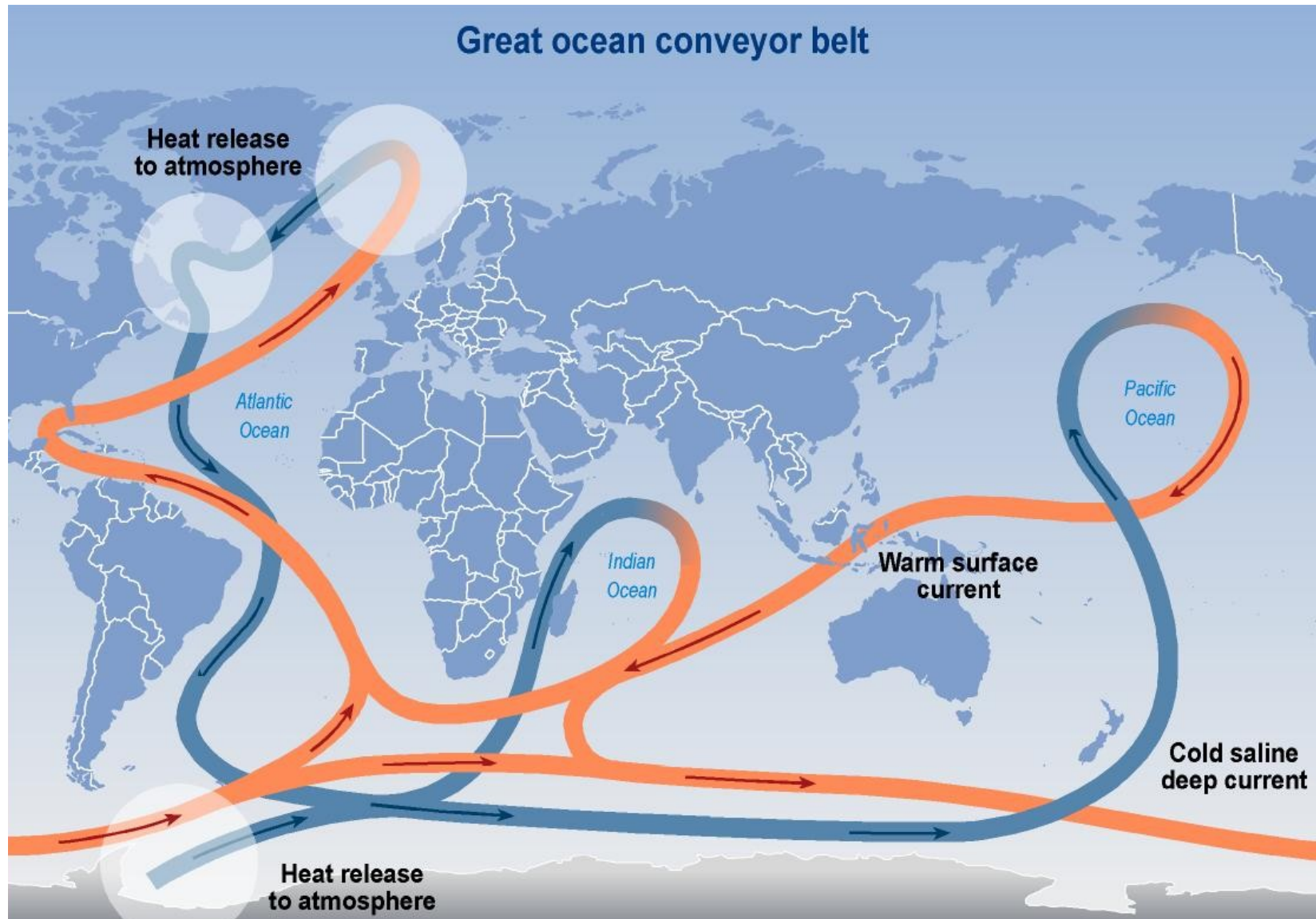
1960-1989

2070-2099; B1

2070-2099; A2

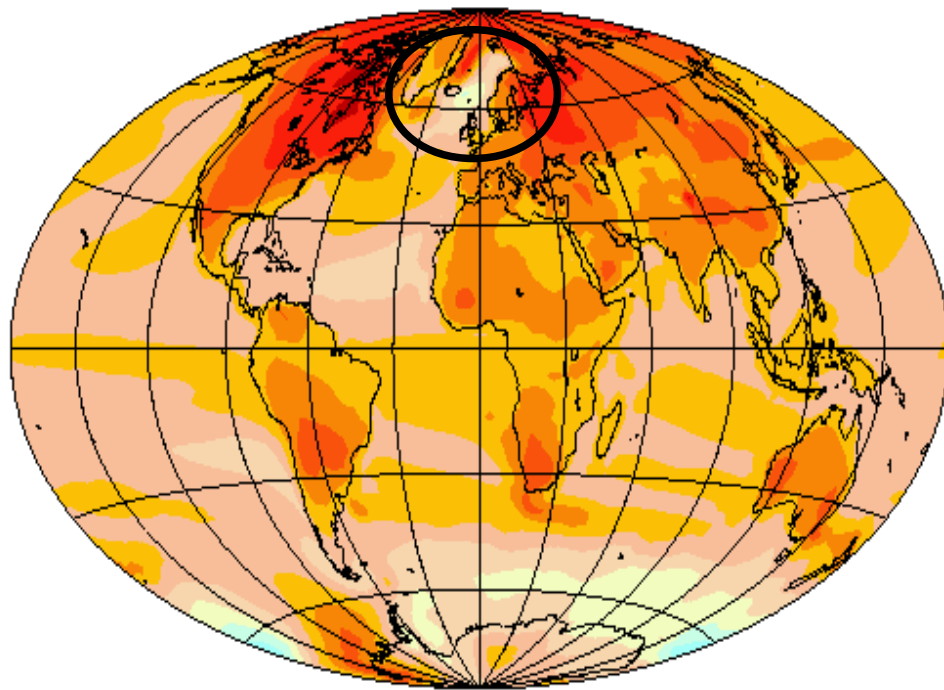
[Dufresne et al., 2006]

# Changement de la circulation de l'océan profond?

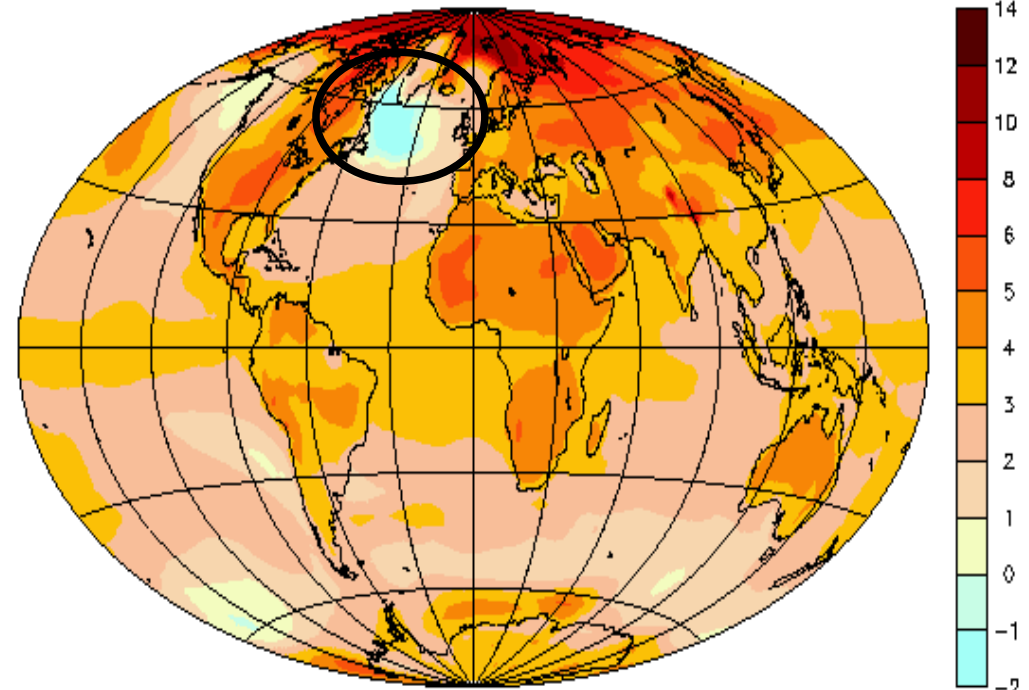


# Projection pour l'an 2100

## Changement des températures pour le scénario A2



IPCC / IPSL - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)



IPCC / CNRM - SRESA2 scenario - Anomalies de la temperature (deg C)  
(2090-2099) comparee a (2000-2009)

# Conclusions

- L'effet de serre est un phénomène physique bien compris
- Le climat va changer de façon importante si les émissions de CO<sub>2</sub> et des autres gaz à effet de serre ne sont pas réduites
- La distribution géographique du changement de température est assez bien connue
- Ceci n'est pas le cas pour les précipitations
- Le stress hydrique des plantes va augmenter (accroissement de l'évaporation)
- Le cycle saisonnier de l'eau disponible va changer
- Le niveau de la mer va augmenter
- Cyclones? Tempêtes? Orages ?
- L'océan et la végétation continueront-ils à capter la moitié du CO<sub>2</sub> émis par l'homme?

A dramatic seascape with a dark, stormy sky and a bright, low horizon line. The sky is filled with heavy, dark clouds, with a bright, low horizon line. The water is dark and calm, reflecting the light from the horizon. The overall mood is somber and atmospheric.

***Merci de  
votre  
attention***