

# ***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/MNHN2018/modeles-climat.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jyg/MNHN2018/modeles-climat.pdf)**

# Naissance de la physique du climat

*Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaire*, J. Fourier, 1824



**Joseph Fourier**  
(1768-1830)

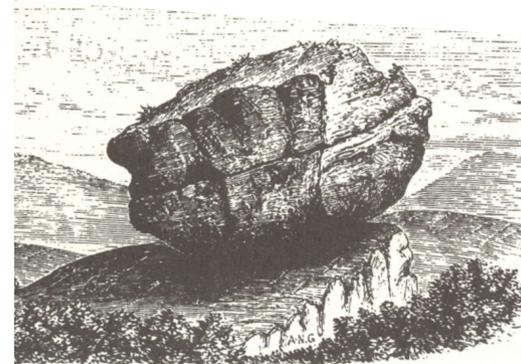
- **La température en un lieu donné** est régie par des phénomènes locaux mais aussi par des **phénomènes globaux**, valable en tous points du globe, **dont il est possible de chercher les lois.**
- Le **bilan d'énergie** pilote la température de surface de la Terre
- Les principaux modes de transferts d'énergie sont le rayonnement solaire, infra-rouge, et la conduction avec le centre de la Terre (négligeable)
- Hypothèse de « **l'effet de serre** » (« *boite chaude* »)
- **La Terre est une planète** comme les autres
- Il pressent l'importance de **changements d'ensoleillement**
- Il envisage néanmoins que le **climat puisse changer du fait des activités humaines**

# La découverte des variations passées

## Hypothèse des périodes glaciaires (1840-1860)



Jean de  
Charpentier



Blocs erratiques



Louis Agassiz

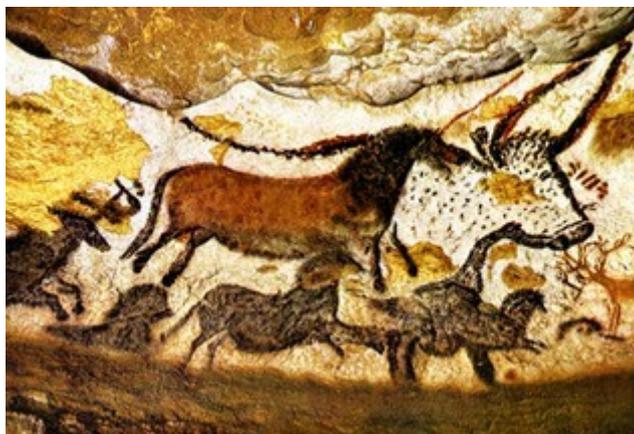


# La découverte des périodes glaciaires

Une période documentée par des peintures



Cosquer



Lascaux



Chauvet

Origine de ces variations : soleil ou CO<sub>2</sub> (1860-1900) ?



James Croll

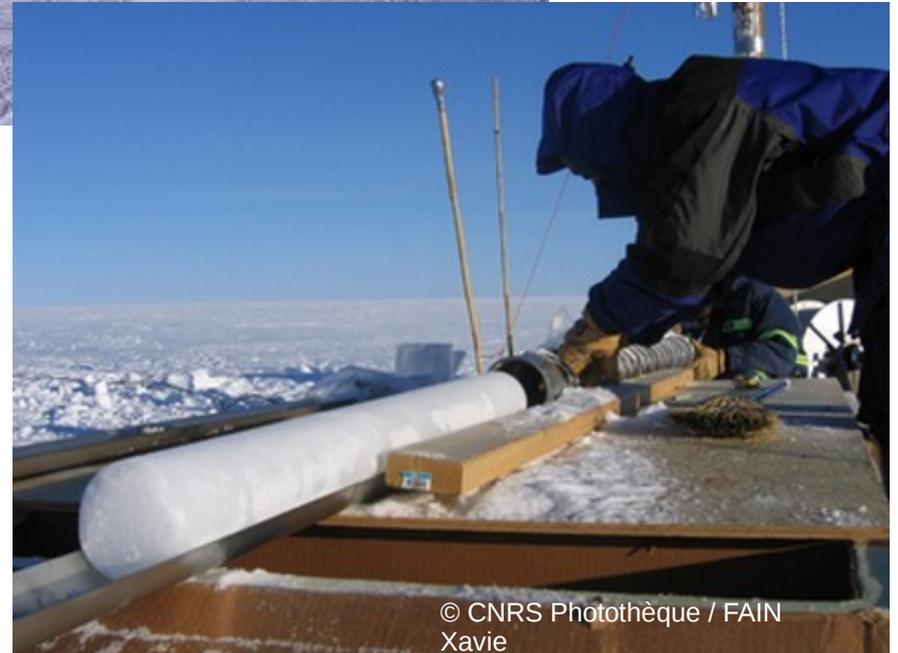


Svante Arrhenius

# La découverte des périodes glaciaires



Carottages de glace en  
Antarctique et au Groenland



# Plan

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

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
  - Principes de l'effet de serre
  - Température d'équilibre d'une planète
  - Calcul de 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

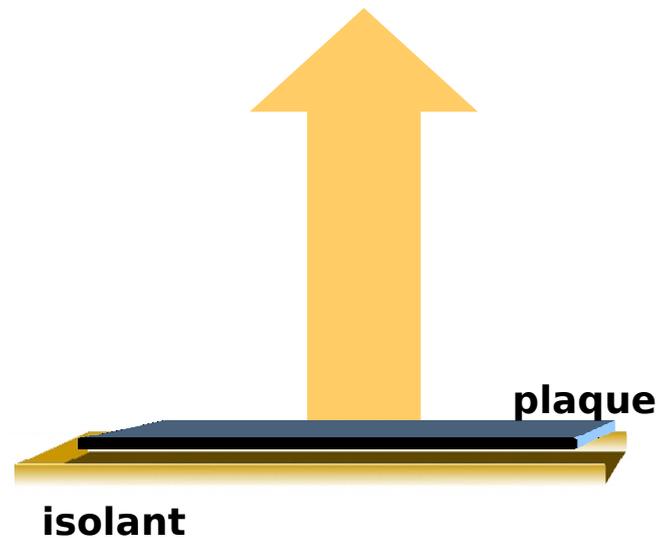
3) L'équilibre énergétique

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

5) L'effet de serre

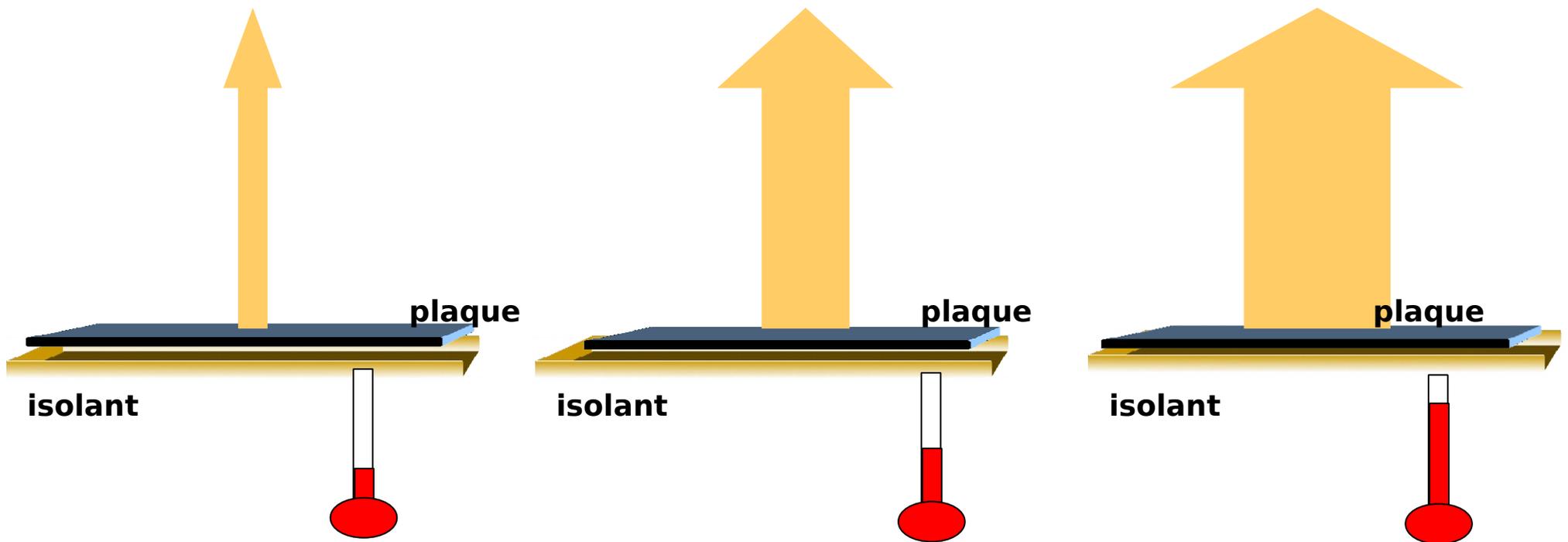
6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?

# 1) L'émission de rayonnement



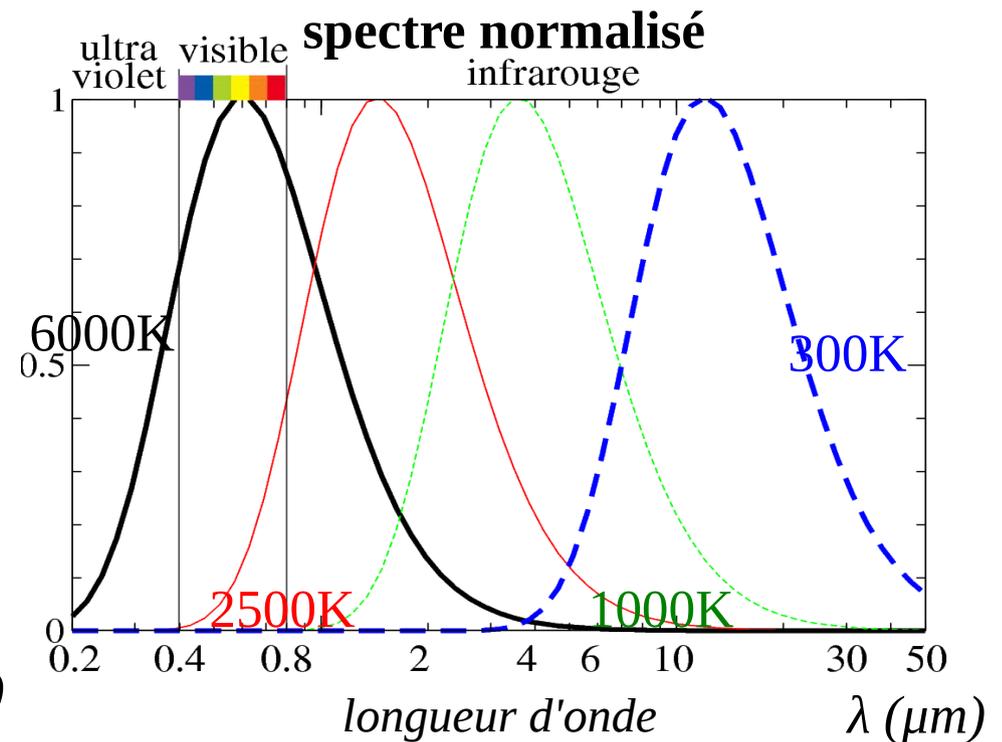
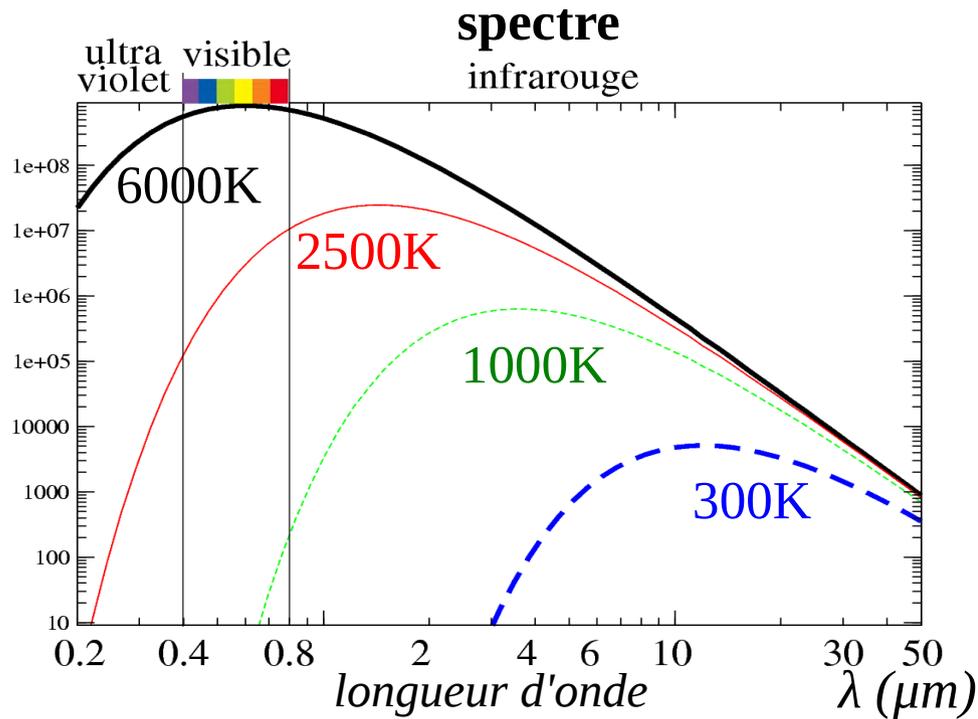
*a) Tout corps (ici une plaque posée sur un isolant thermique) émet du rayonnement et ainsi perd de l'énergie*

# 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 inférieure à  $700^{\circ}\text{C}$ , notre œil ne voit pas le rayonnement émis par l'objet :

C'est le rayonnement infrarouge

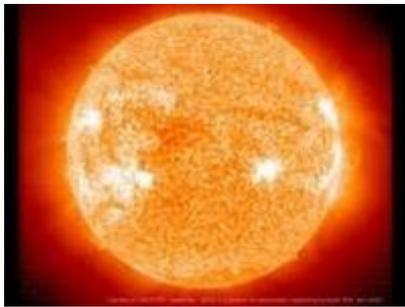
## 2) Rayonnement visible et rayonnement infrarouge

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

C'est le rayonnement visible



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

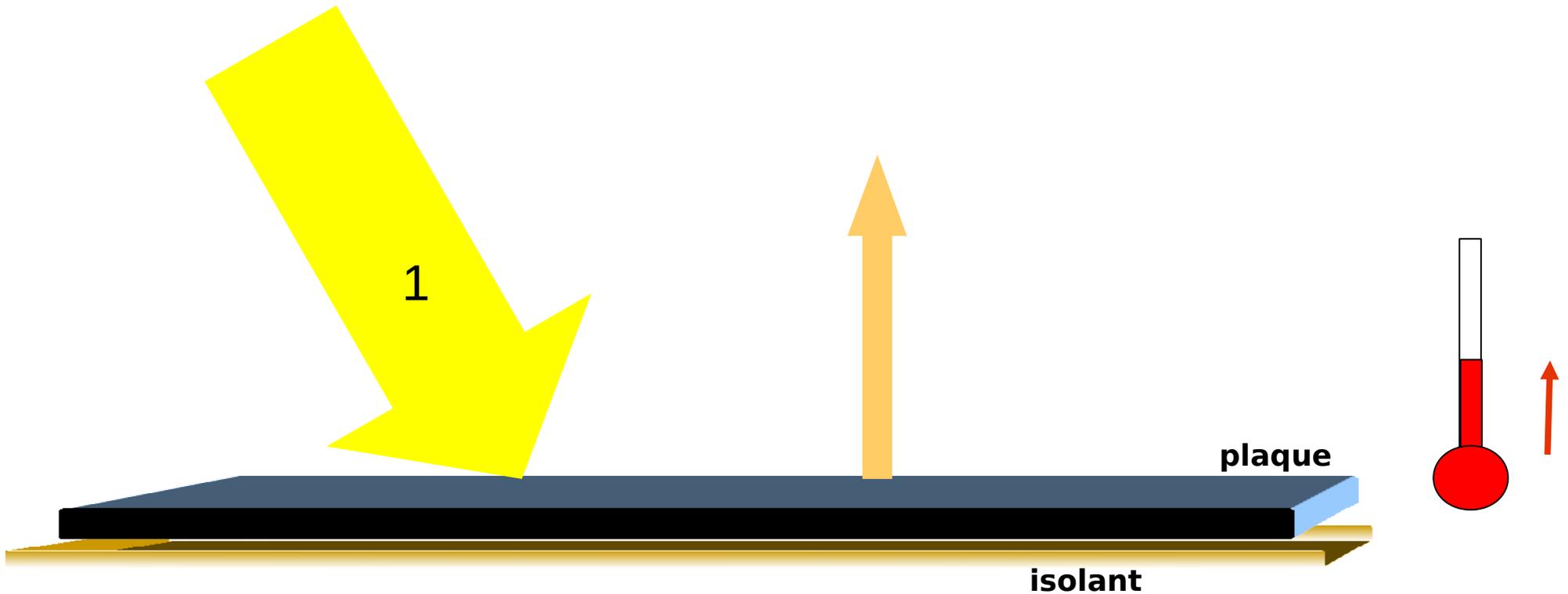


Soleil :  $T=6000\text{ K}$



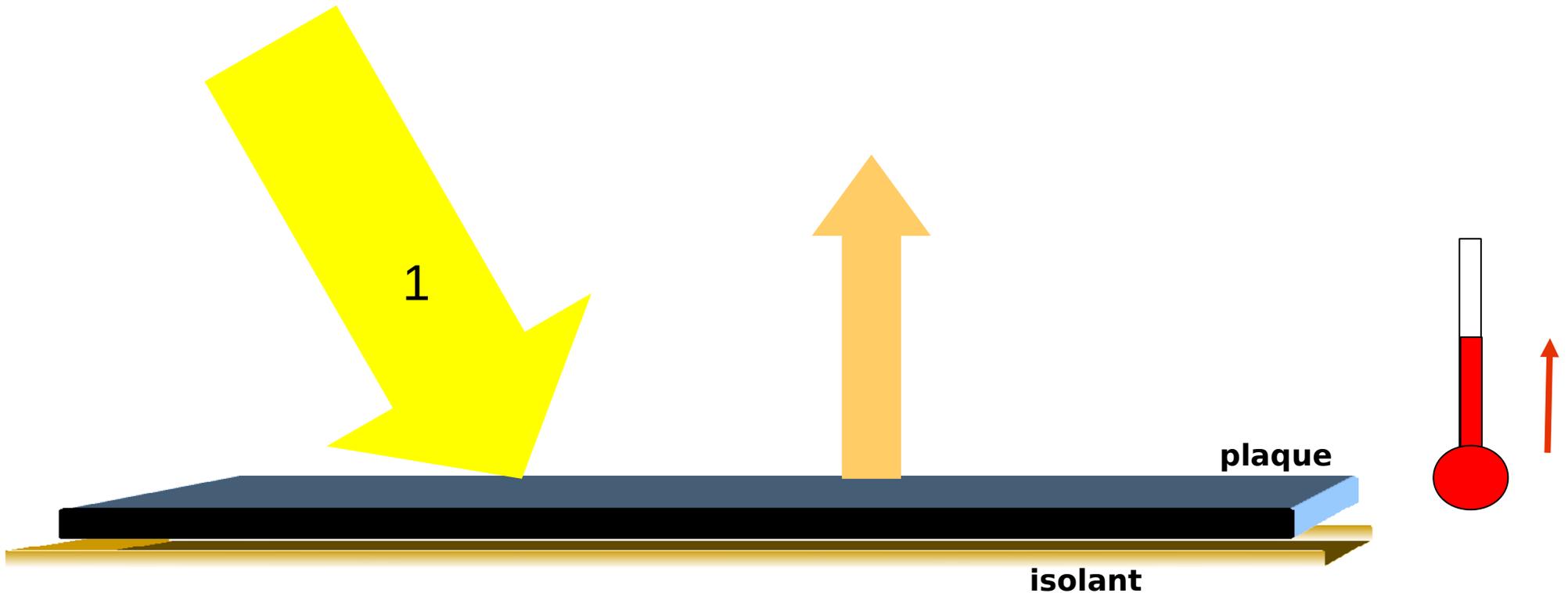
Lave de volcan :  $T \approx 1000\text{ K}$

### 3) L'équilibre énergétique



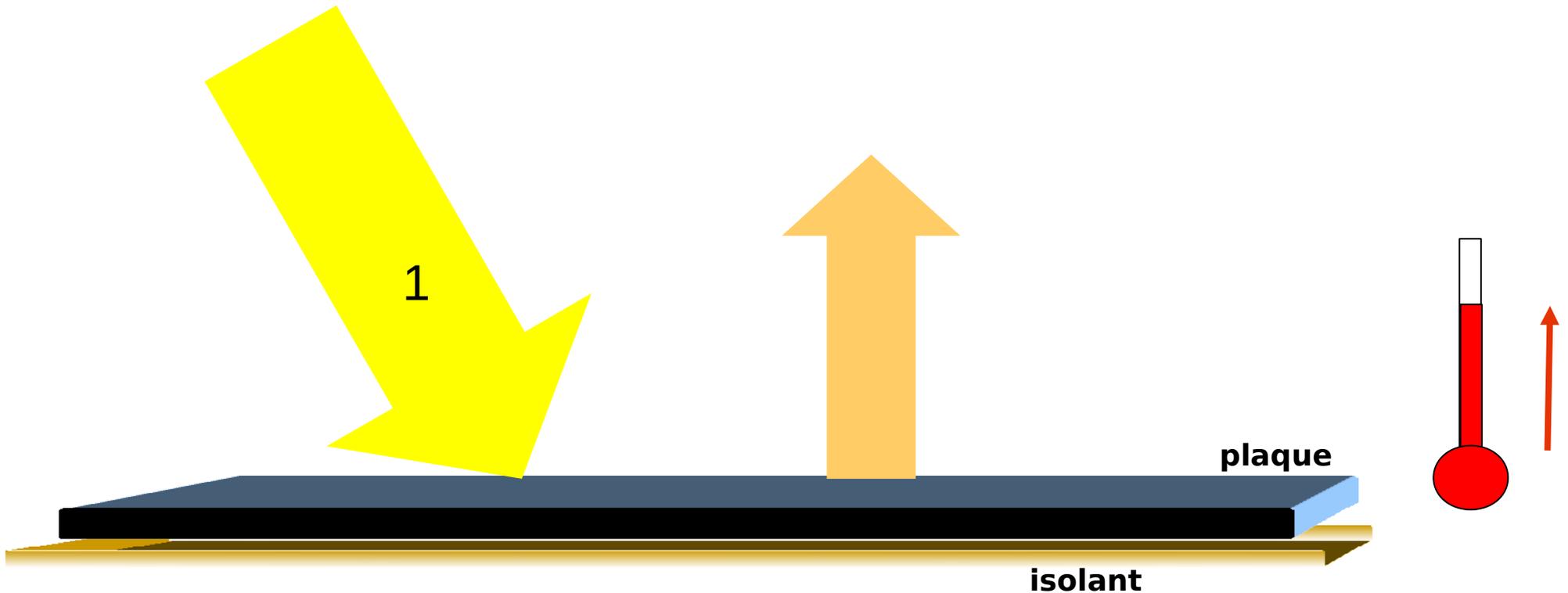
- Si un objet reçoit plus d'énergie qu'il n'en perd, sa température augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



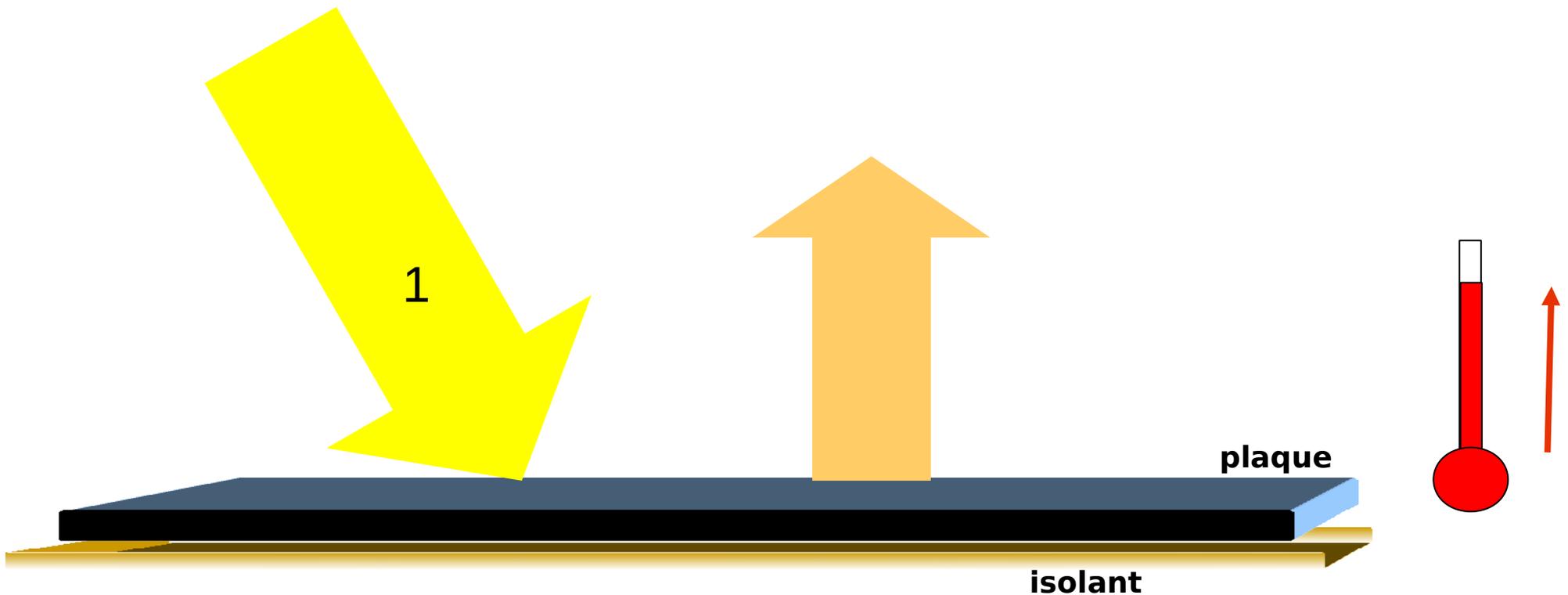
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



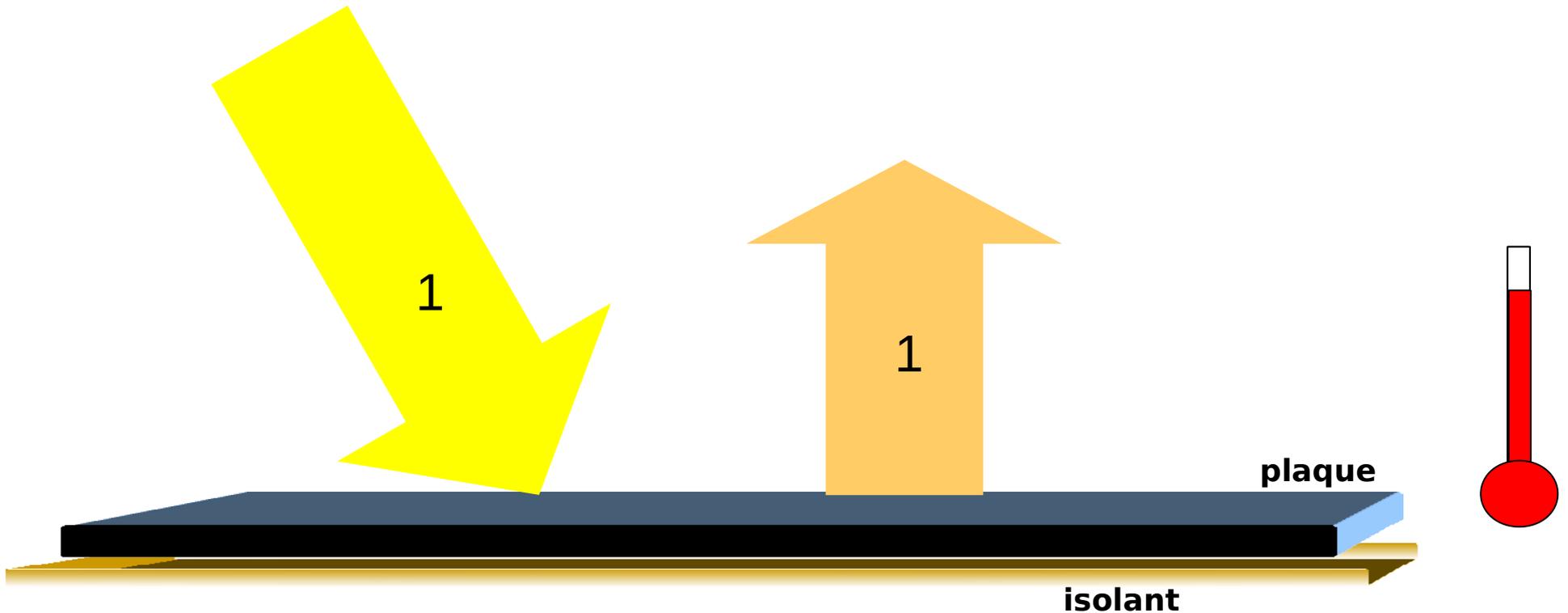
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



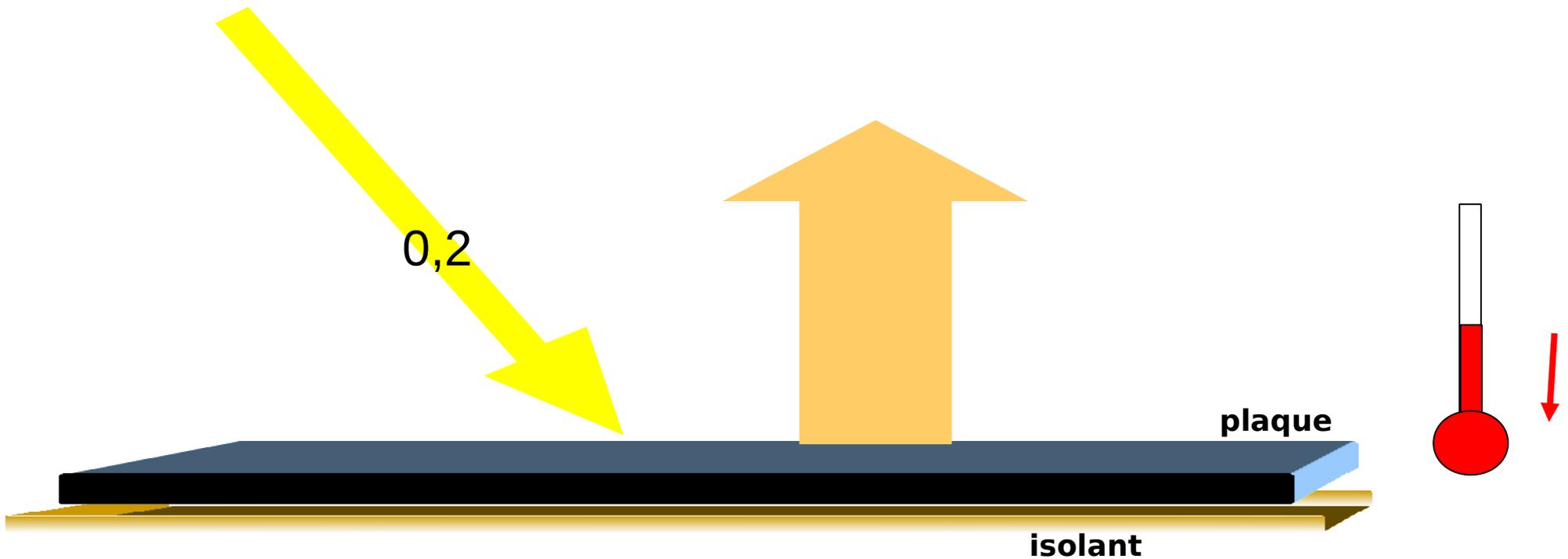
- Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

### 3) L'équilibre énergétique



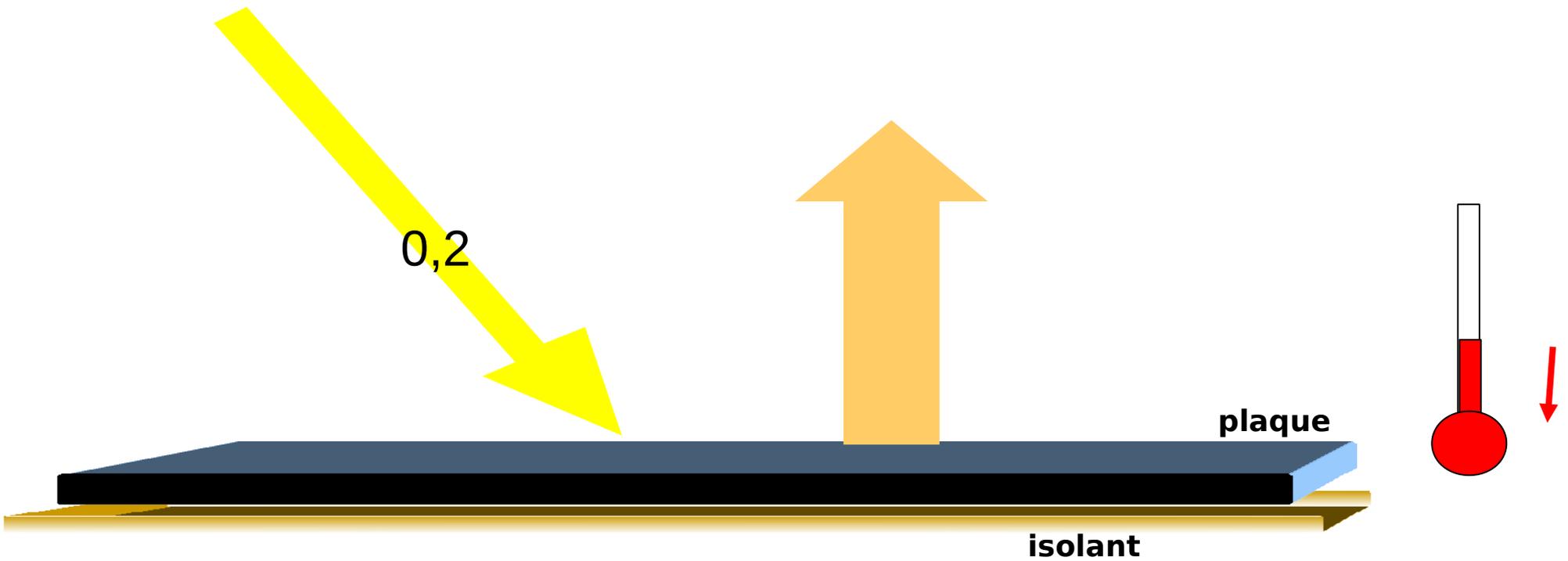
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

### 3) L'équilibre énergétique

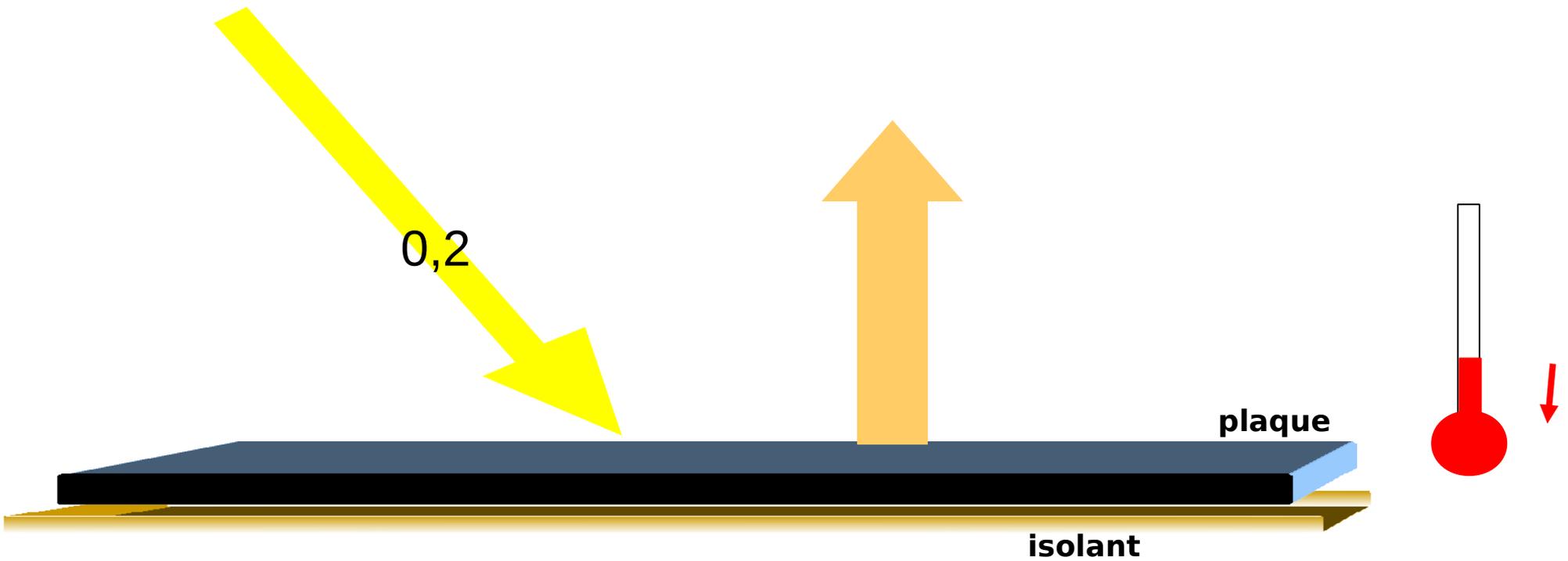


- Si un objet reçoit moins d'énergie qu'il n'en perd, sa température diminue.

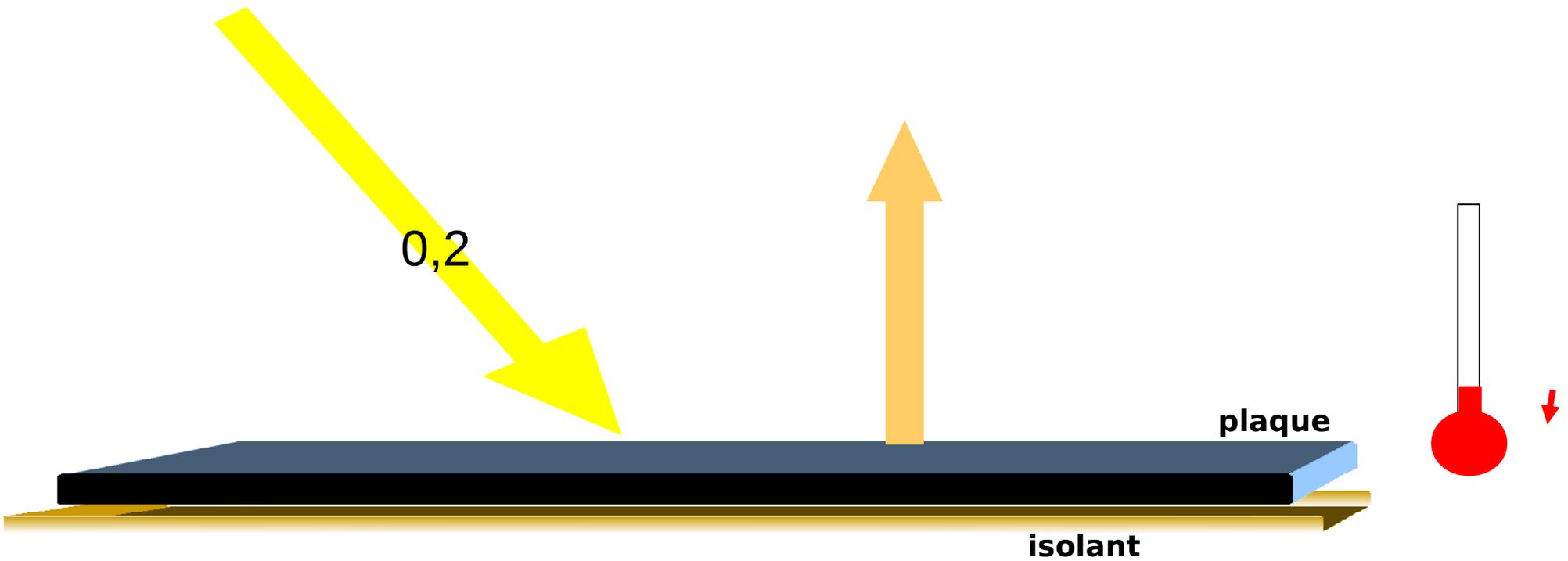
### 3) L'équilibre énergétique



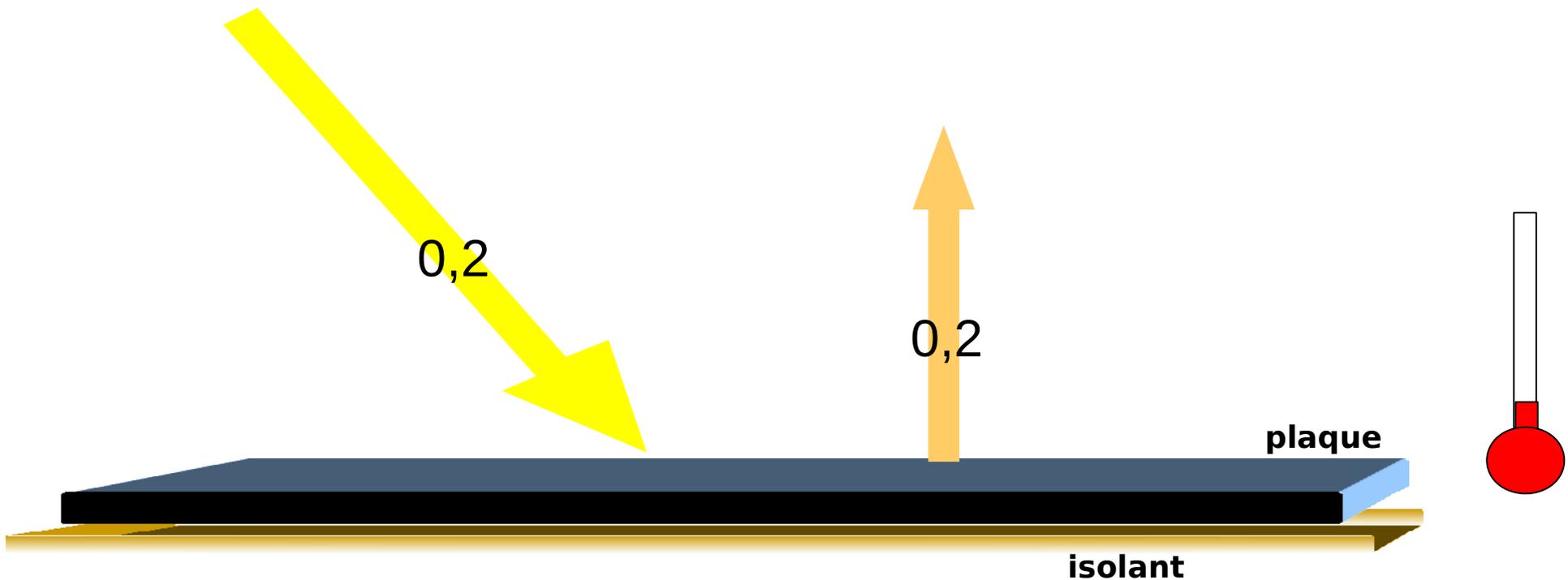
### 3) L'équilibre énergétique



### 3) L'équilibre énergétique

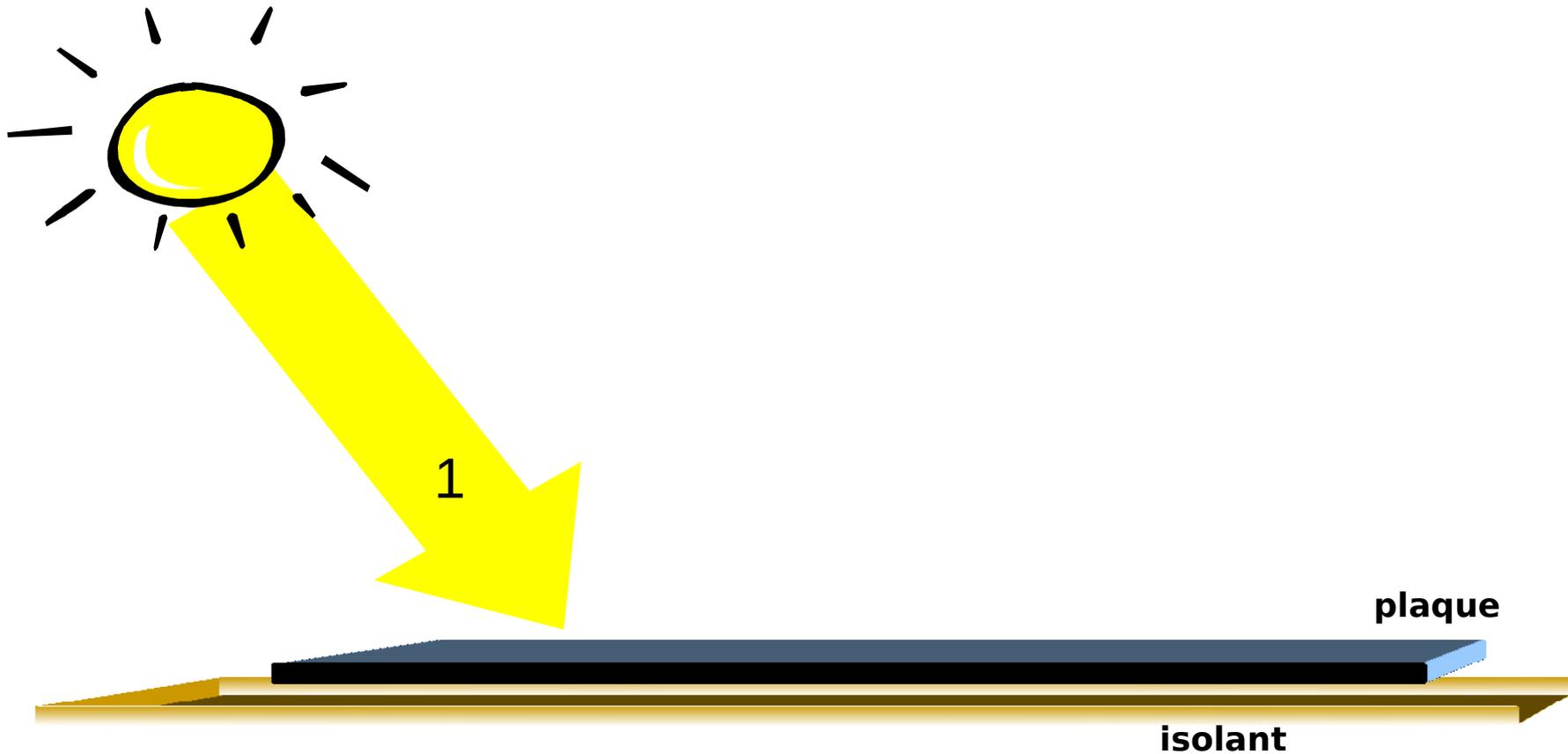


### 3) L'équilibre énergétique



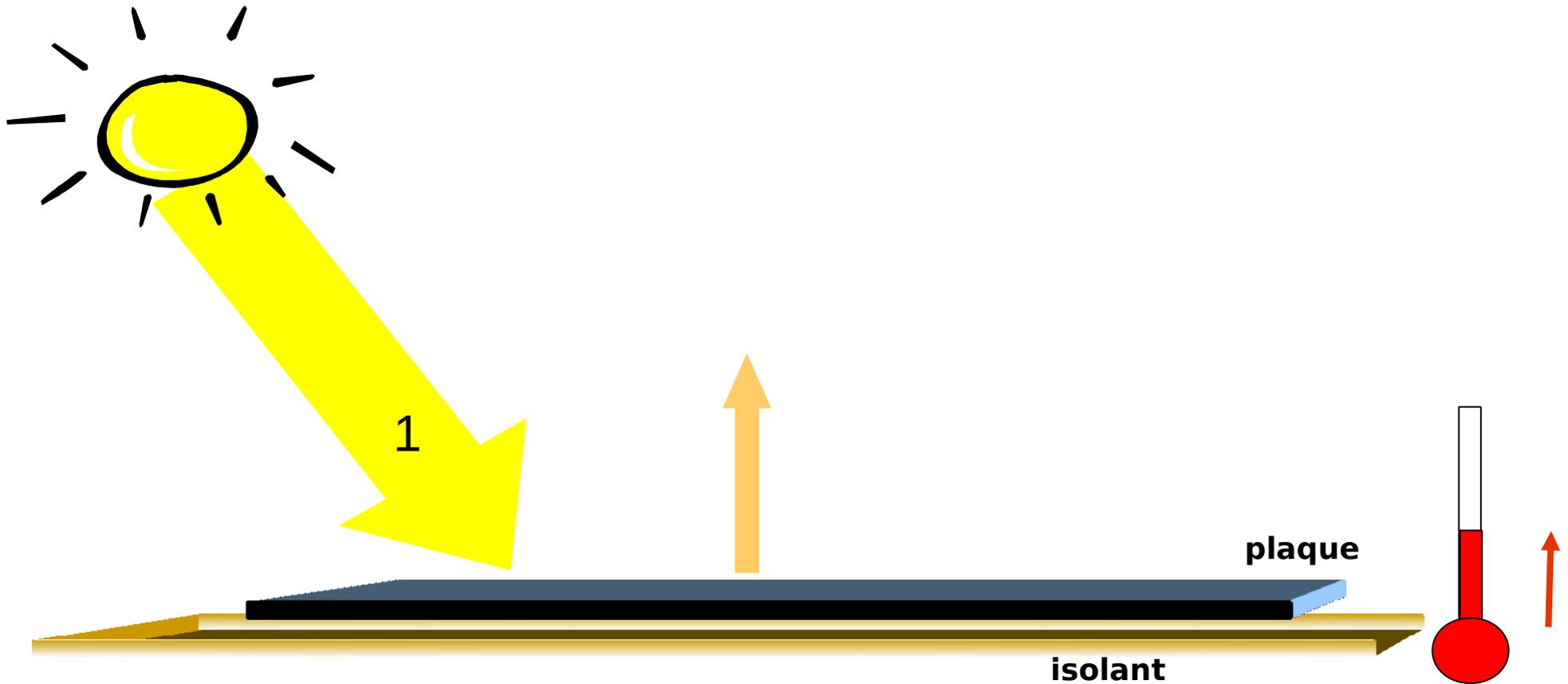
- L'équilibre est atteint lorsque l'énergie que perd l'objet est exactement compensée par l'énergie qu'il reçoit.

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



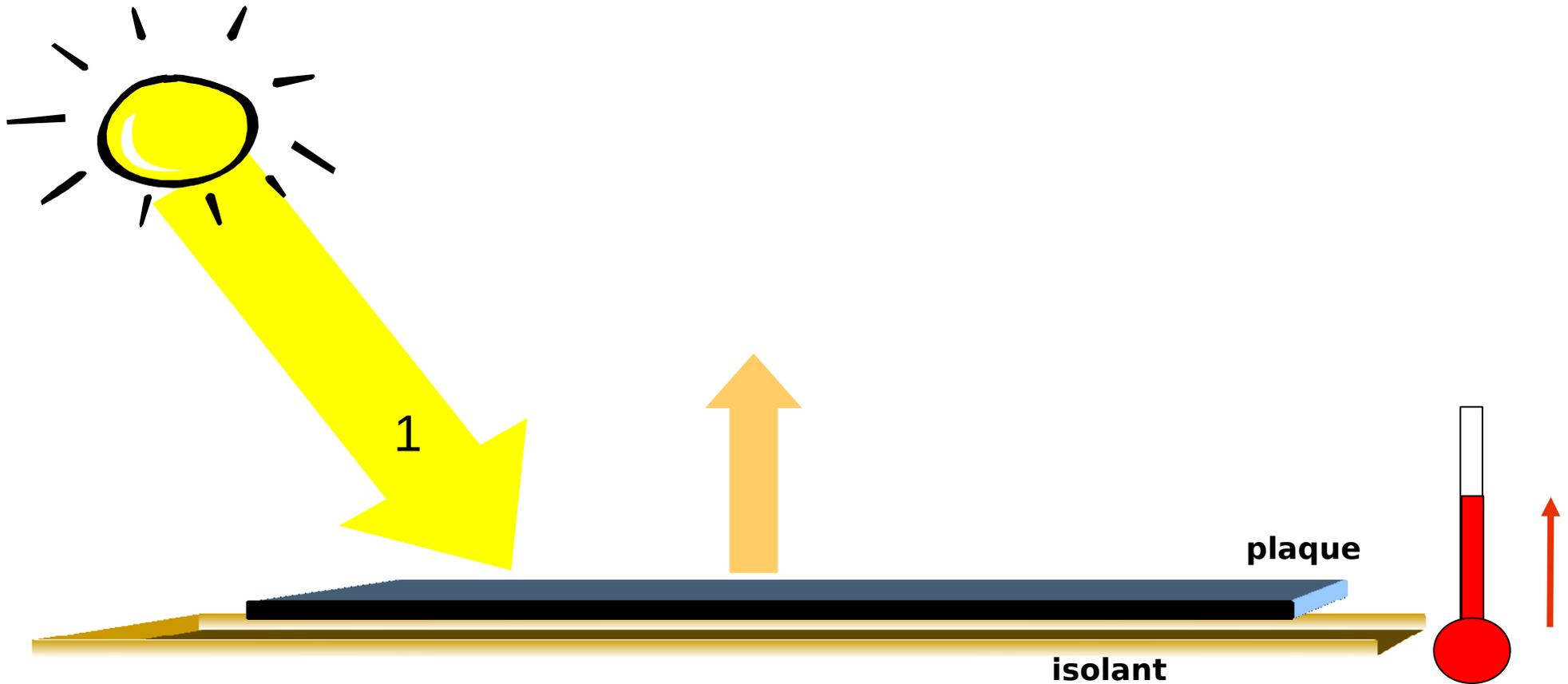
a) Plaçons cette plaque au soleil : parce qu'elle est noire, elle absorbe le rayonnement solaire. Elle gagne de l'énergie.

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



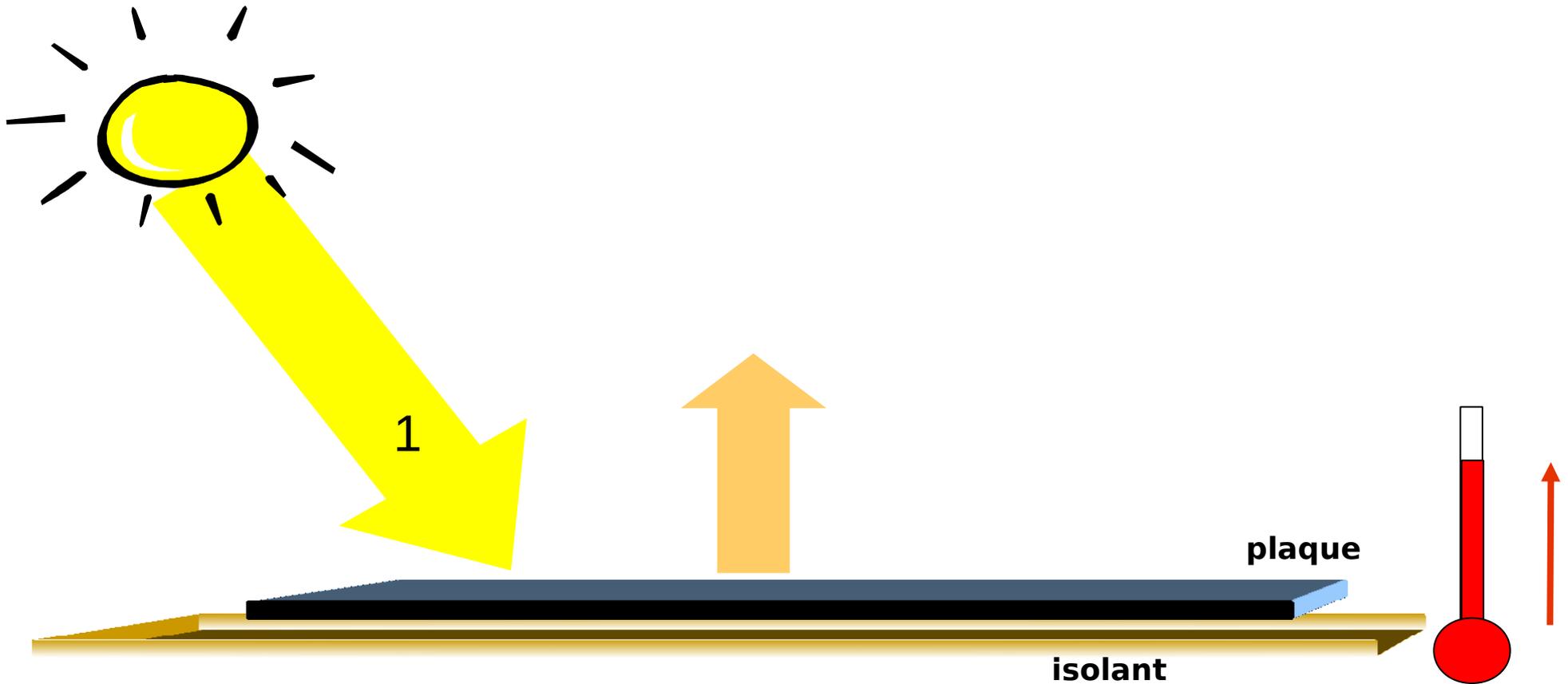
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



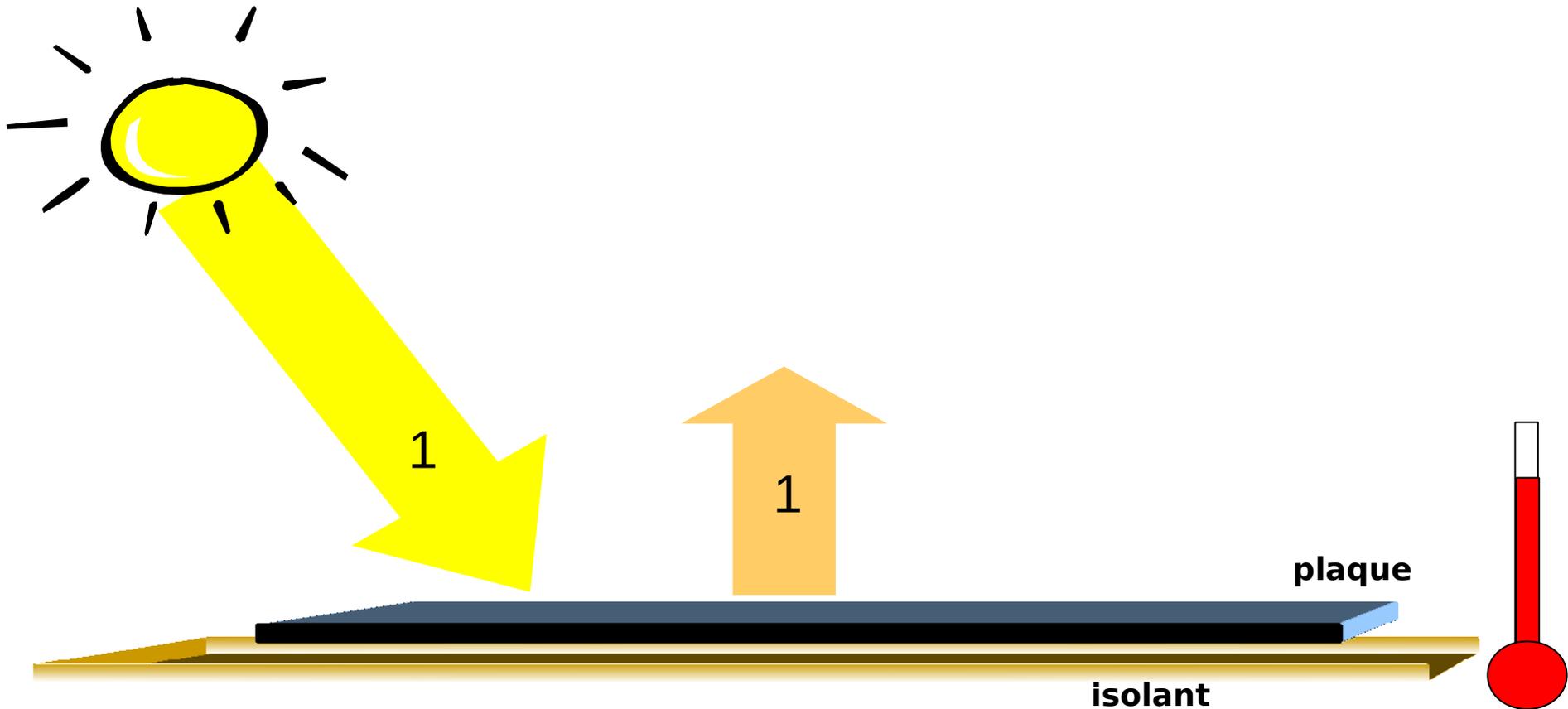
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



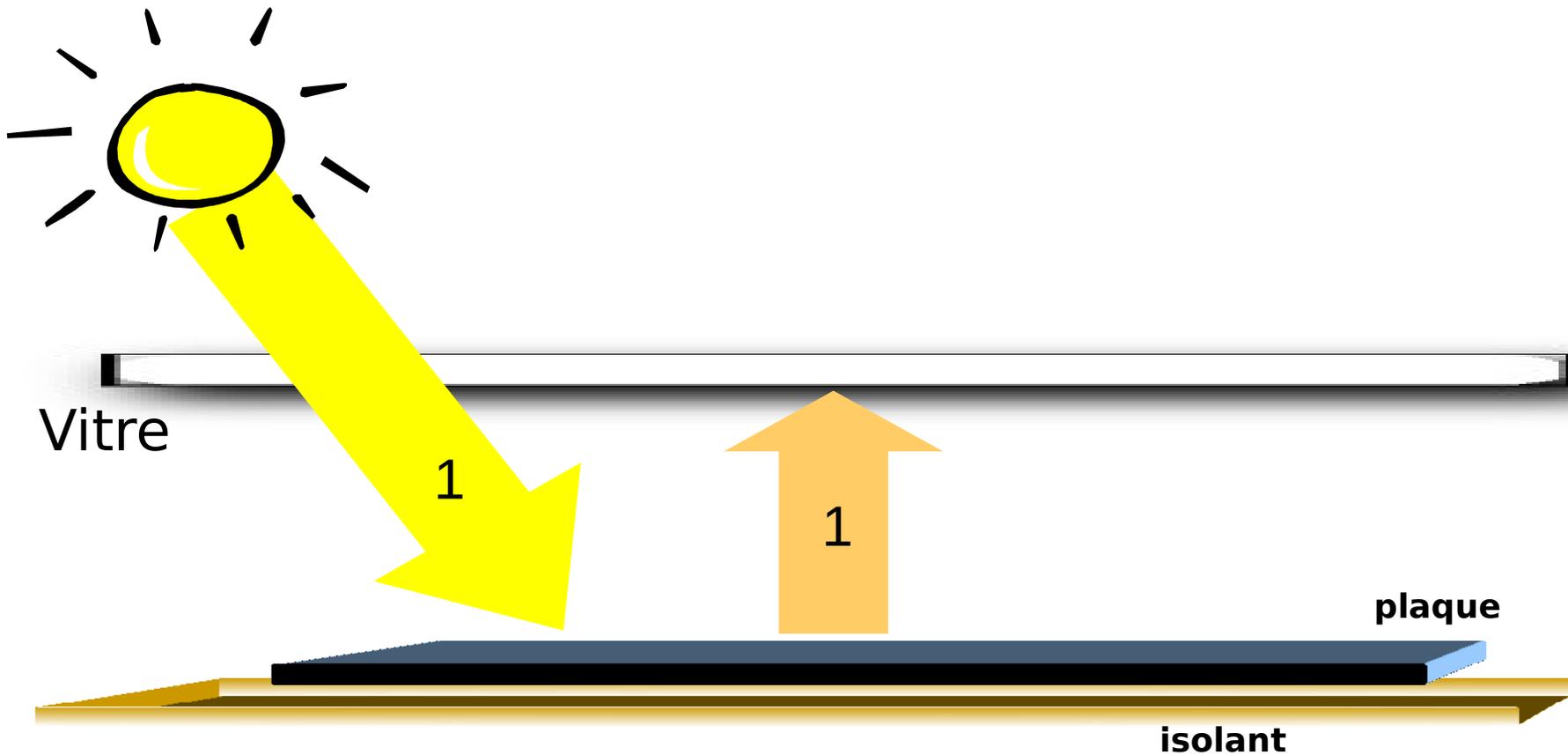
b) Comme elle gagne de l'énergie sa température augmente. Comme sa température augmente, l'énergie perdue par émission de rayonnement augmente.

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



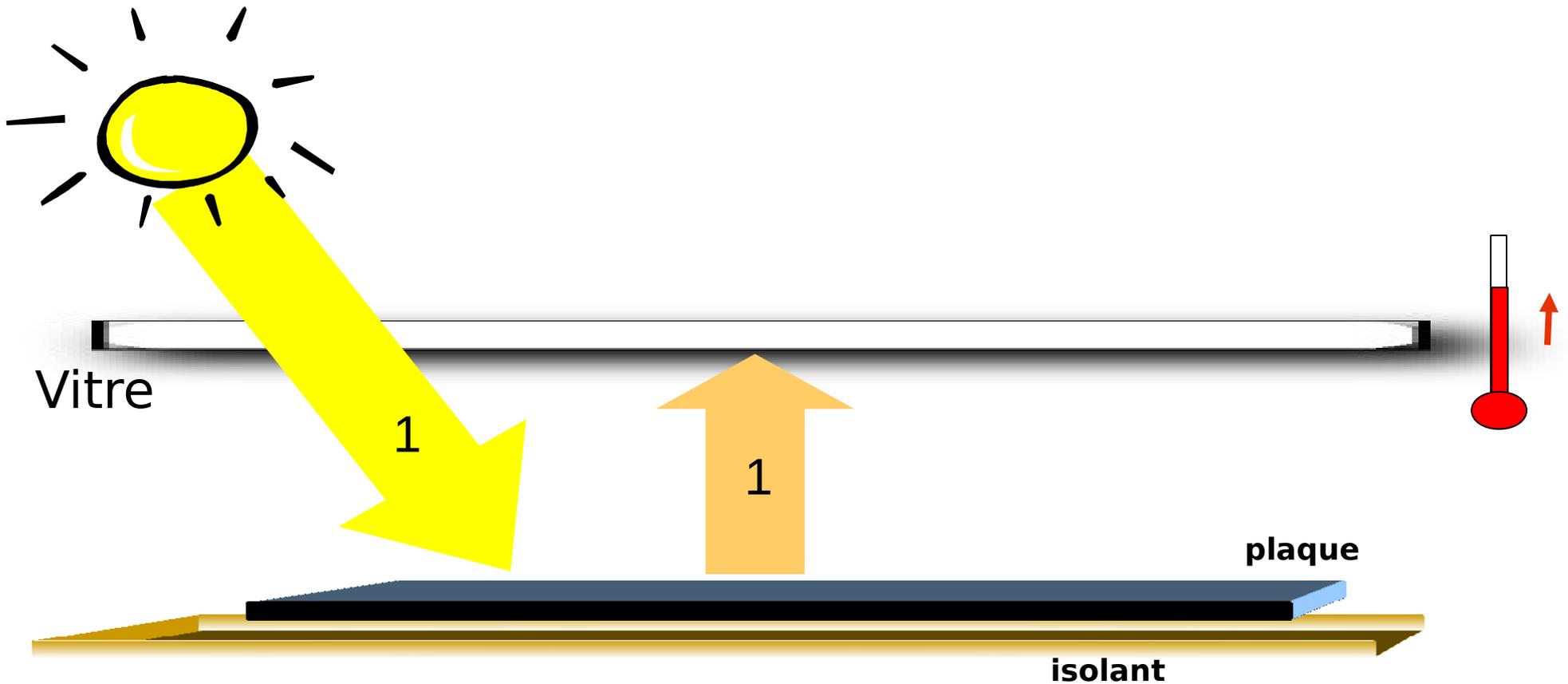
c) Finalement elle atteint sa température d'équilibre lorsqu'elle perd autant d'énergie par émission de rayonnement infrarouge qu'elle en gagne par absorption de rayonnement solaire.

## 5) L'effet de serre



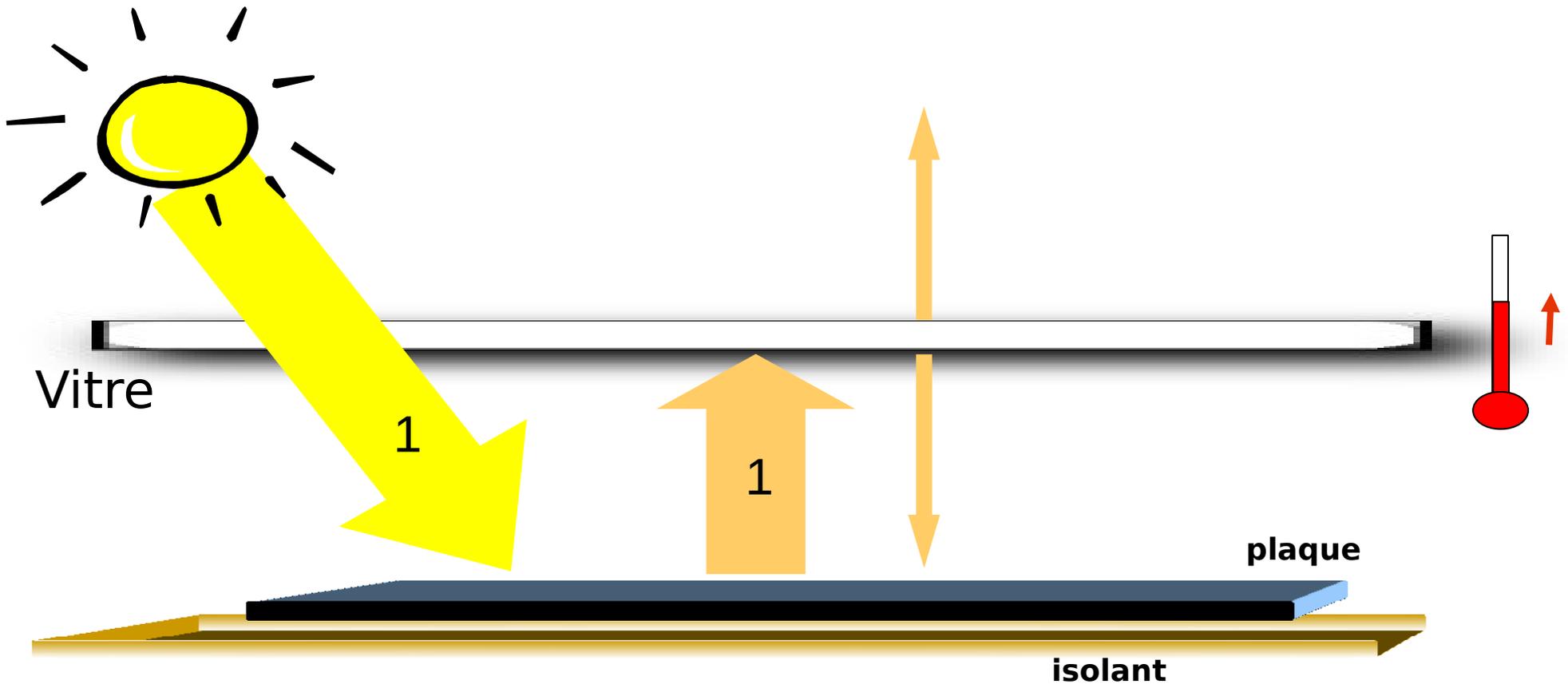
Plaçons maintenant une vitre au-dessus de cette plaque au soleil. Cette vitre est parfaitement transparente au rayonnement solaire mais absorbe totalement le rayonnement infrarouge.

## 5) L'effet de serre



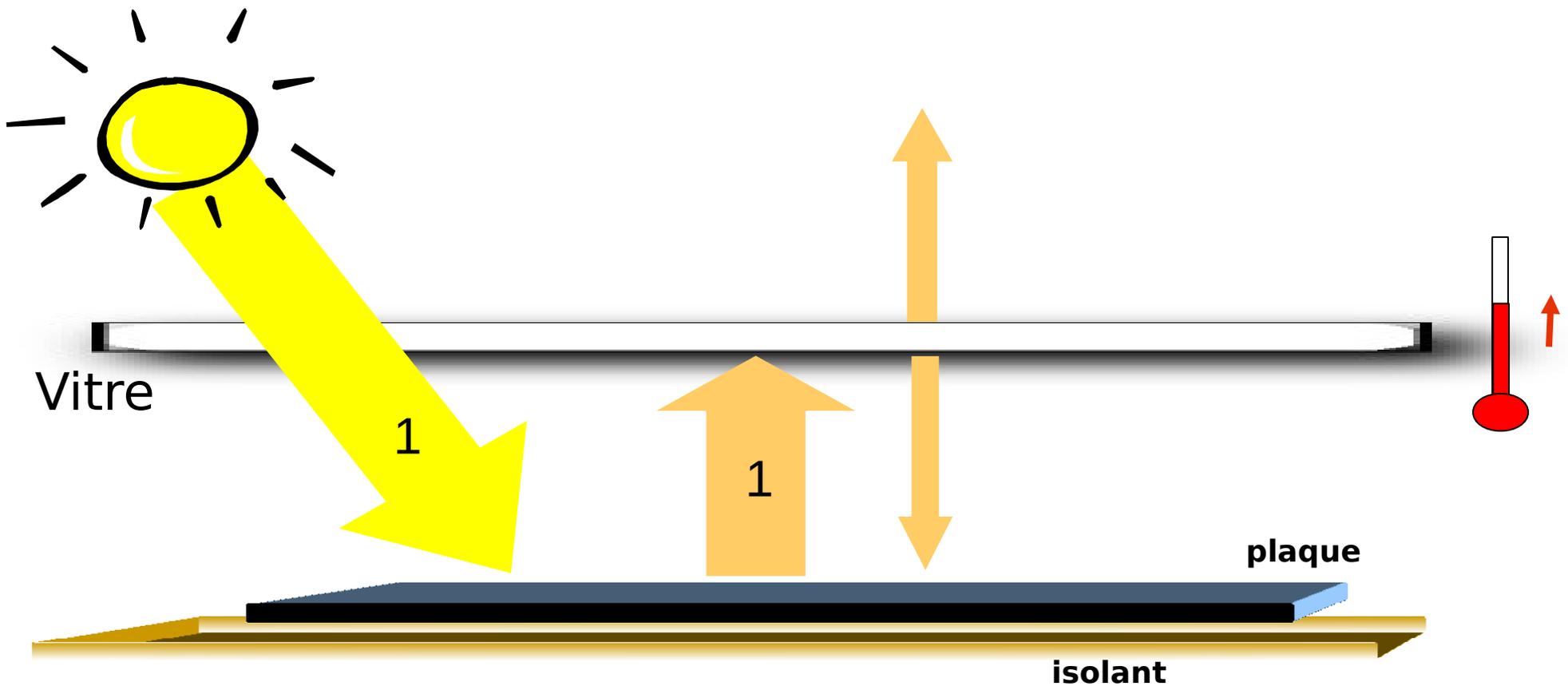
L'absorption par la vitre du rayonnement infrarouge émis par la plaque lui fait gagner de l'énergie donc sa température s'élève.

## 5) L'effet de serre



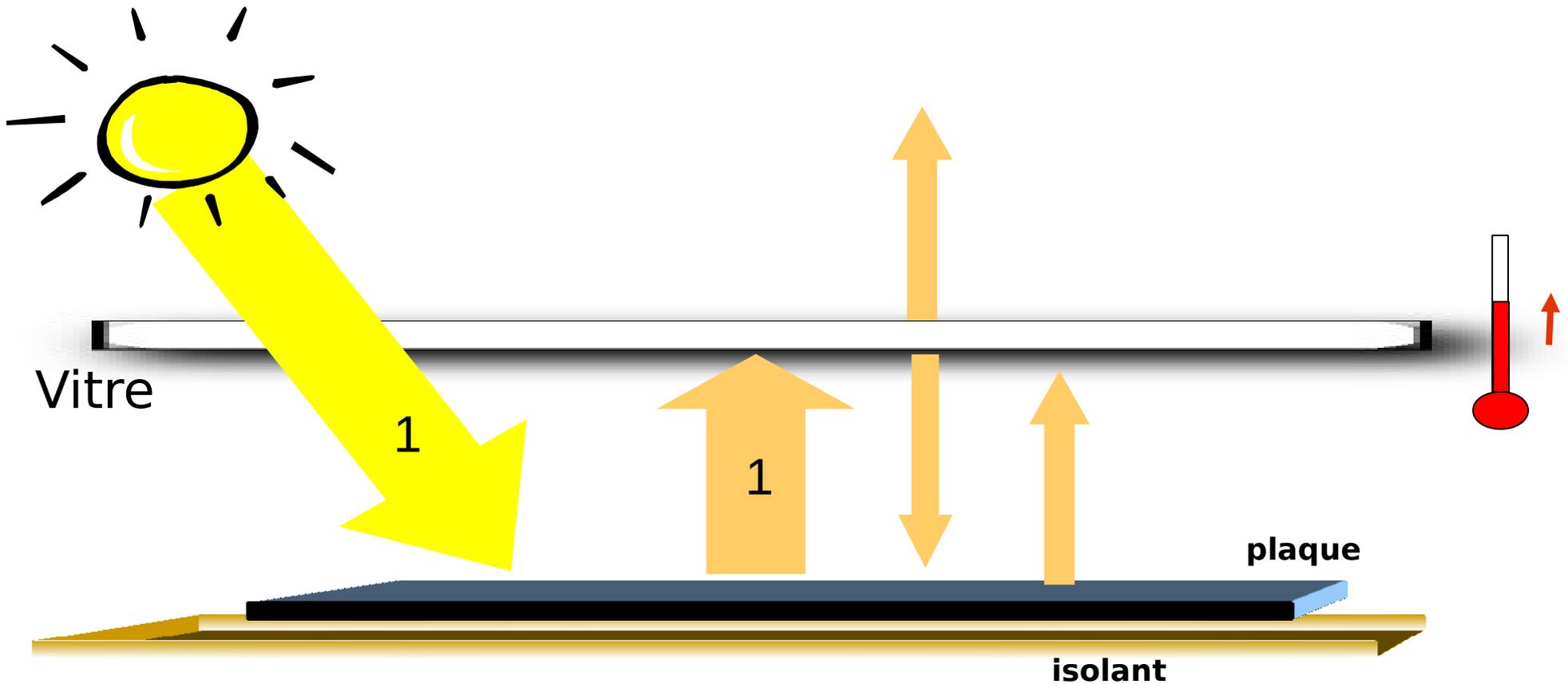
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



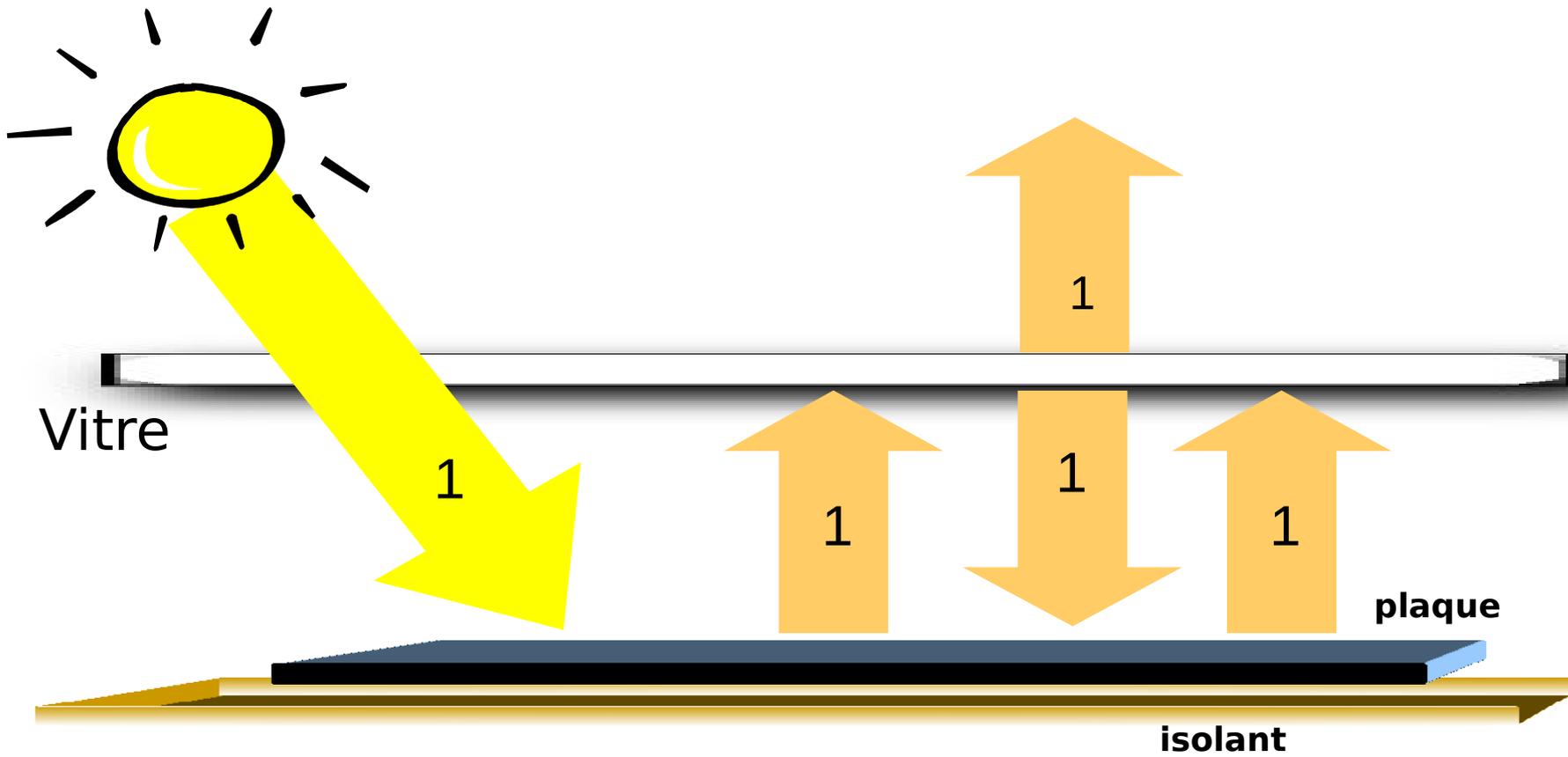
Comme la température de la vitre augmente, elle émet plus de rayonnement infrarouge. Dans le cas présent, elle émet autant de rayonnement vers le haut que vers le bas.

## 5) L'effet de serre



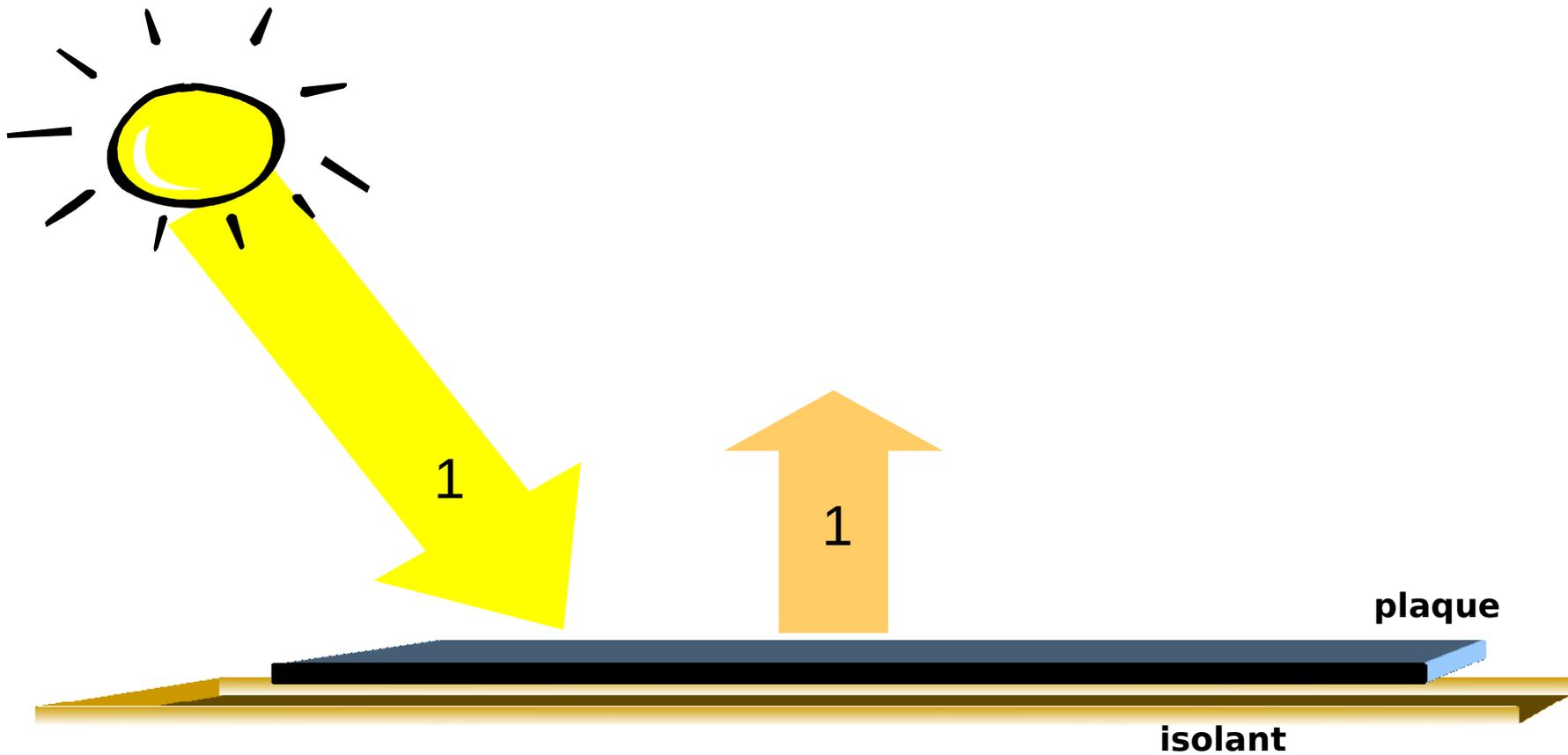
Comme la plaque recoit plus de rayonnement infrarouge, sa temperature augmente, de sorte qu'elle emet elle aussi plus de rayonnement infrarouge. . . .

## 5) L'effet de serre



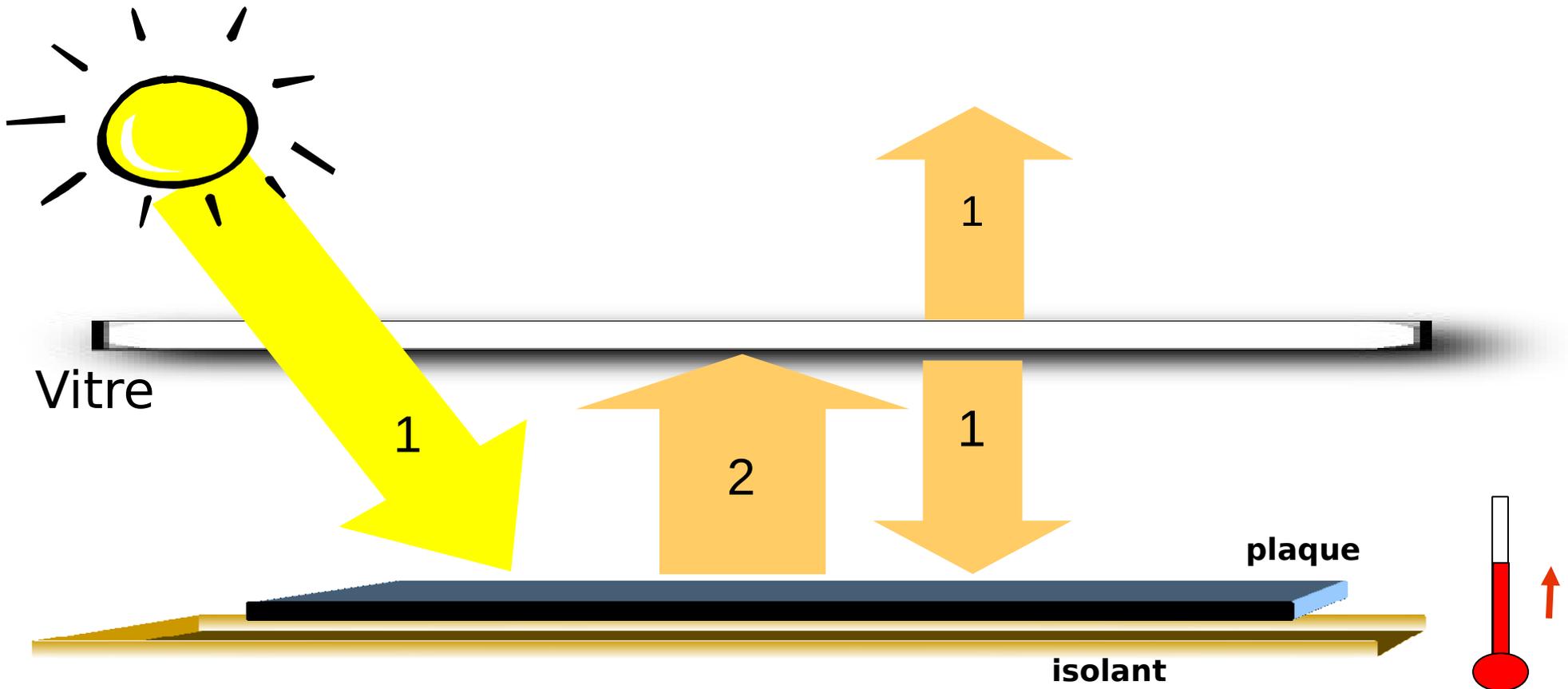
et finalement ...

## 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.

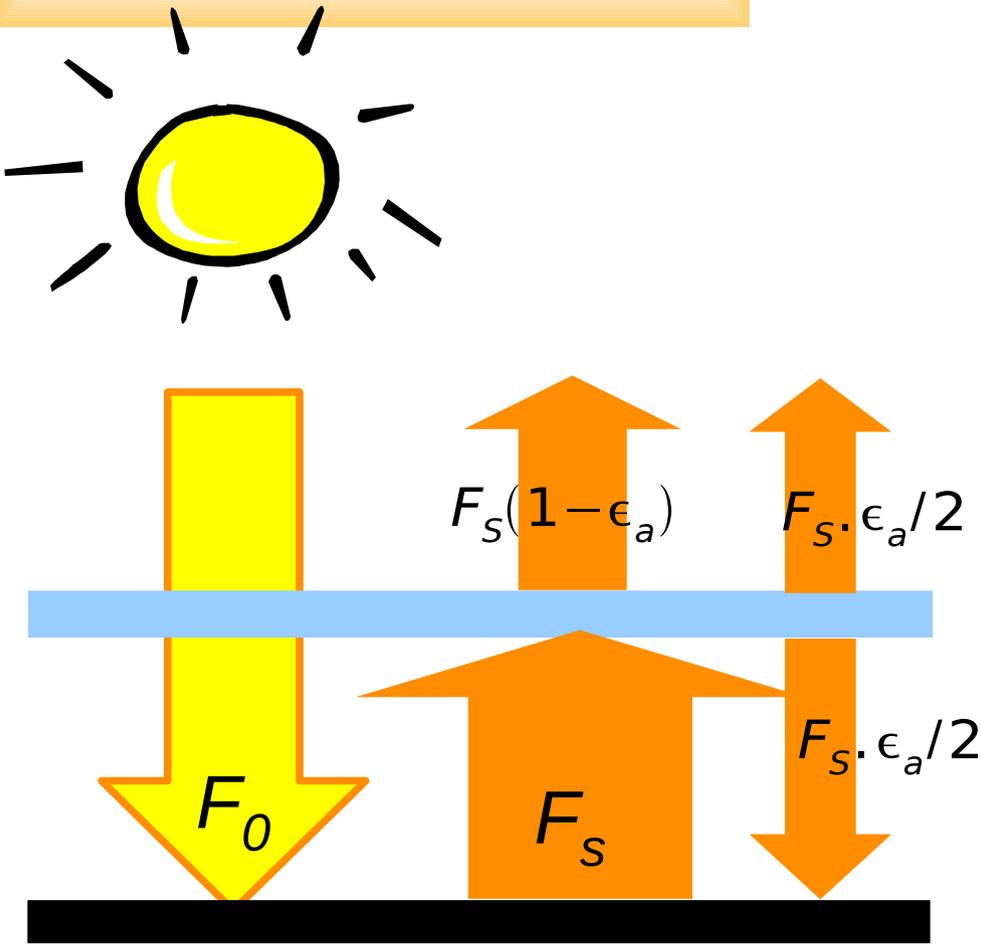
## 5) L'effet de serre

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

La vitre **absorbe** le rayonnement infrarouge, elle 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.

## 5) L'effet de serre



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

- rayonnement solaire: parfaitement transparente
- rayonnement infrarouge: émissivité=absorptivité= $\epsilon_a$   
réflectivité=0

**Surface:** parfaitement absorbante pour les rayonnements solaire et infra-rouge

$$\sigma T_s^4 = F_s$$

**On a alors:**  $F_s = F_0 + F_s \cdot \epsilon_a / 2$

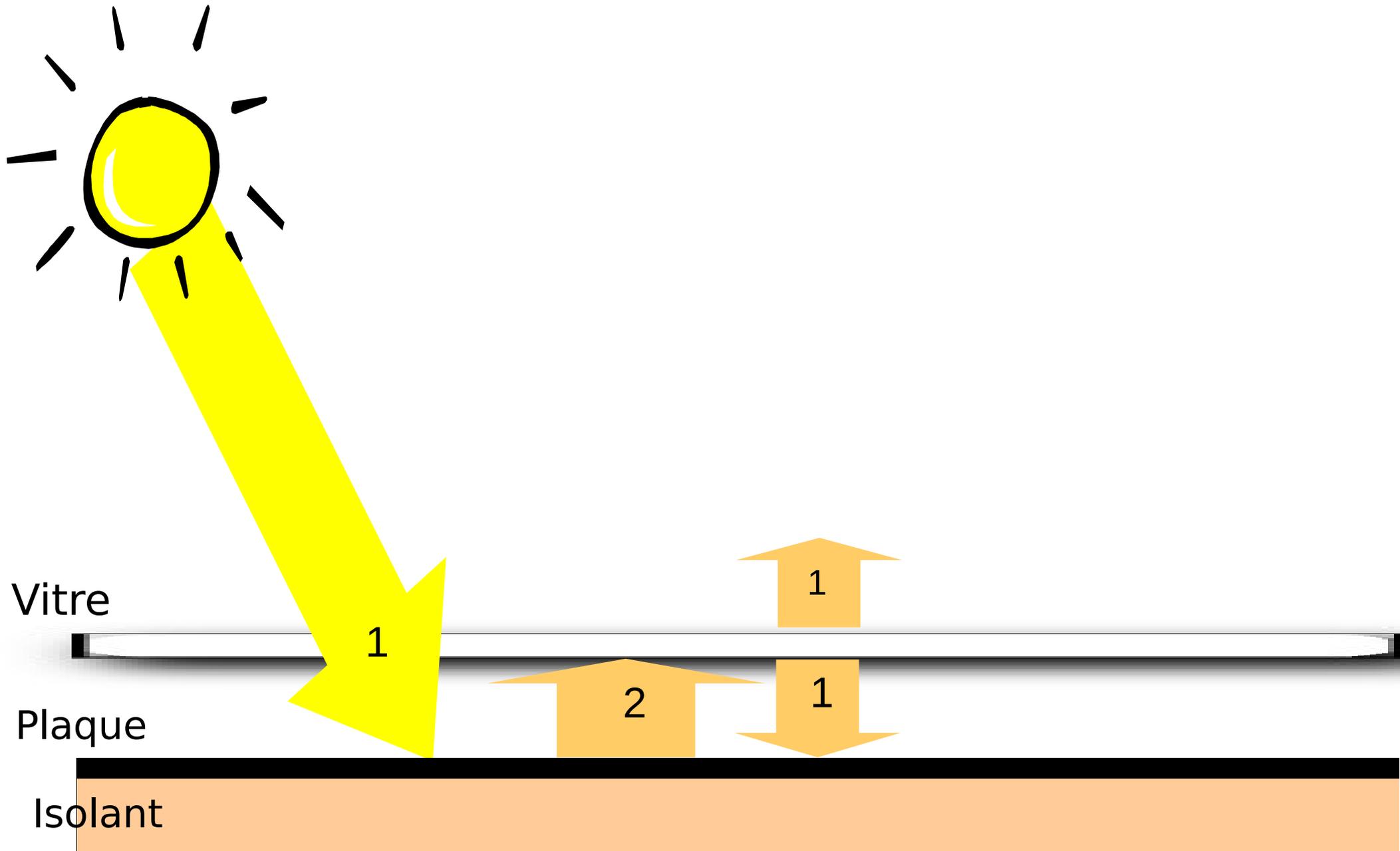
**D'où:**

$$\sigma T_s^4 = \frac{F_0}{1 - \epsilon_a / 2}$$

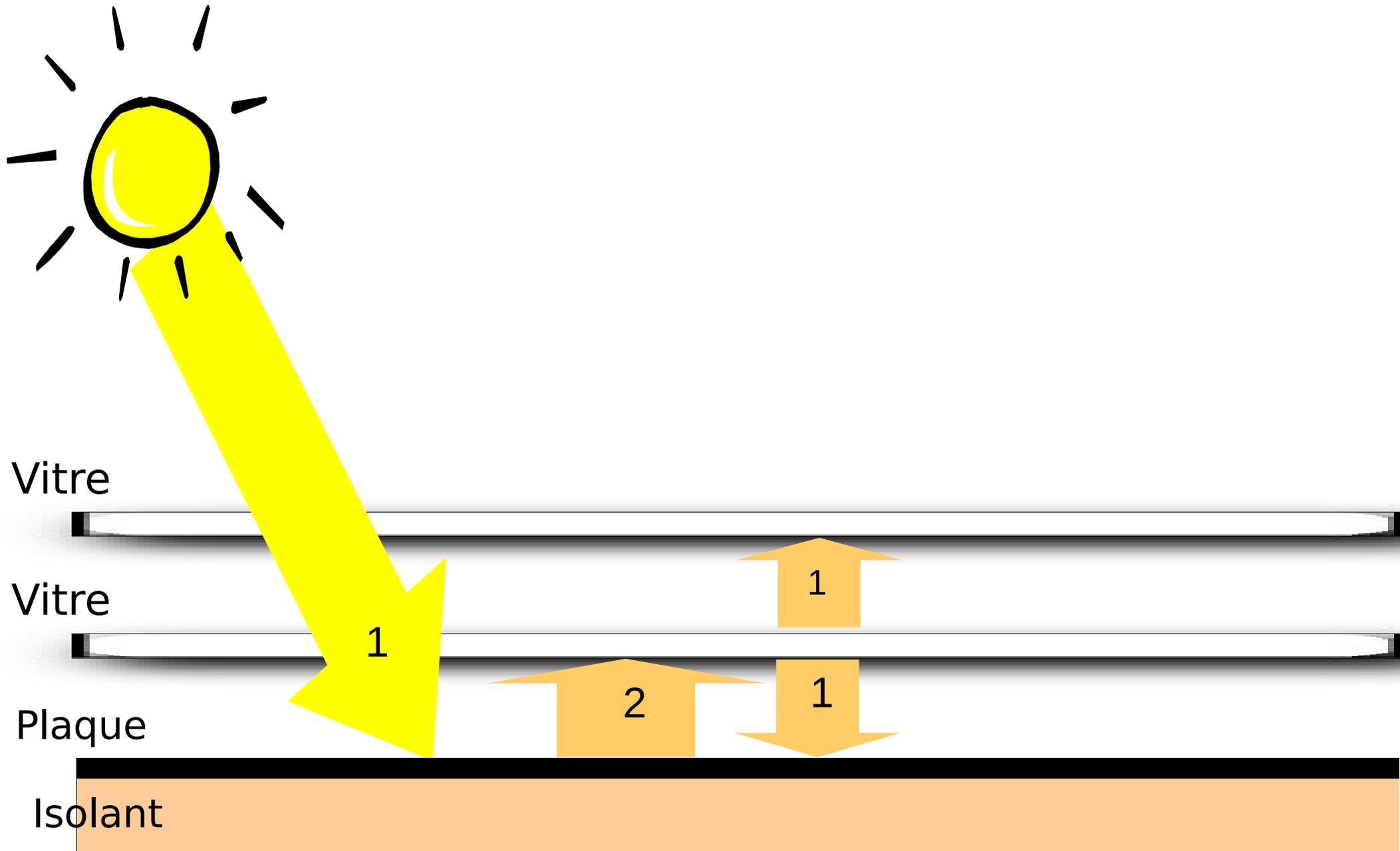
➤ Dans un modèle de serre à une couche isotherme (utilisé par S. Arrhenius), la température de surface dépend directement de l'émissivité de la couche.

• Le cas  $\epsilon_a = 1$  correspond-il à un effet de serre maximum ?

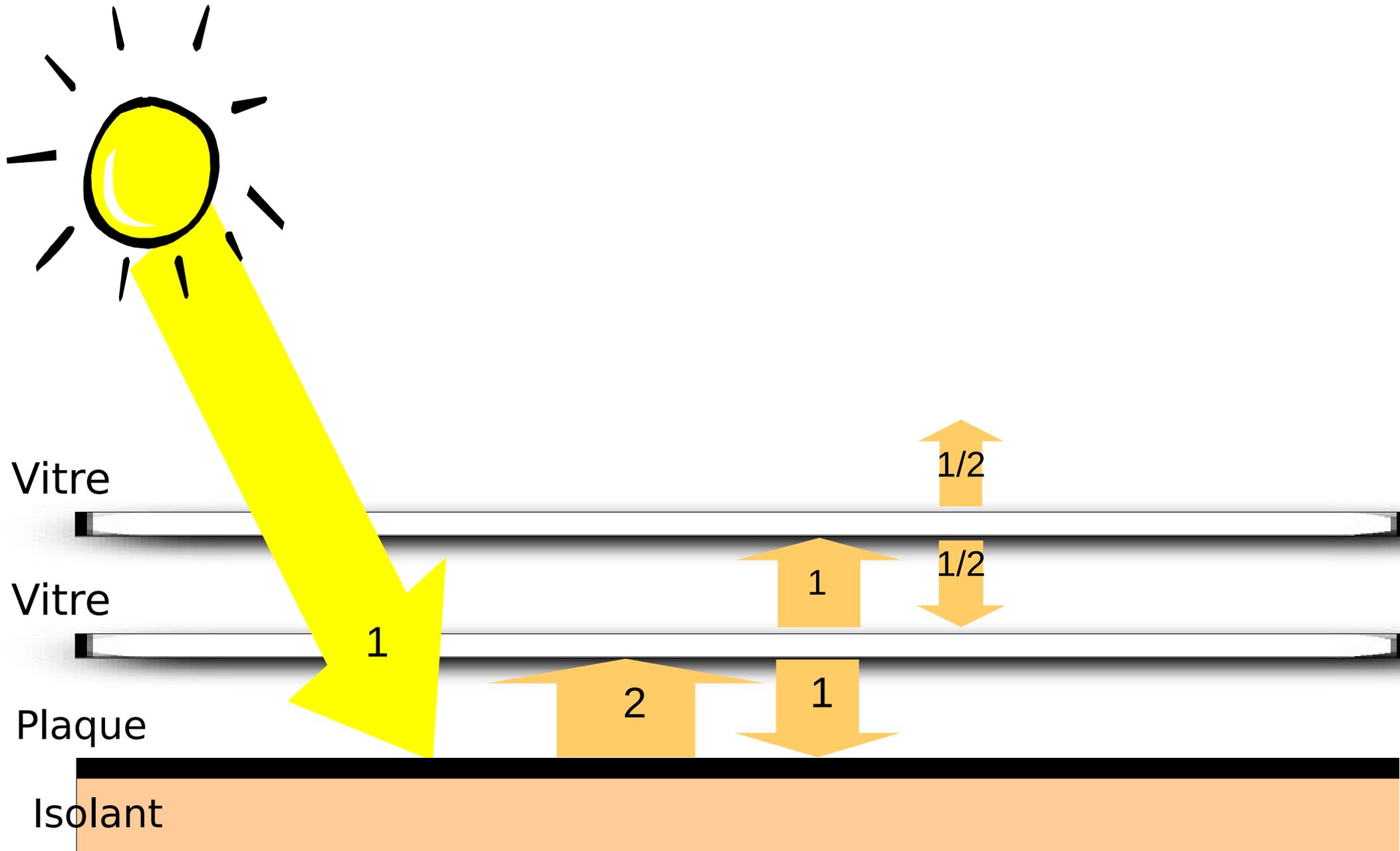
6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?



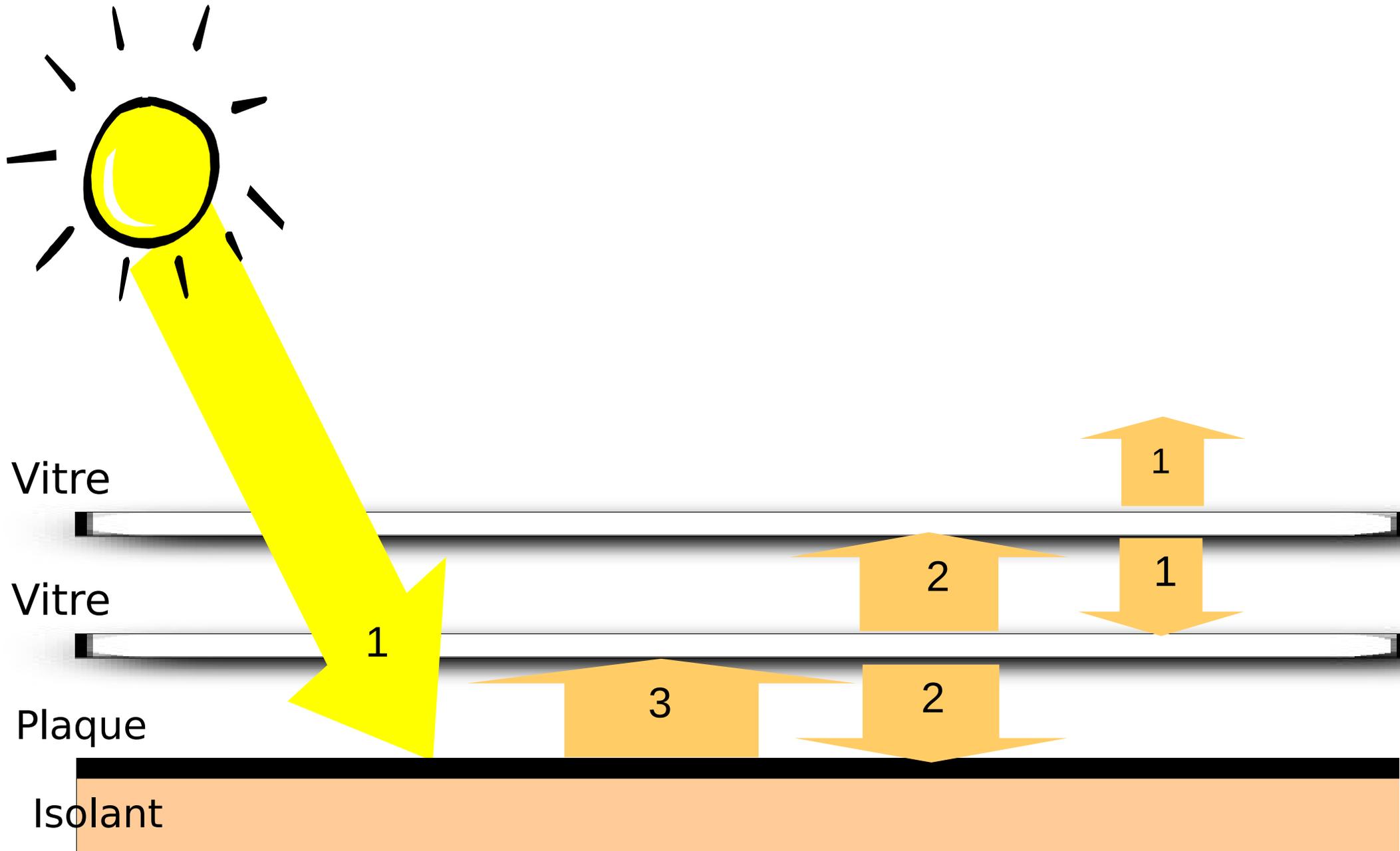
6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?



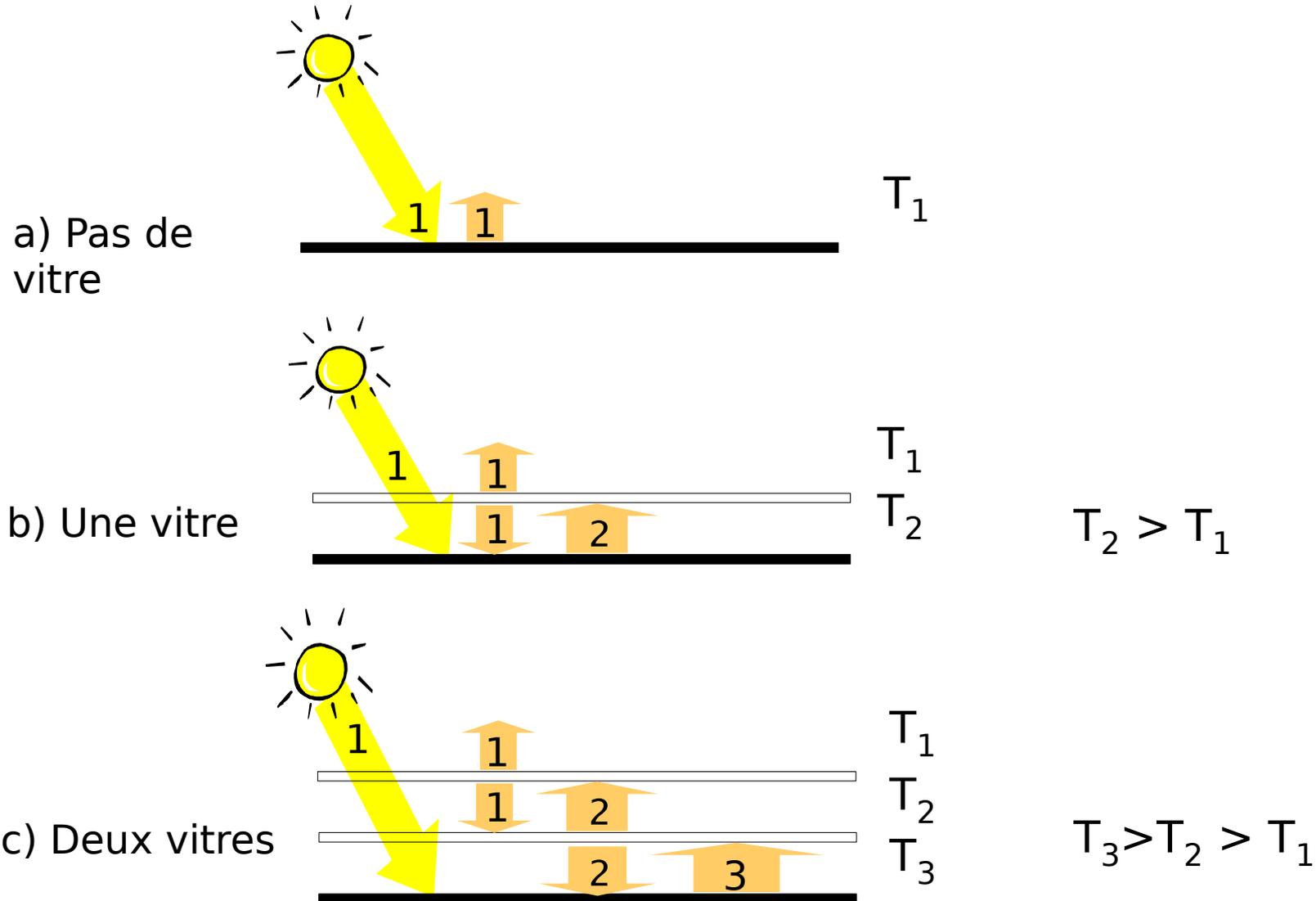
6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?



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



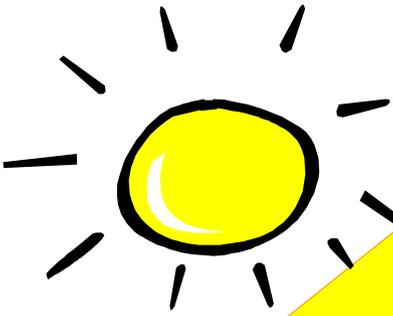
## 6) Y a-t-il un effet de serre maximum ?



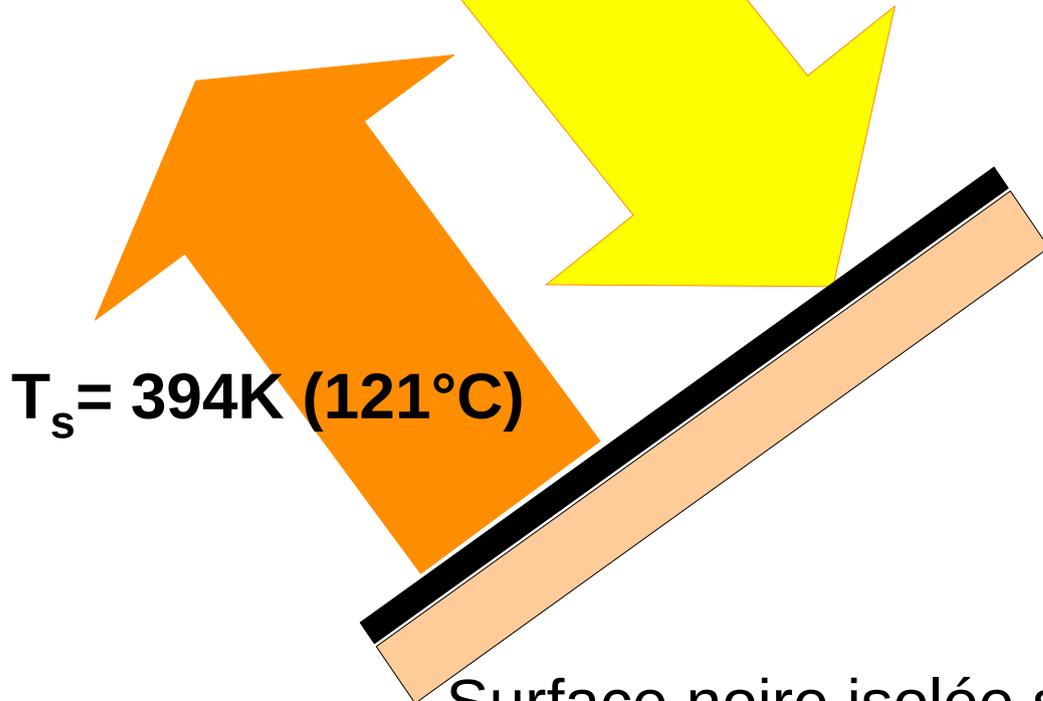
Conclusion : Il n'y a pas de limite à l'effet de serre (tant qu'il y a séparation spectrale entre le rayonnement solaire et le rayonnement infrarouge).

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
  - Principes de l'effet de serre
  - Température d'équilibre d'une planète
  - Calcul de l'effet de serre
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**

# Température d'équilibre d'une planète



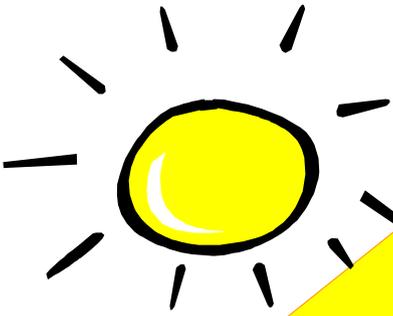
Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$



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

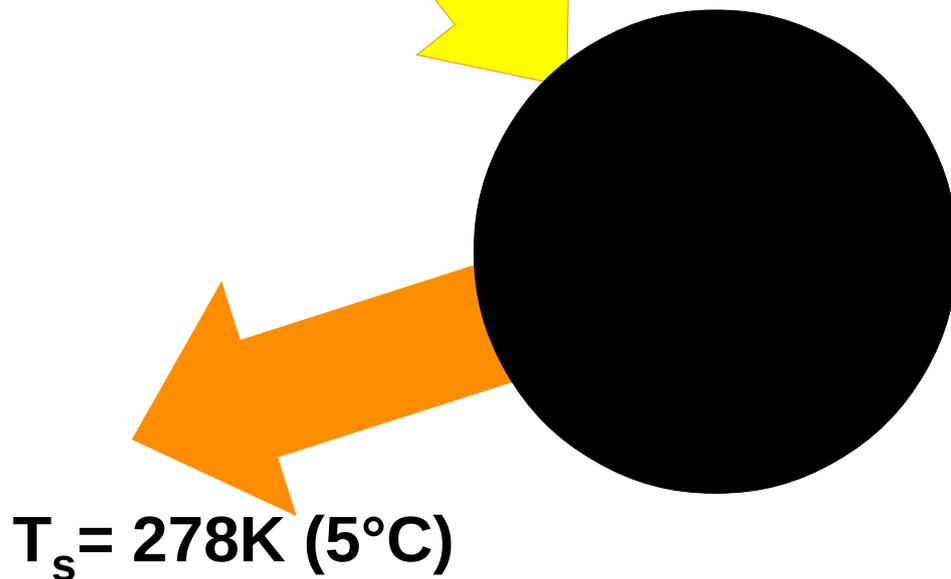
Surface noire isolée sur une face

# Température d'équilibre d'une planète

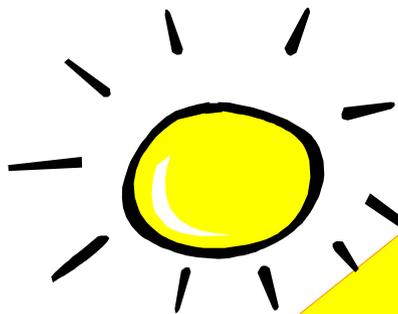


Flux solaire incident sur un **plan**:  $F_0 = 1364 \text{ W.m}^{-2}$

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



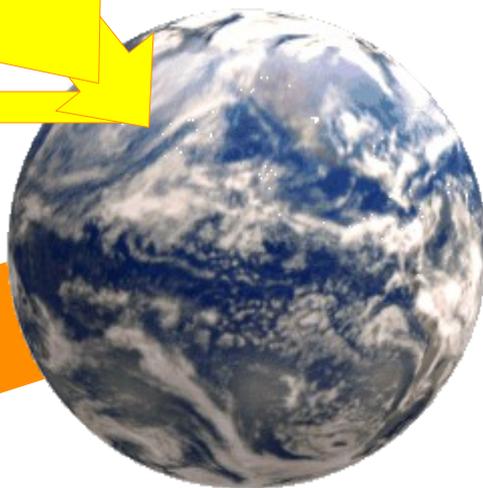
# Température d'équilibre d'une planète



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**



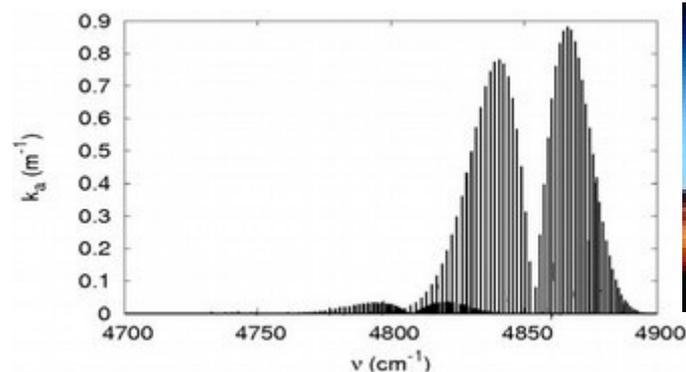
$T_s = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$

La **température** moyenne de la surface de la Terre est de  **$15^\circ\text{C}$**  environ. ==> **Effet de serre**

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
  - Principes de l'effet de serre
  - Température d'équilibre d'une planète
  - Calcul de l'effet de serre
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**



# Calcul de l'effet de serre

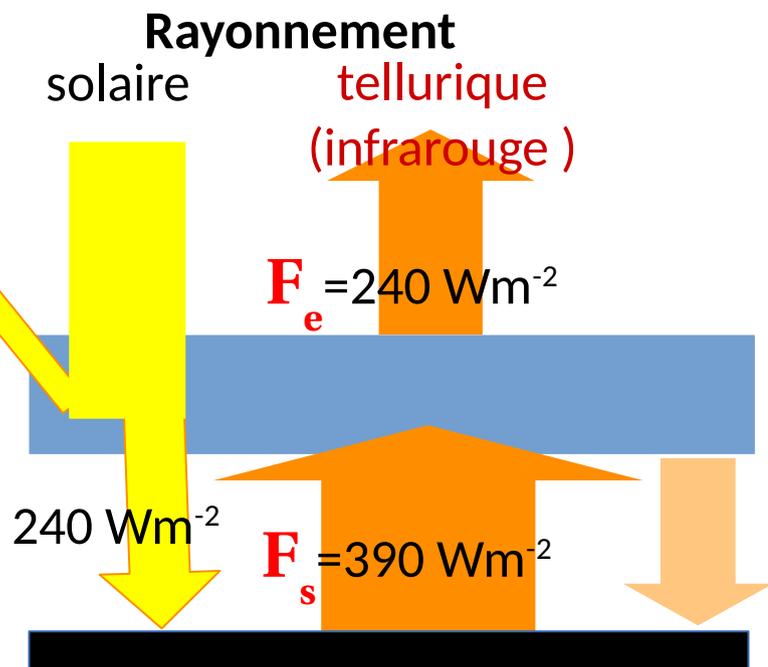


Propriétés radiatives

Profils atmosphériques

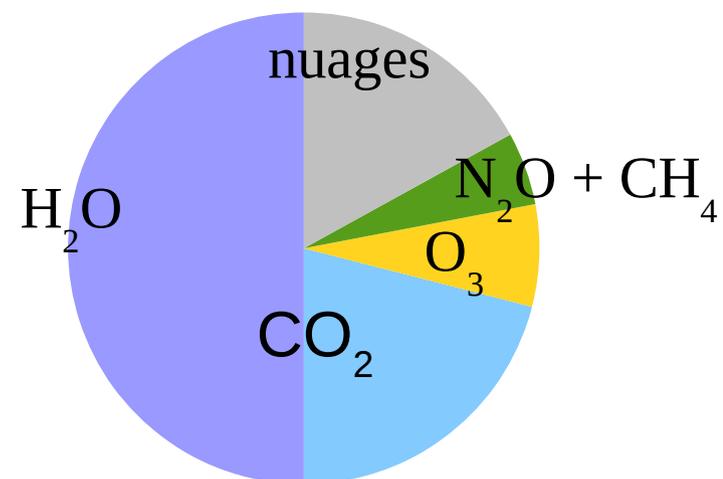
Calcul des flux radiatifs  $F$  et de l'effet de serre

$$G = F_s - F_e$$



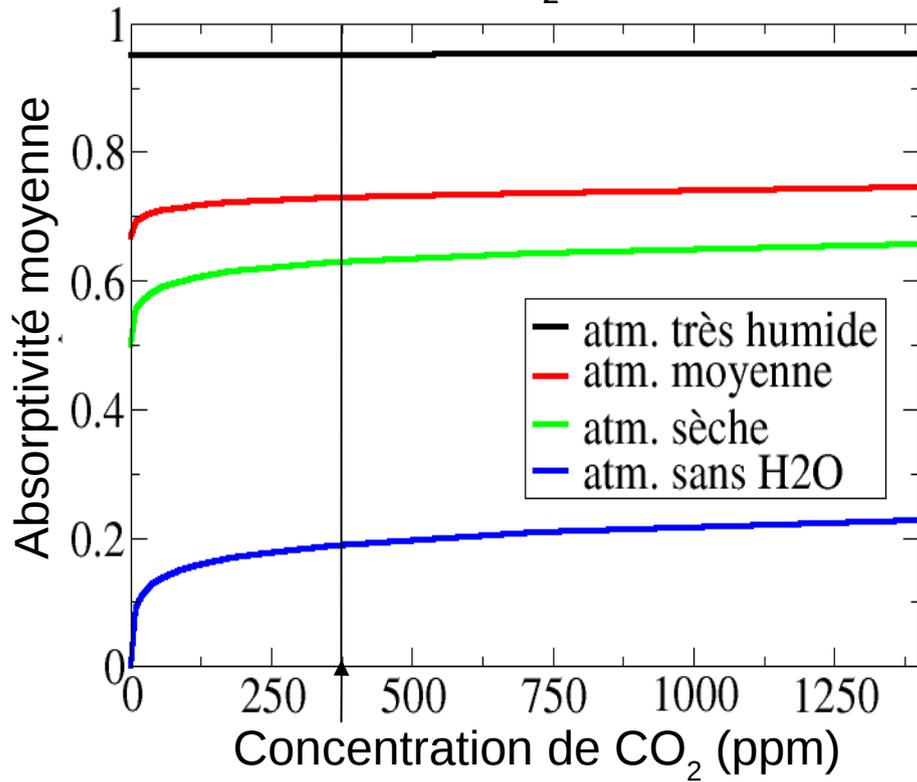
Effet de serre sur Terre : (W.m<sup>-2</sup>) (%)

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

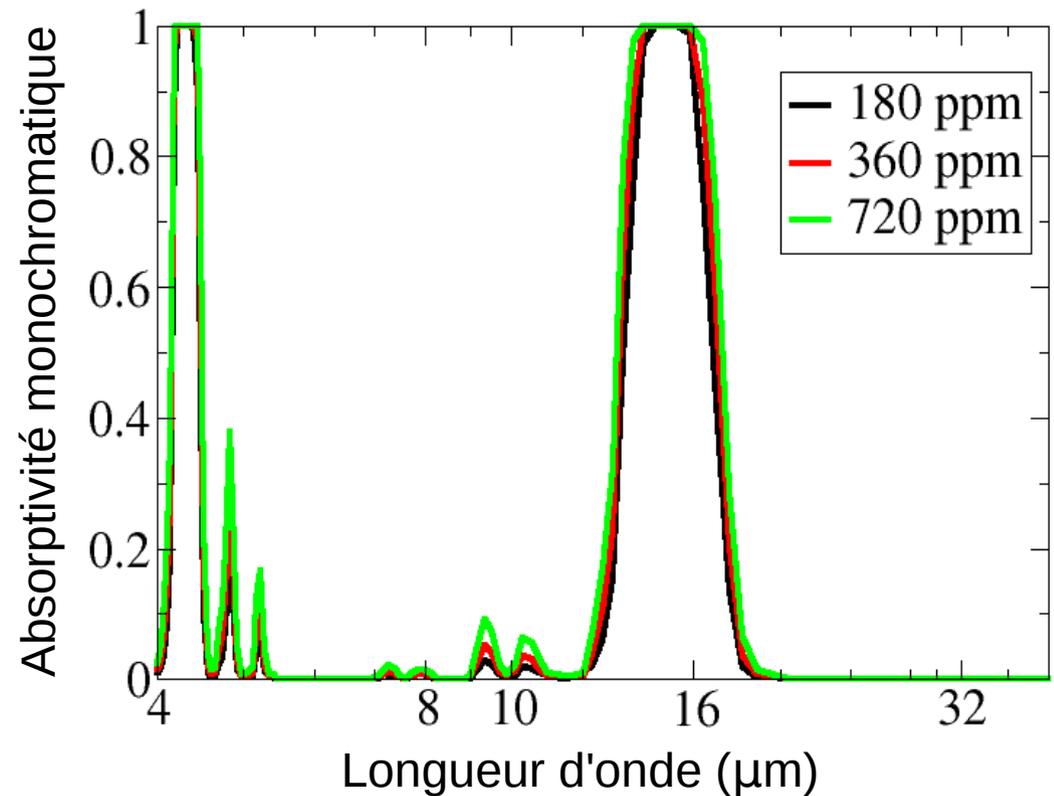


# Effet de saturation

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

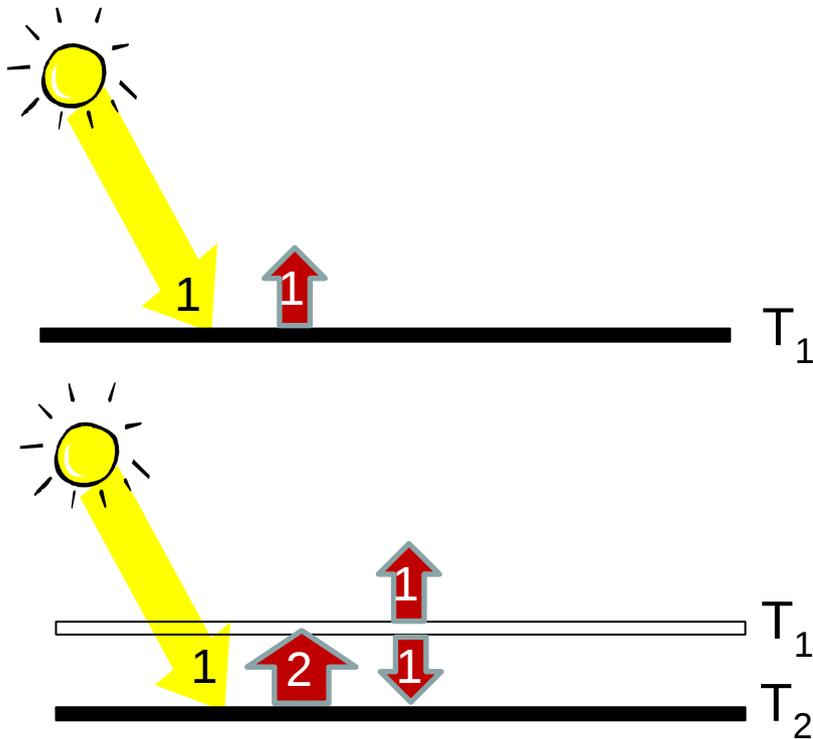


**Absorptivité monochromatique** de l'atmosphère due au seul  $\text{CO}_2$ , en fonction de la longueur d'onde, pour différentes concentrations de  $\text{CO}_2$

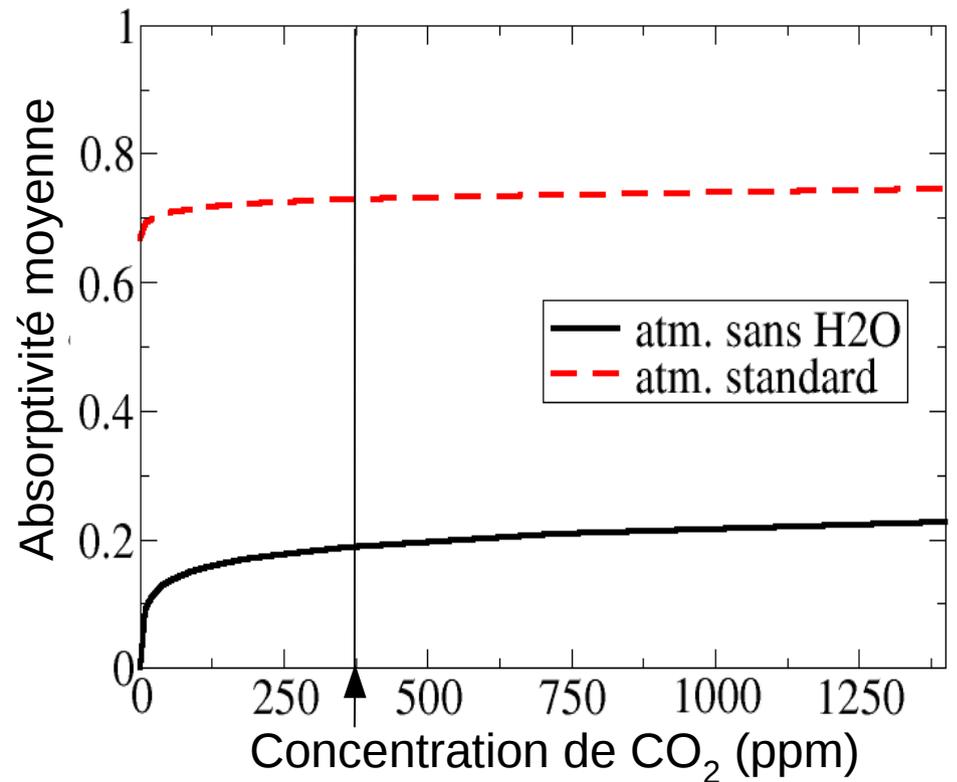


# Accroissement de CO<sub>2</sub> et effet de serre

## L'analogie de l'effet de serre



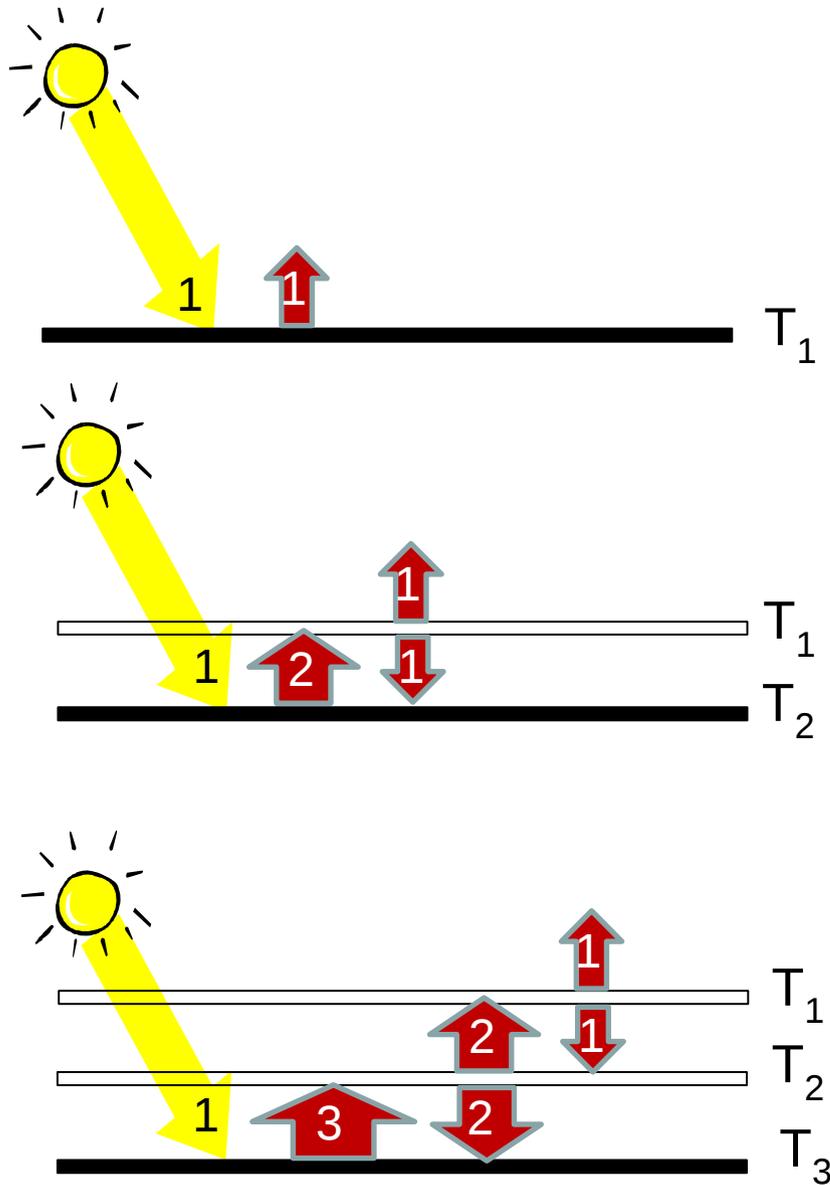
Absorptivité de l'atmosphère en fonction du CO<sub>2</sub>, pour différentes valeurs de H<sub>2</sub>O



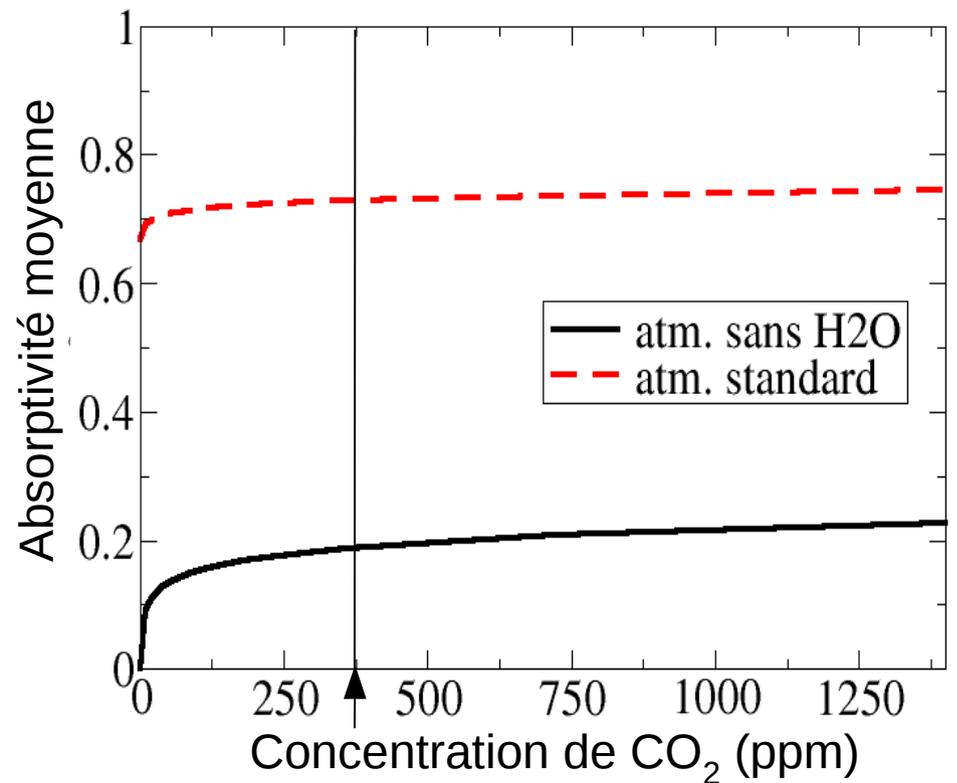
*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

# 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

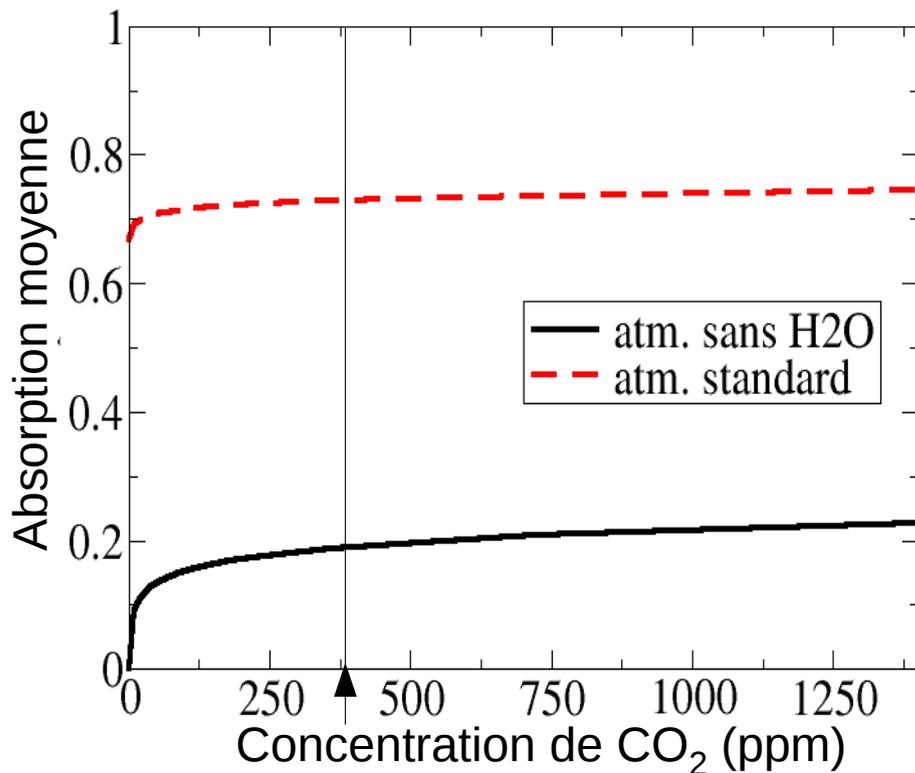


*A-t-on atteint l'effet de serre maximum pour le CO<sub>2</sub>?*

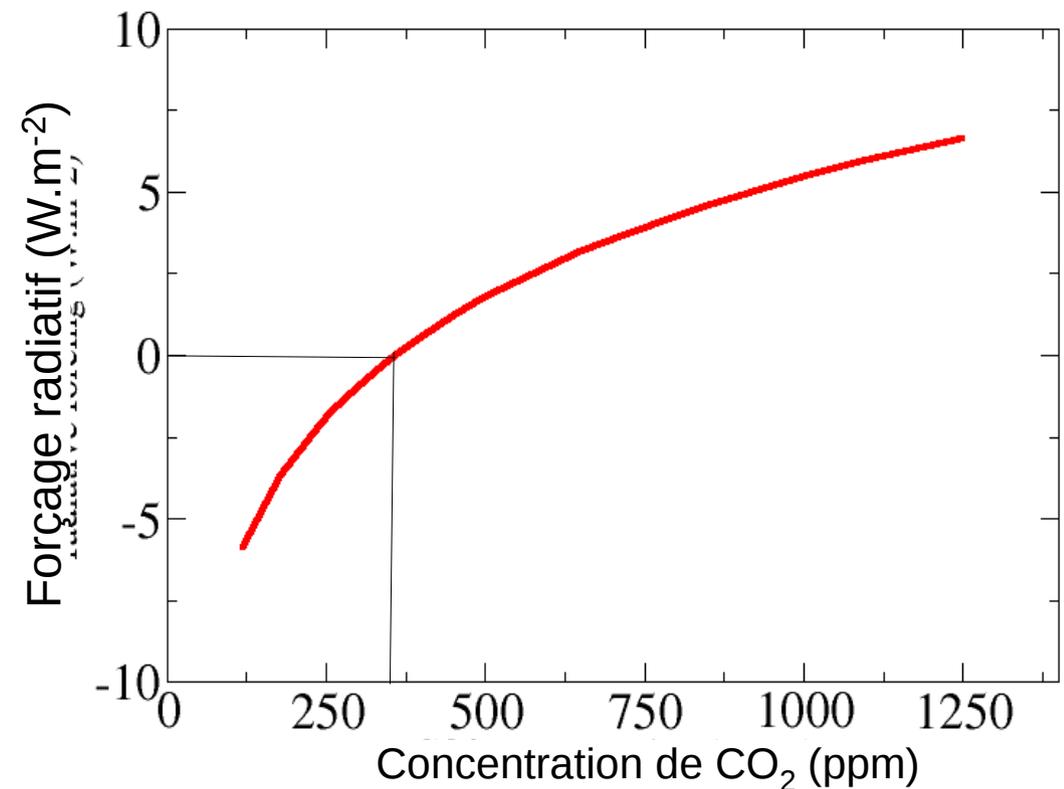
**NON!**

# 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

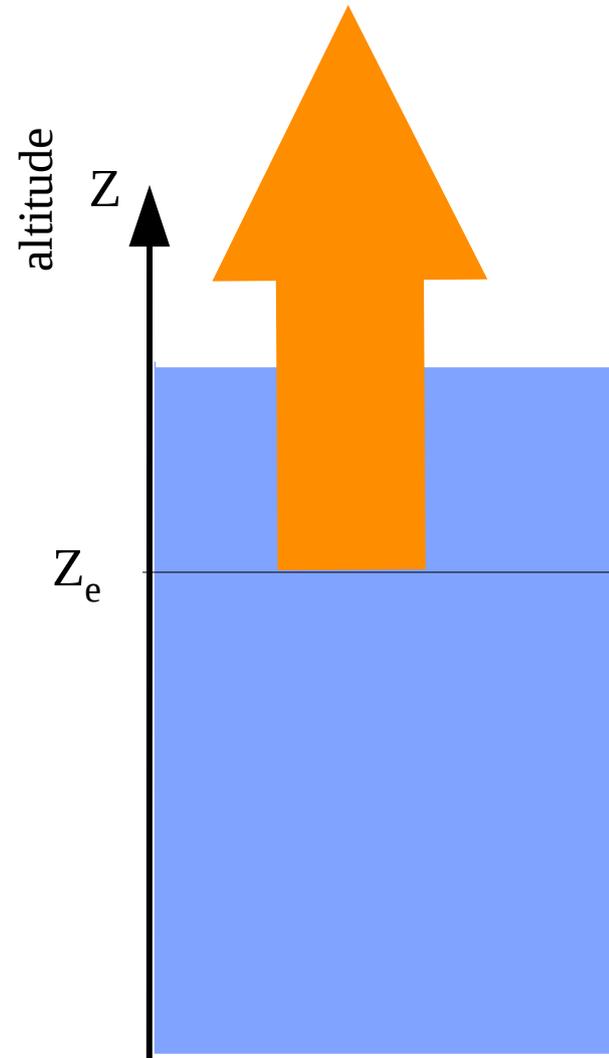
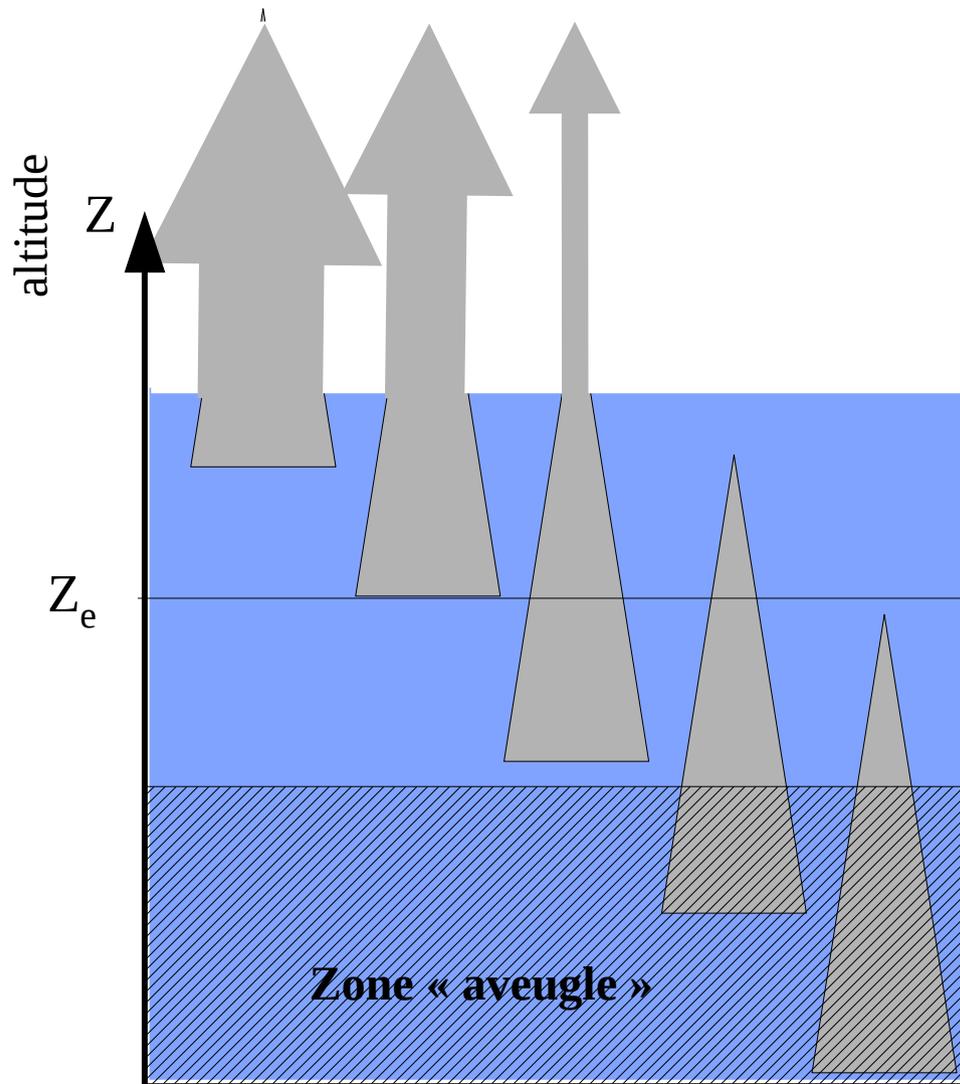


**Variation de l'effet de serre** pour une atmosphère "standard", en fonction de la concentration de CO<sub>2</sub>

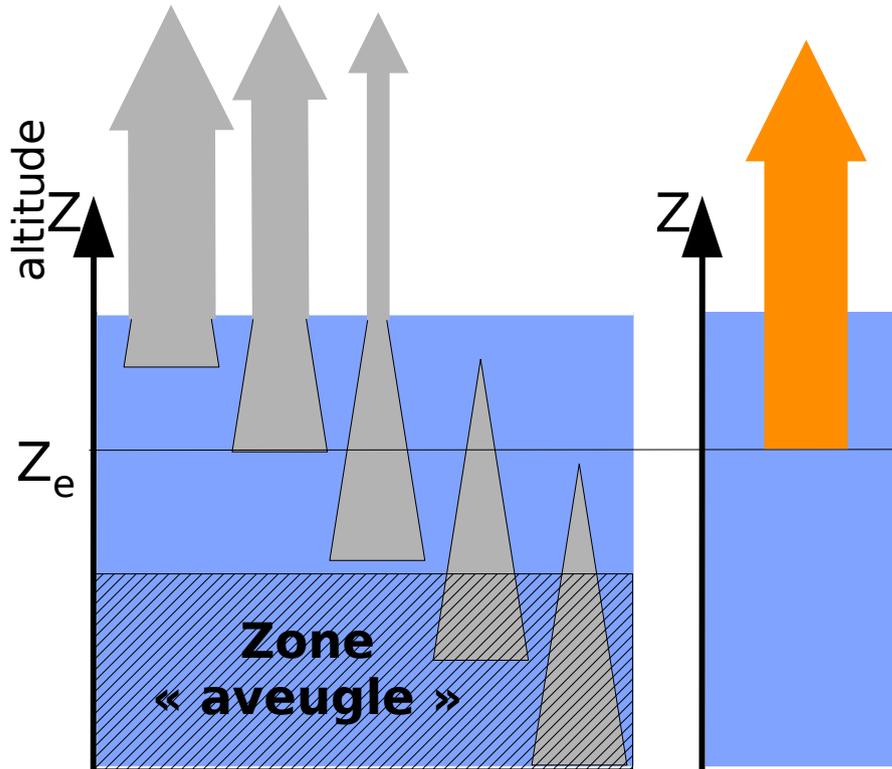


**Même si l'absorption moyenne de l'atmosphère n'augmente pas lorsque le CO<sub>2</sub> augmente, l'effet de serre augmente car l'atmosphère est stratifiée en température**

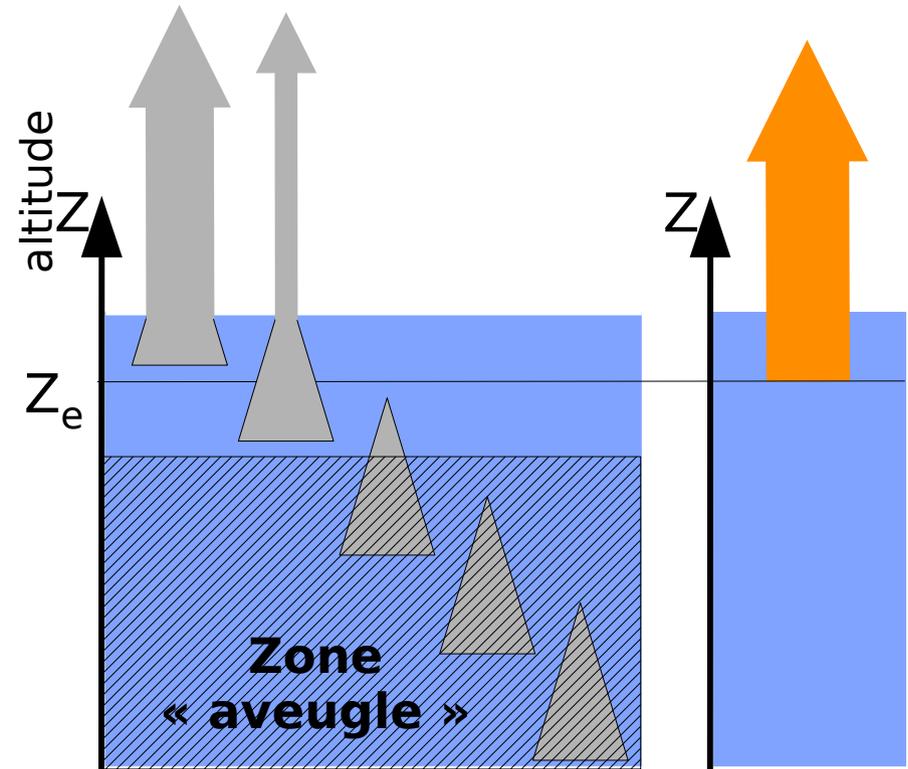
# Altitude d'émission



# Altitude d'émission



**Configuration de référence**



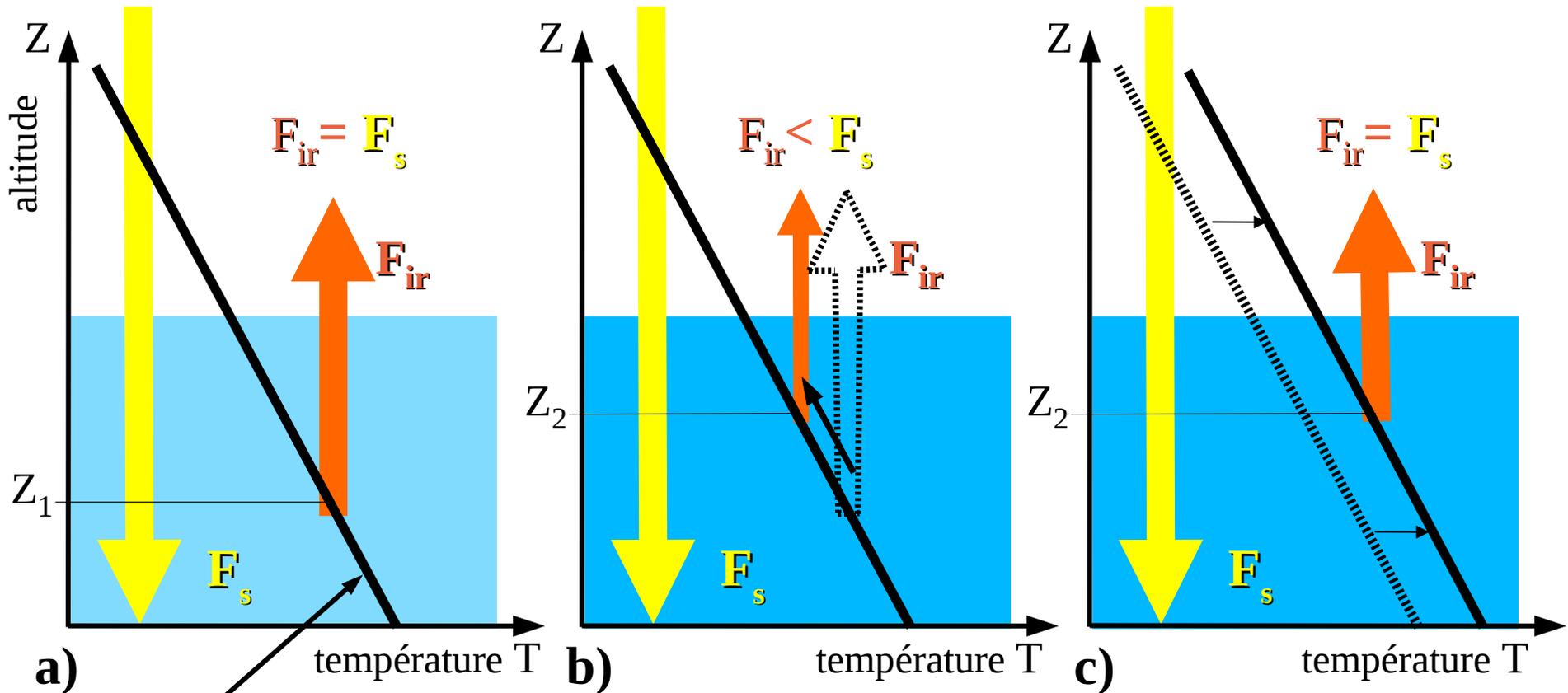
**Doublement de la  
quantité d'absorbant**

**Accroissement quantité d'absorbant ==>**

- **absorption du rayonnement de la surface invariable (toujours environ 100%)**
- **l'altitude d'émission augmente**

# Effet de serre dans une atmosphère stratifiée.

$F_s$  Rayonnement solaire net

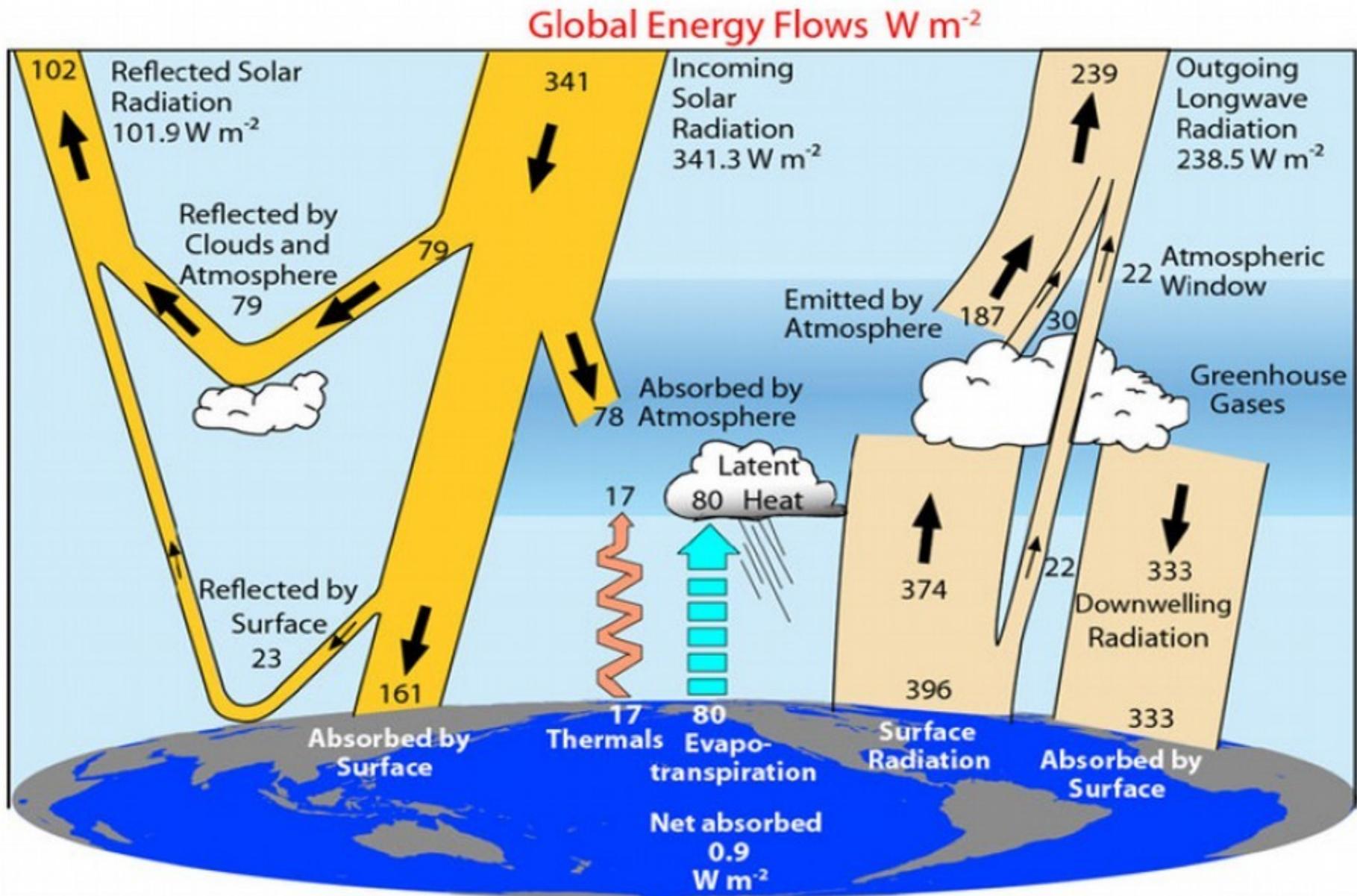


$dT/dz$  fixé  
par convection

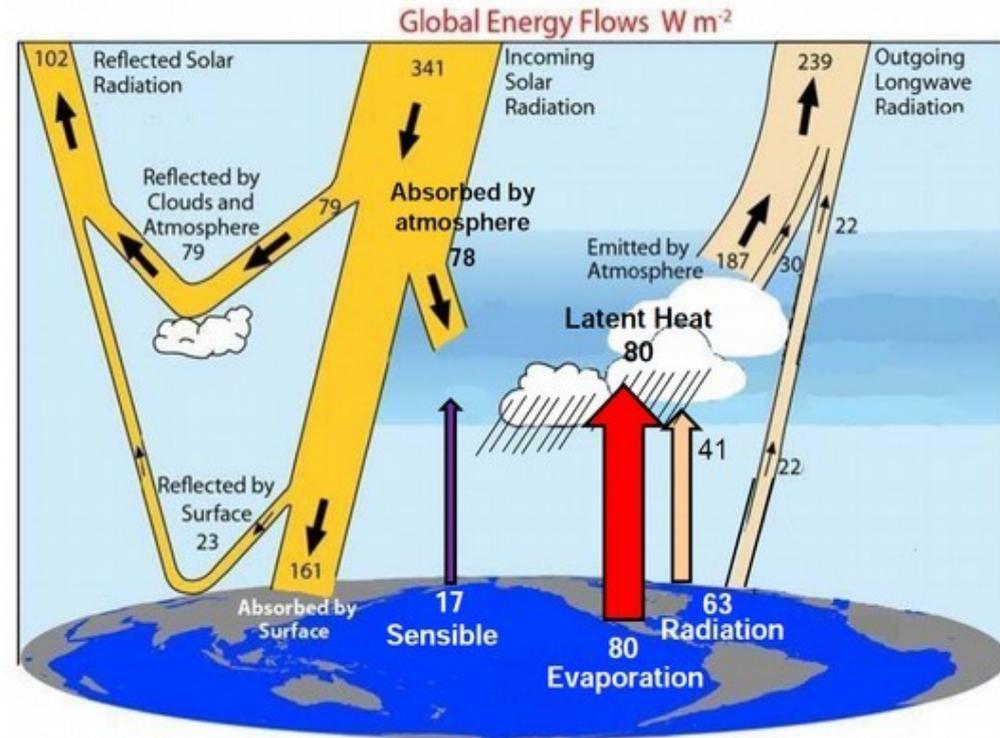
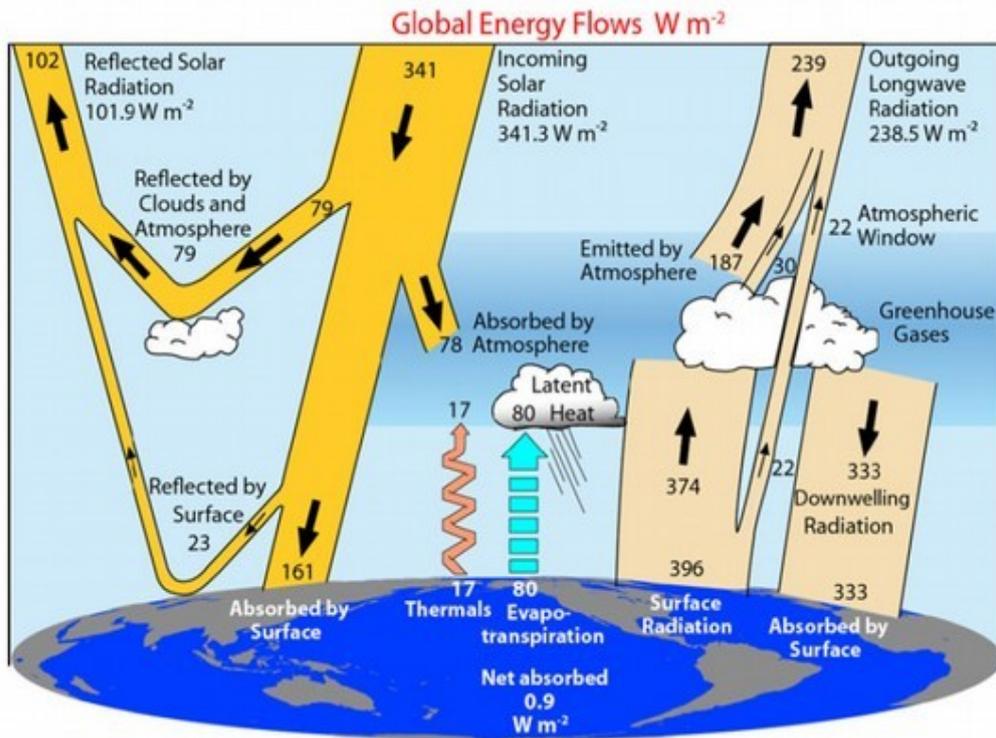
GES ( $CO_2$ ) augmente,  $Z_e$   
augmente,  $T_e$  diminue:  
Rayonnement sortant plus  
faible.

$T(z)$  augmente:  
Retour à l'équilibre

# Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



# Bilan d'énergie de l'atmosphère terrestre



[adapté d'après Trenberth & Fasullo, 2012]

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

# Conclusion 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.

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**

- **II - Modélisation du climat**

Film sur la modélisation

Principes généraux des modèles

- **III - Estimation des changements climatiques**

## 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**

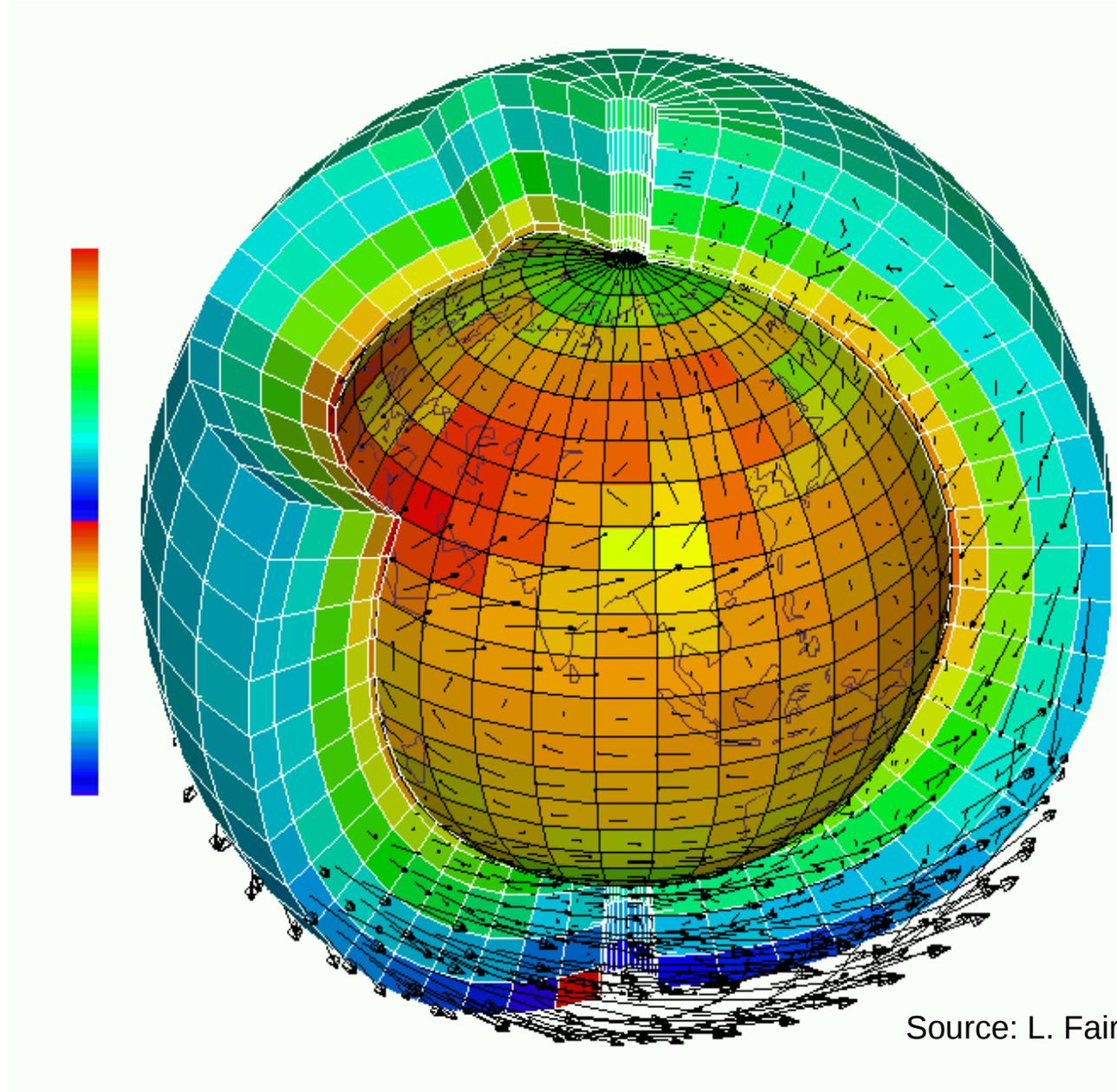
- Système très hétérogène
- Processus fortement couplés, couvrant un spectre très large de temps caractéristiques
- Comportement chaotique

### **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 précipitations sur la France; variabilité à l'échelle de qq années de la température des eaux de surface du Pacifique tropical est [El Niño]; 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 inaccessibles).

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

# Modélisation numérique 3D du climat

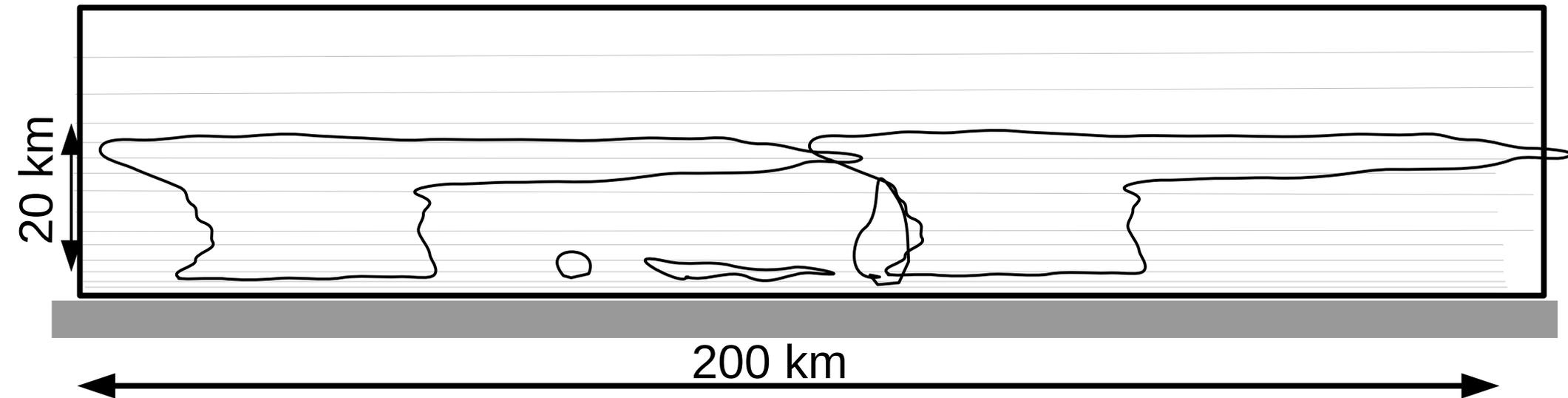


Source: L. Fairhead, LMD/IPSL

# Discrétisation

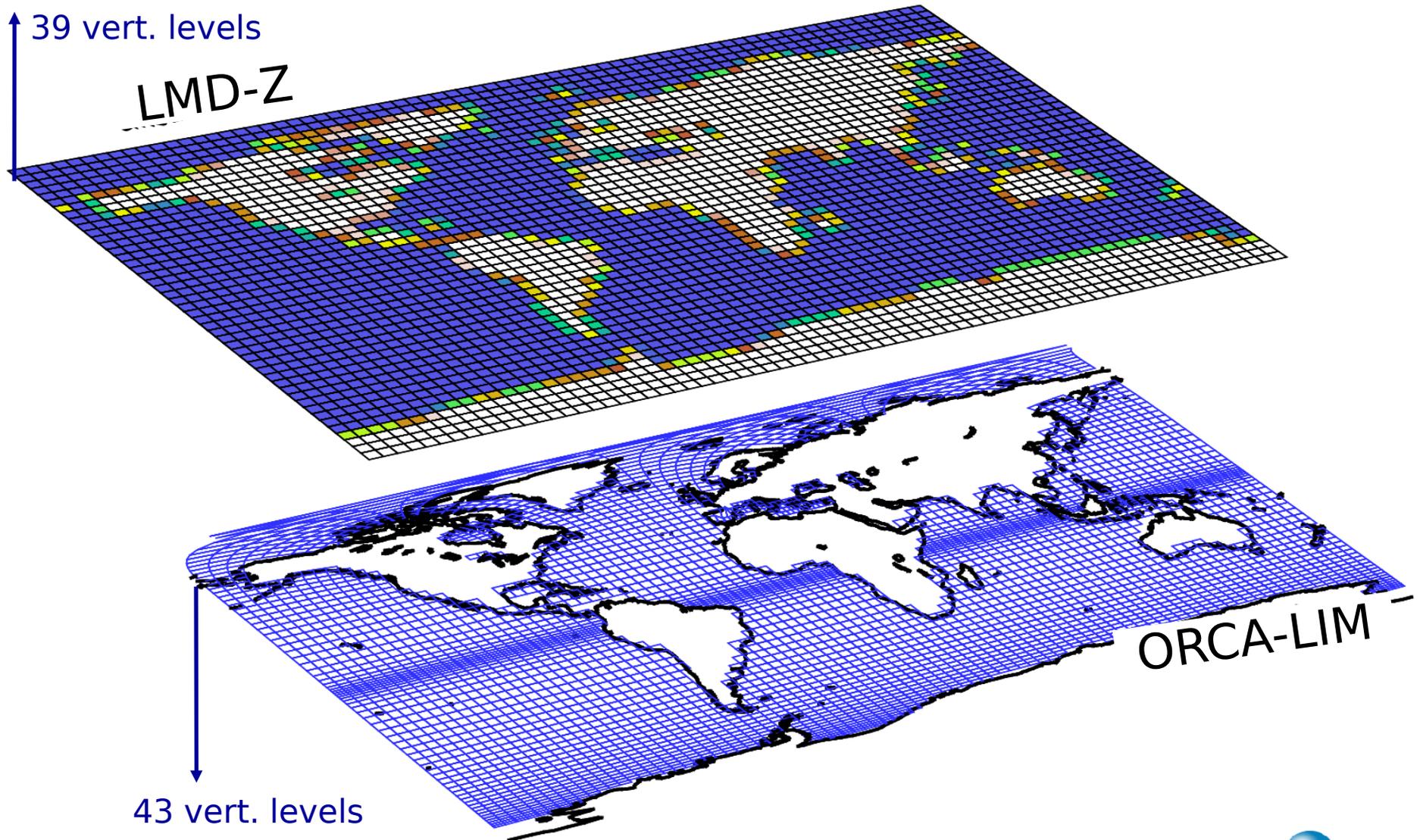
- Incrément temporel : de quelques minutes à une demi-heure, selon la technique d'intégration.
- Grille horizontale : maille allant de 100 à 300 km.
- Grille verticale : maille allant de 50m (ou moins) au niveau du sol, à quelques kilomètres dans la stratosphère.

## Colonne atmosphérique typique:



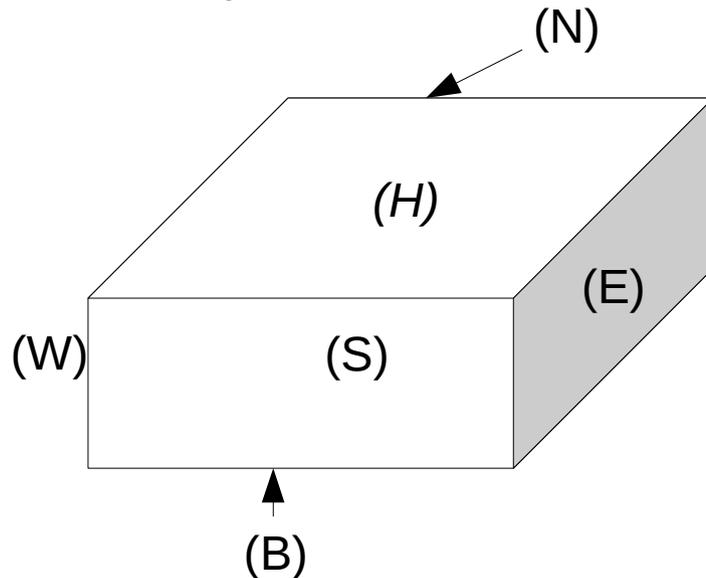
# Couplage avec un modèle de circulation océanique

## 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 :

$U_w A_w q_w Dt$

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

$U$ : vitesse zonale  
 $A$ : aire de la face  
 $q$ : humidité (kg/kg)  
 $Dt$ : pas de temps

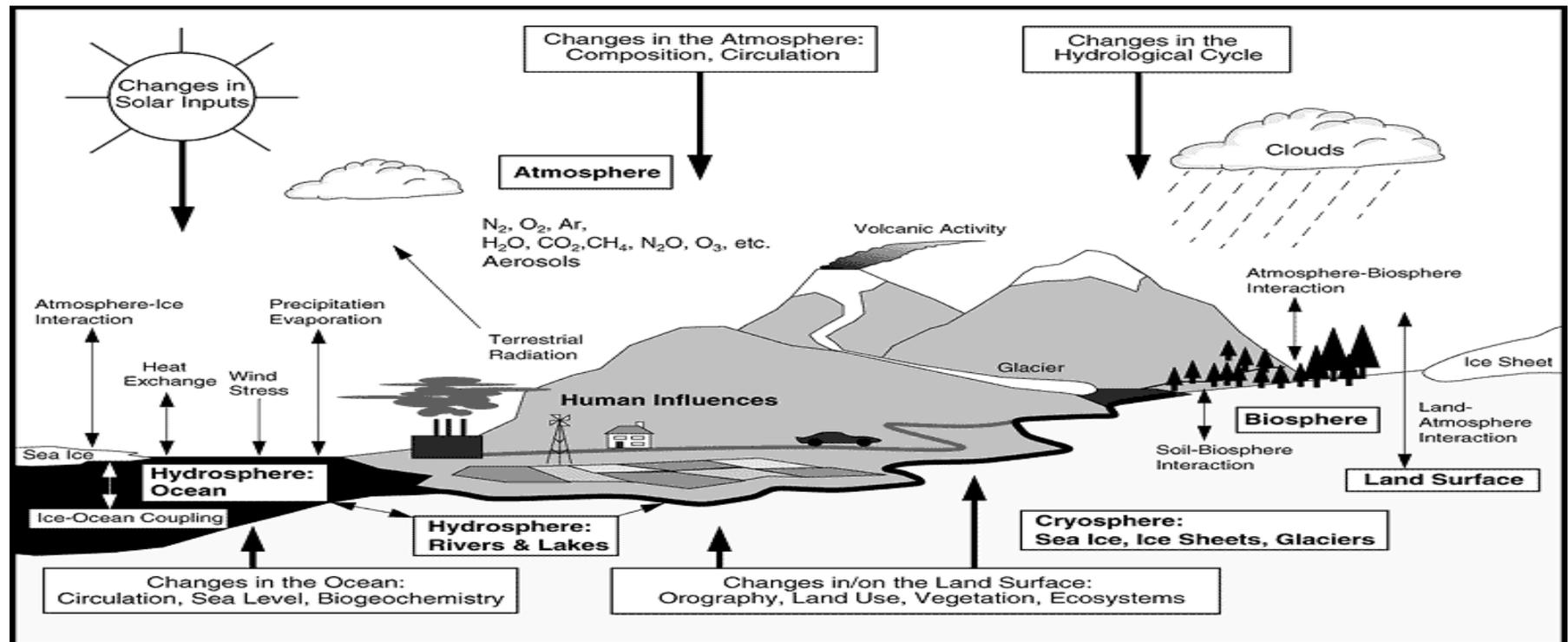
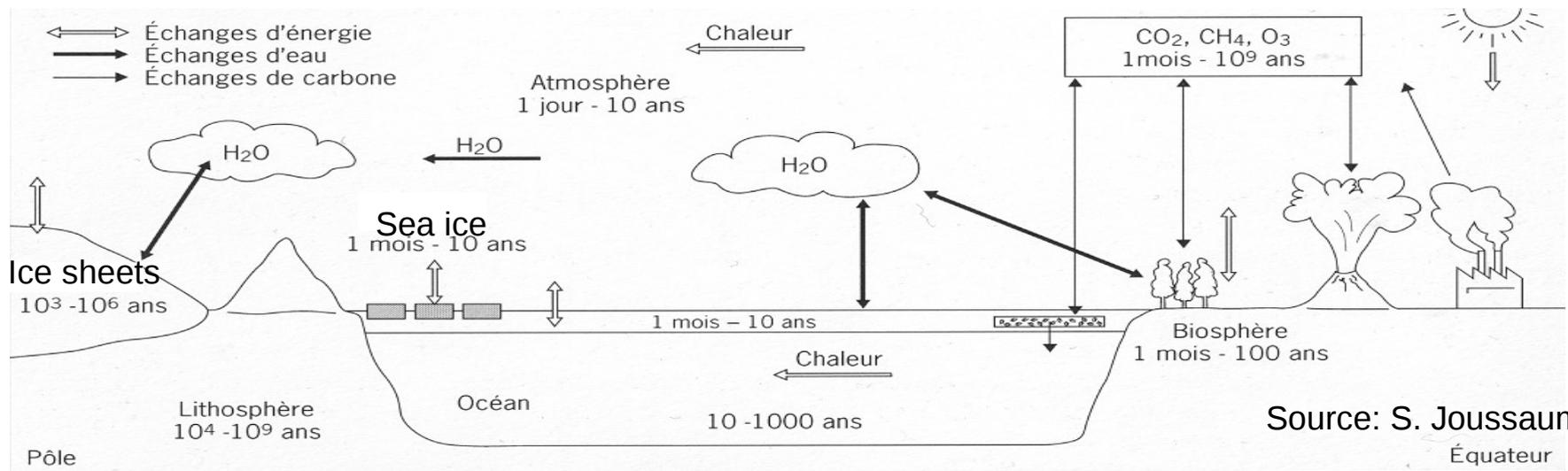
Avec des équations analogues pour la température et les vitesses (en un peu plus compliqué : forces de Coriolis et de pression).

# 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).
- Echanges 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).

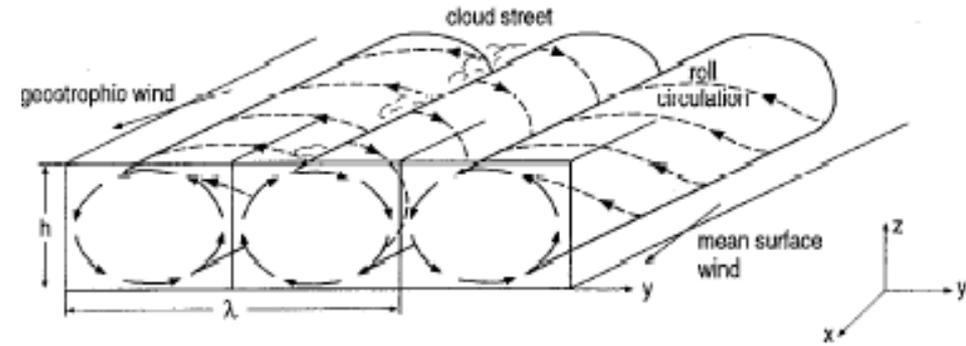
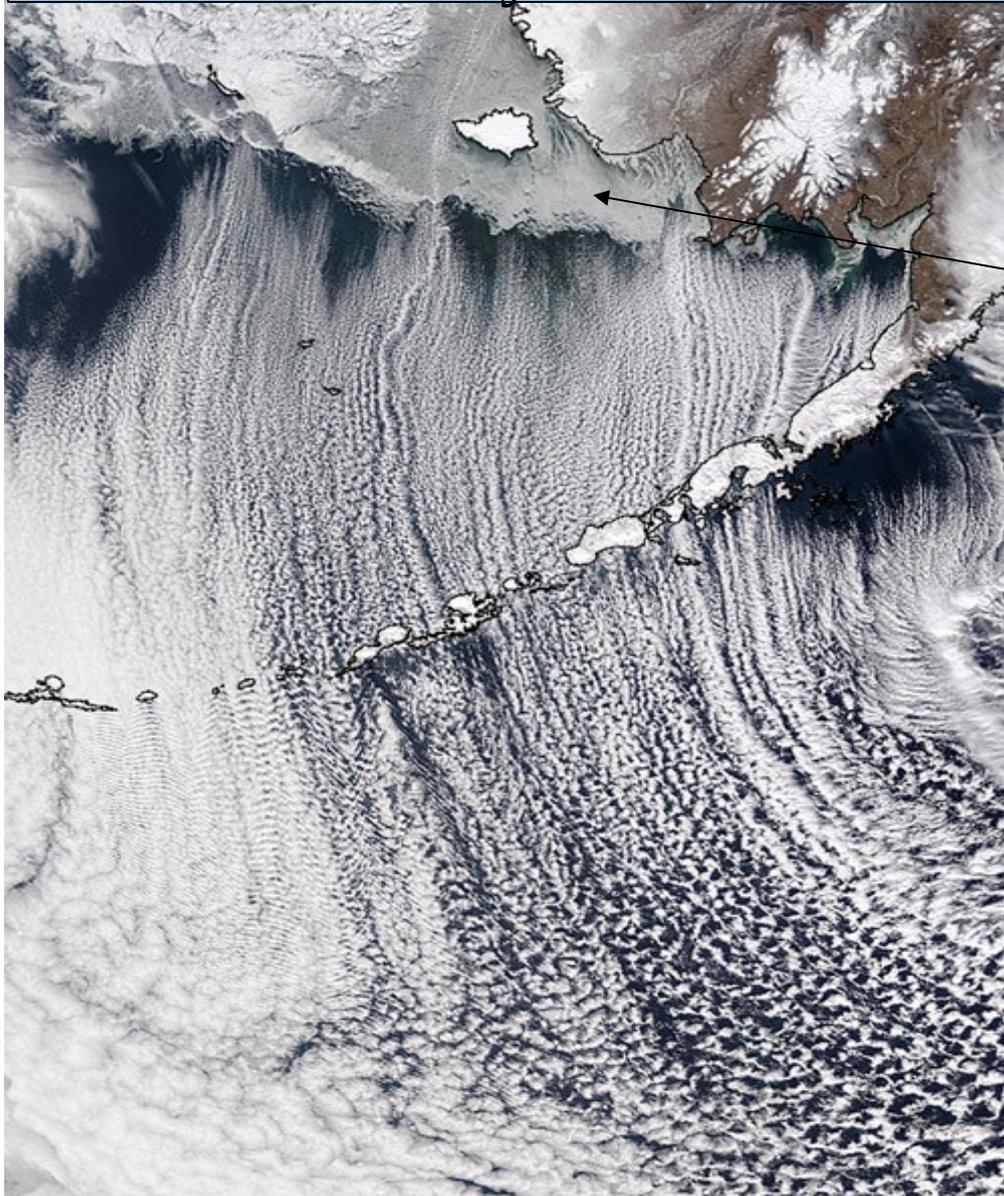
La façon de voir de Charney semble fonctionner, vraisemblablement parce que les "dynamiques" sont les parties les plus solides, les plus théorisées, des modèles climatiques.

# 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.

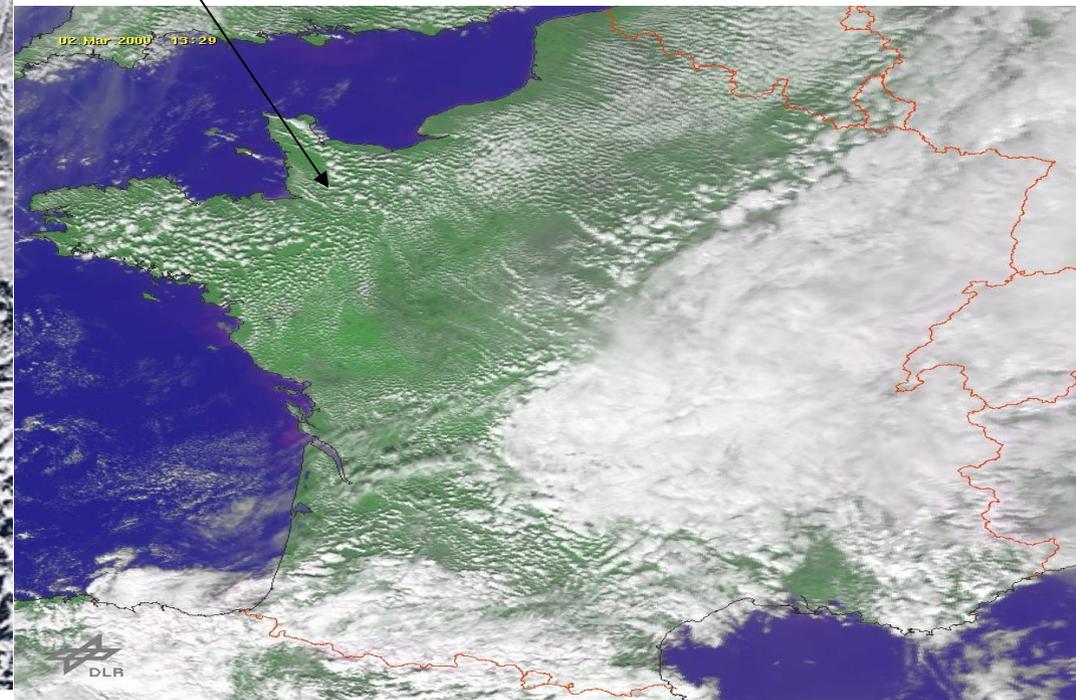
**Exemple de paramétrisation physique :  
Les paramétrisations de couche limite**

**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.



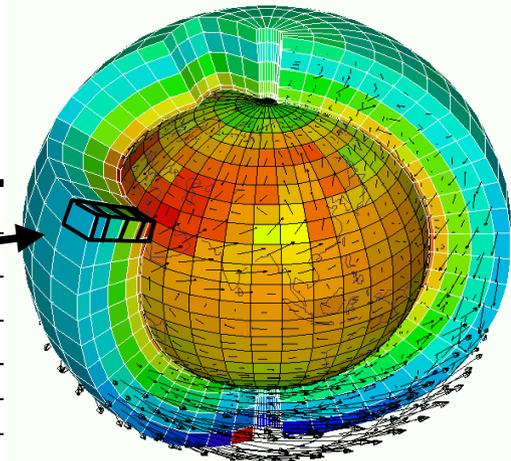
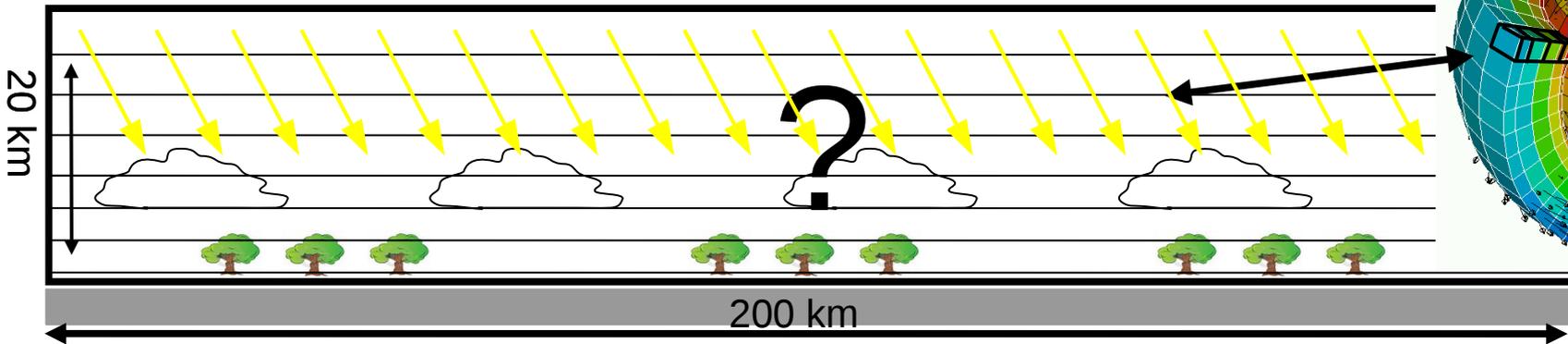
continent.

# Parametrizations

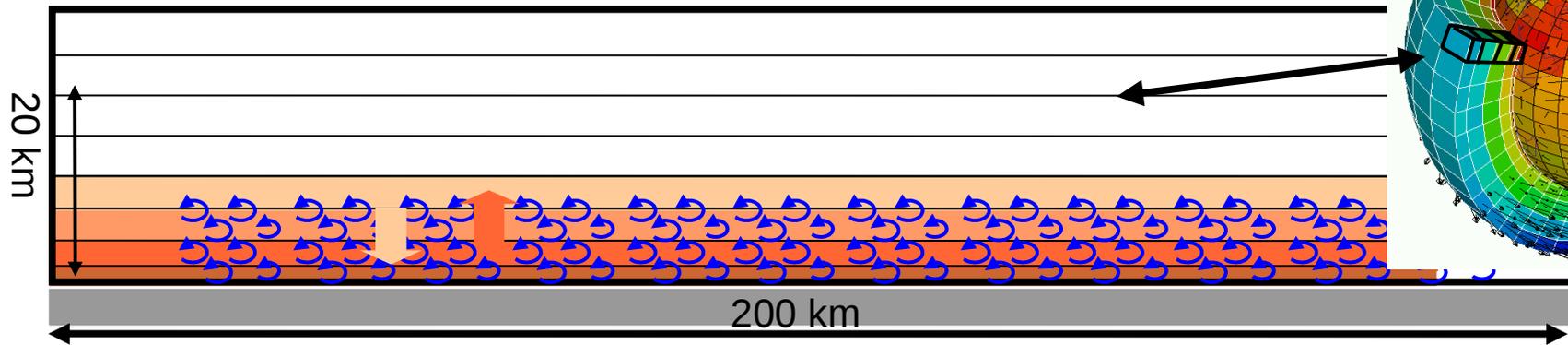


- Determine the **effect of sub-grid processes** on the **state variables** (velocity, temperature, humidity) of the global model
- **Approximate description** of the behaviour of processes
- Making use of **internal variables** (cloud features, sub-grid statistical distribution of some variables ...)
- 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.

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

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

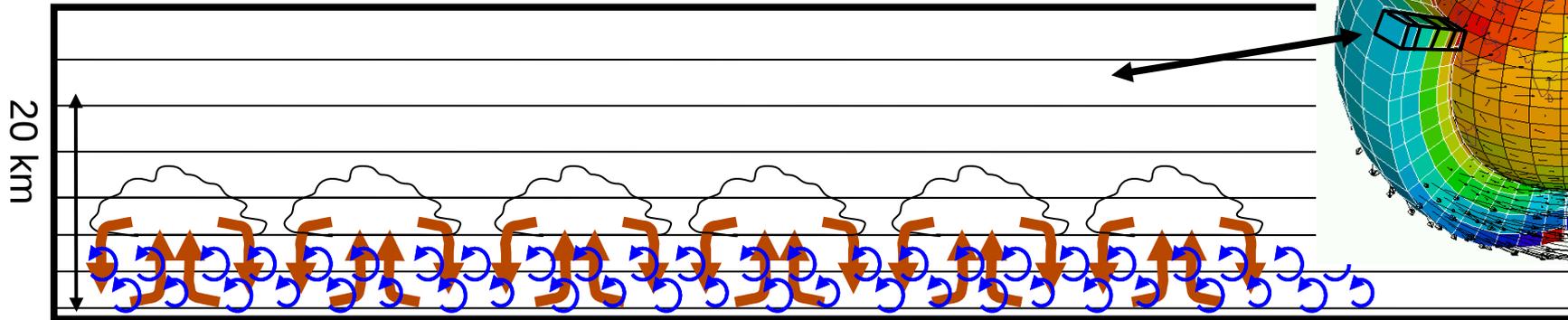
$$De/Dt = f(dU/dz, d\theta/dz, e, \dots)$$

$$Dl/Dt = \dots$$

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



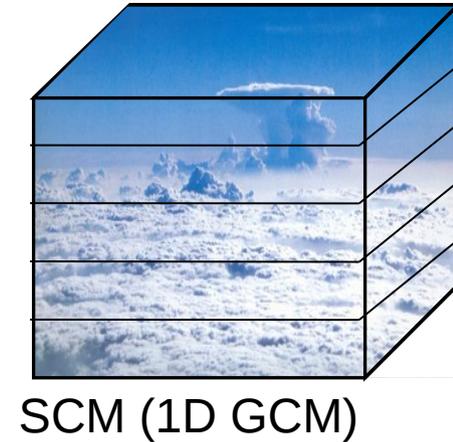
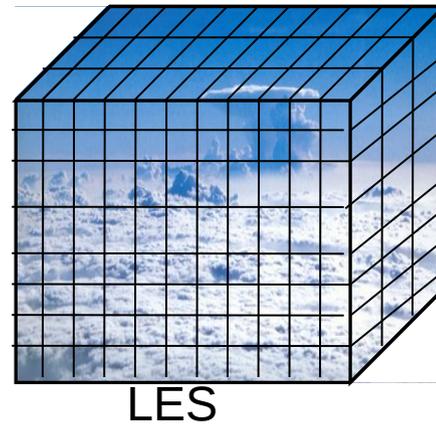
**“The Thermal Model”:**

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

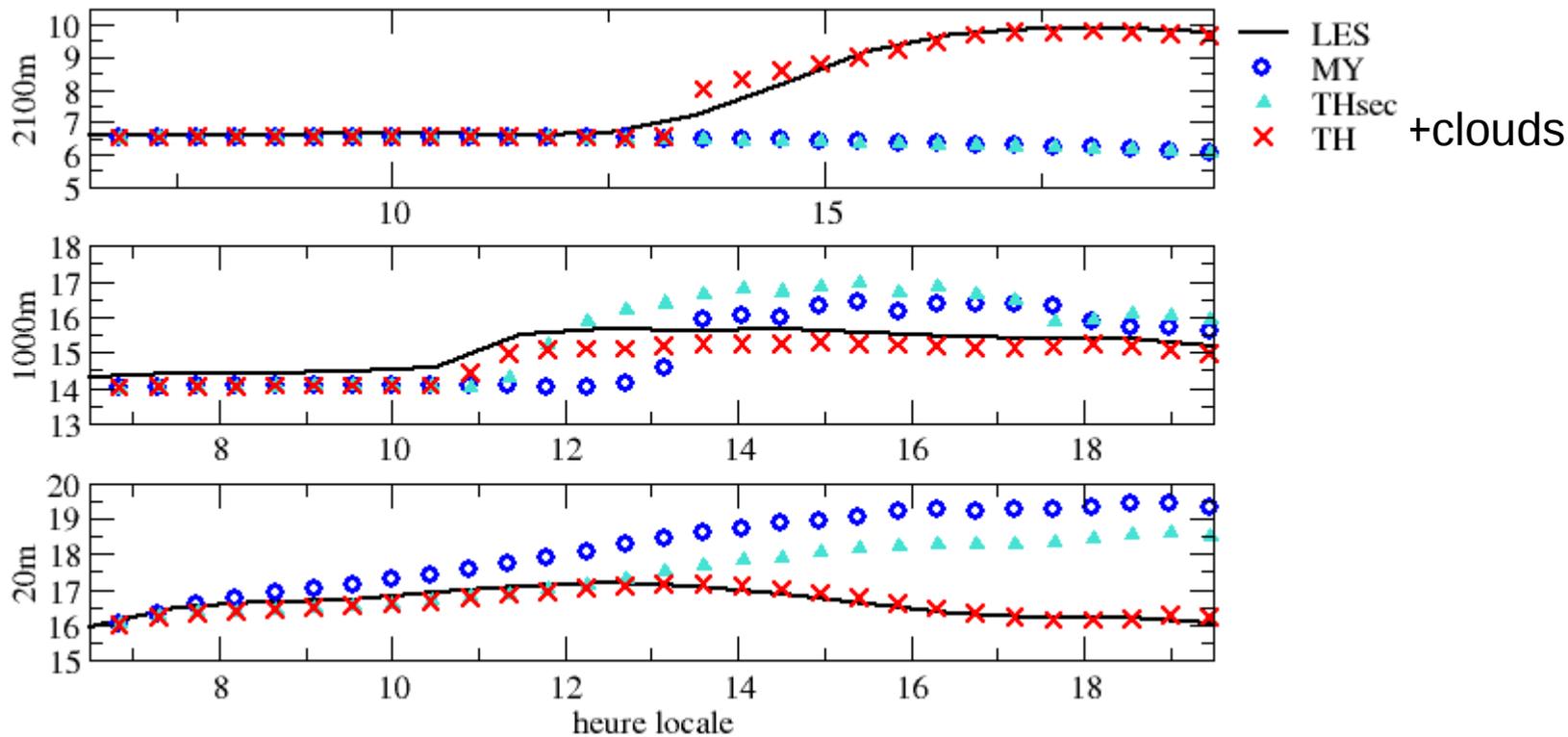
The model represents a mean plume  
(the thermal) and a mean cloud.

# 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)



- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**
  - Climat présent et passé
  - Climat futur
  - Variabilité interne

Comment peut-on prévoir le climat dans 100 ans alors que l'on ne peut pas prévoir le temps qu'il fera au-delà de 10 jours ?

Le climat n'est pas le temps qu'il fait à un moment donné, mais les caractéristiques statistiques des conditions météorologiques en un lieu donné.

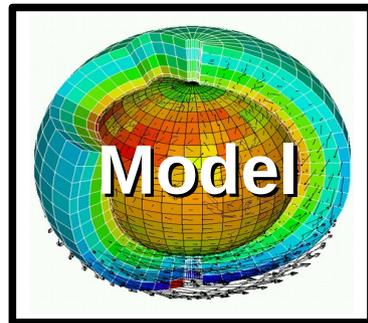
**Le climat n'est pas prévisible à l'échelle du siècle, mais sa perturbation par l'accroissement anthropique de [CO<sub>2</sub>] l'est.**

Il reste néanmoins des questions ouvertes (bifurcation, etc.)

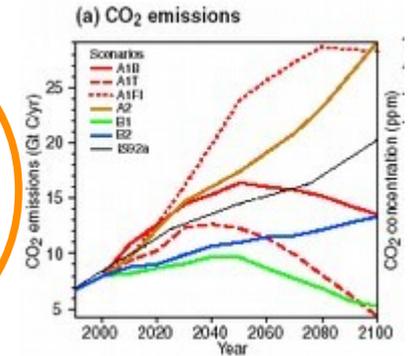
# Simulations climatiques

**Conditions initiales**  
température,  
humidité,  
salinité,  
etc.

**Forçages:**  
ensoleillement,  
gaz à effet de  
serre, etc.



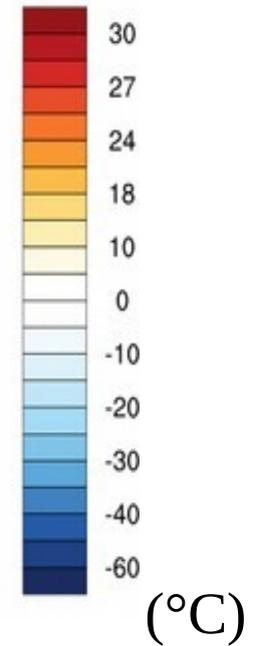
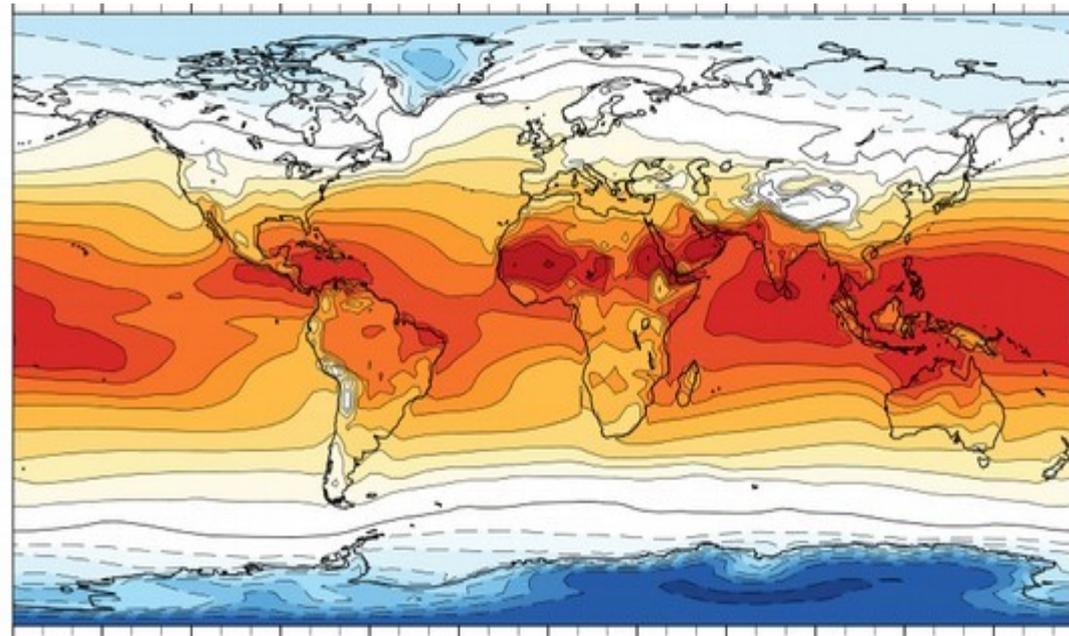
**Résultats**  
température,  
vapeur d'eau,  
vent, courants,  
salinité  
etc.



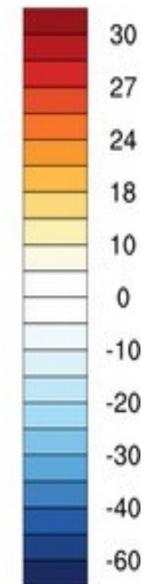
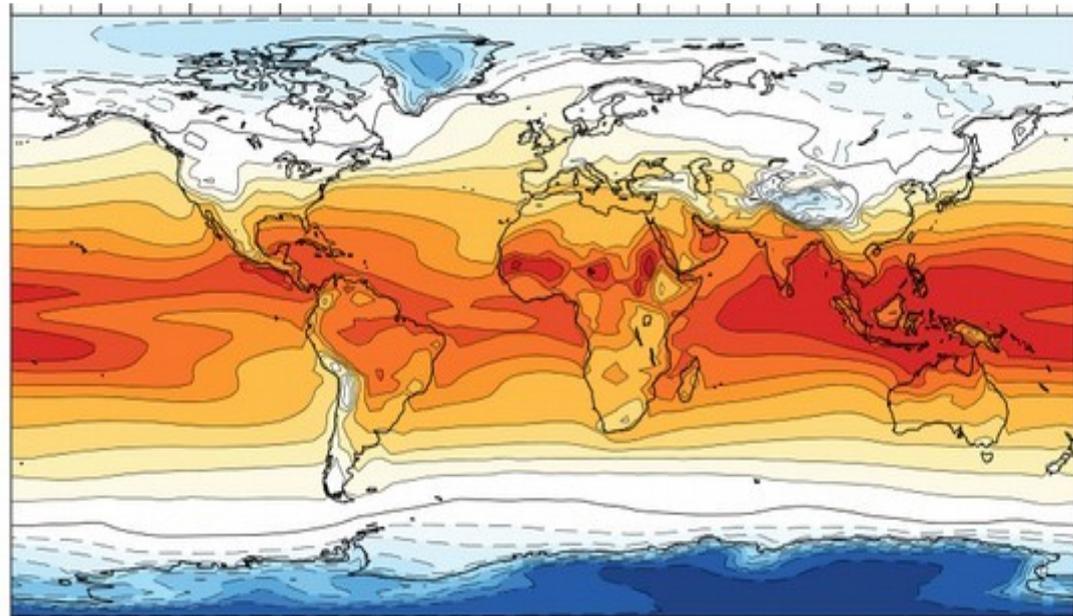
# Comment les modèles simulent le climat d'aujourd'hui ?

## Température de l'air en surface, moyenne annuelle

**Observations**



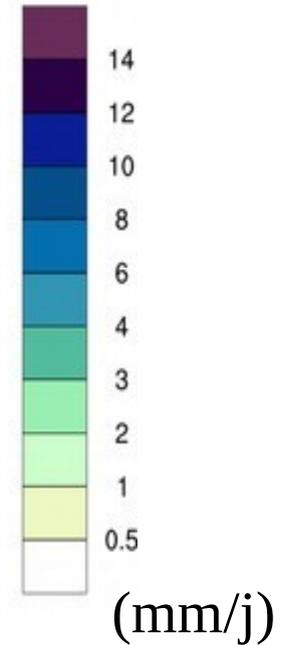
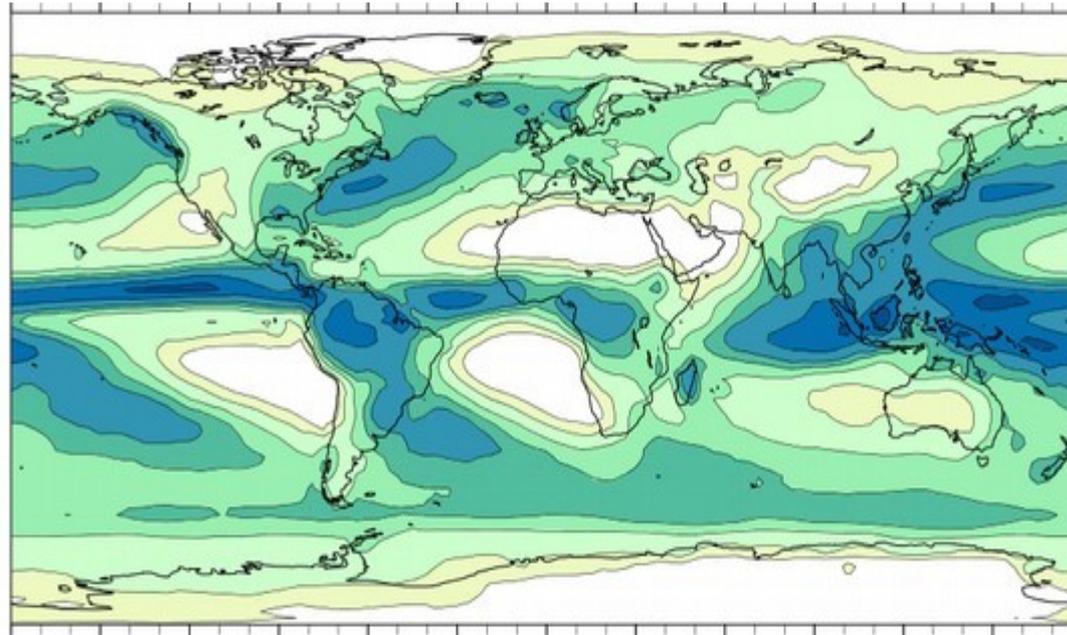
**Modèle  
IPSL**



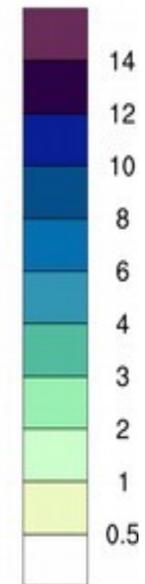
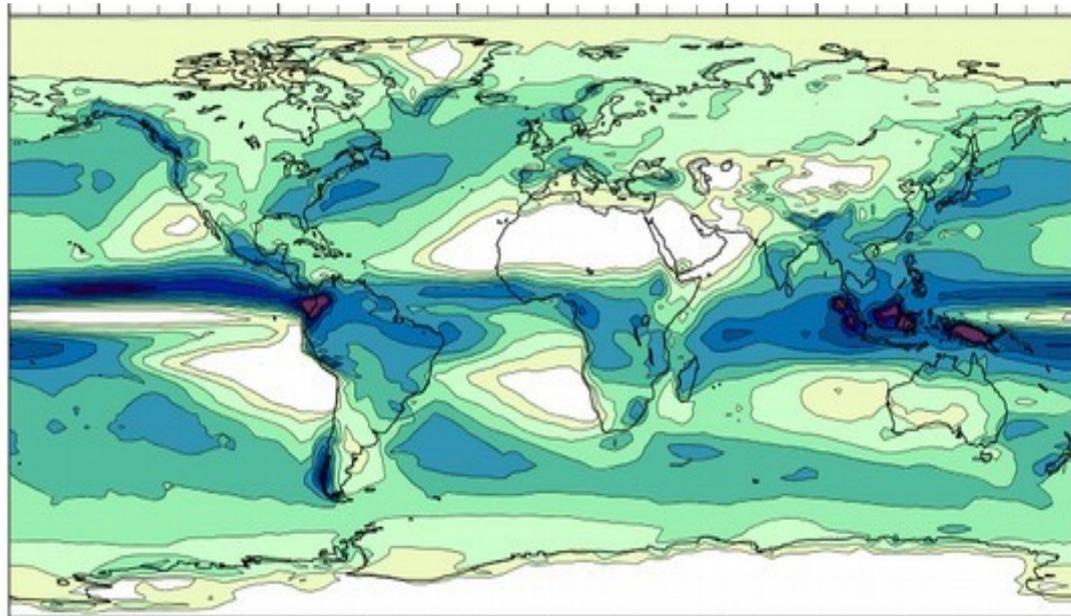
# Comment les modèles simulent le climat d'aujourd'hui ?

## Précipitations (pluie + neige), moyenne annuelle

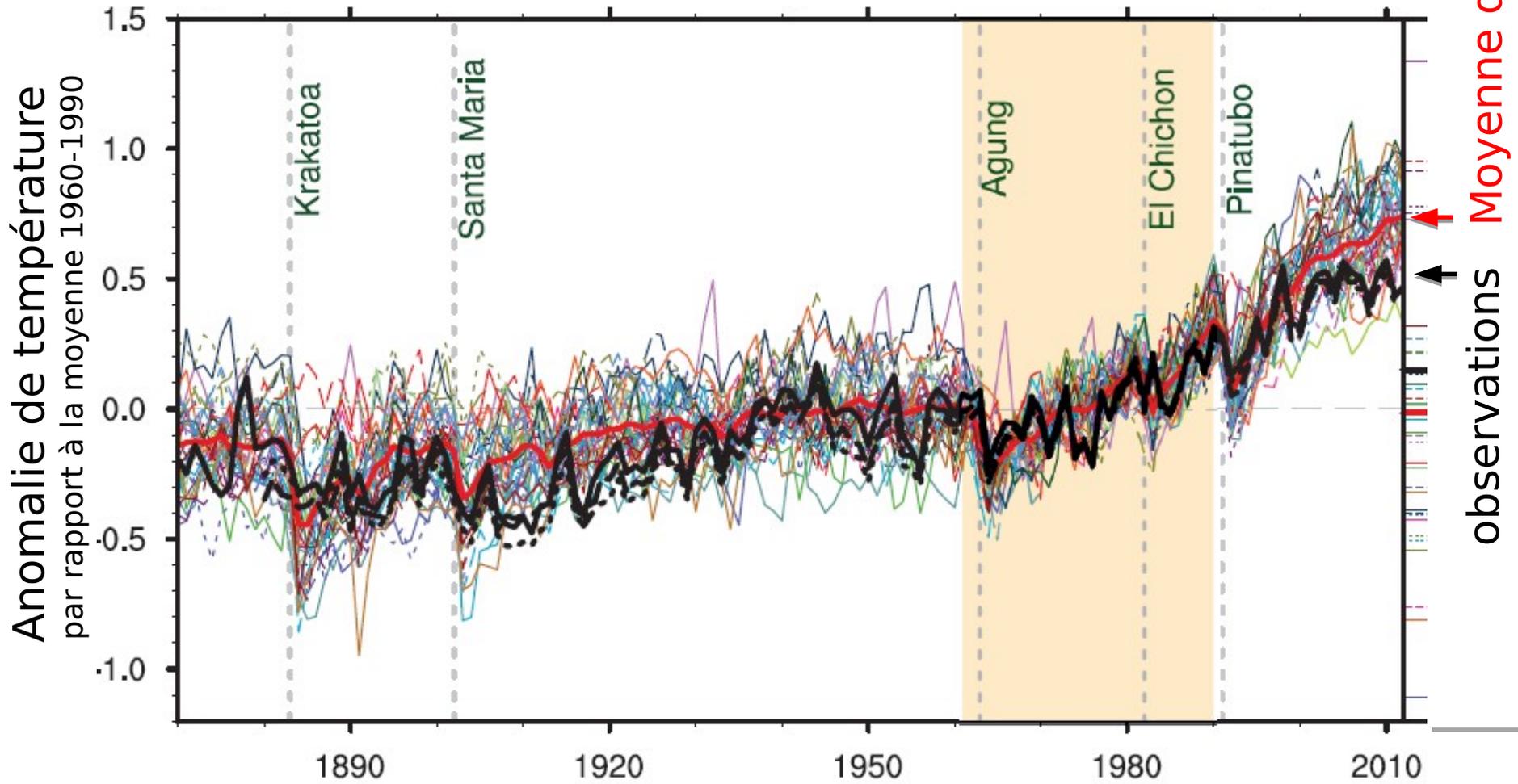
**Observations**



**Modèle  
IPSL**

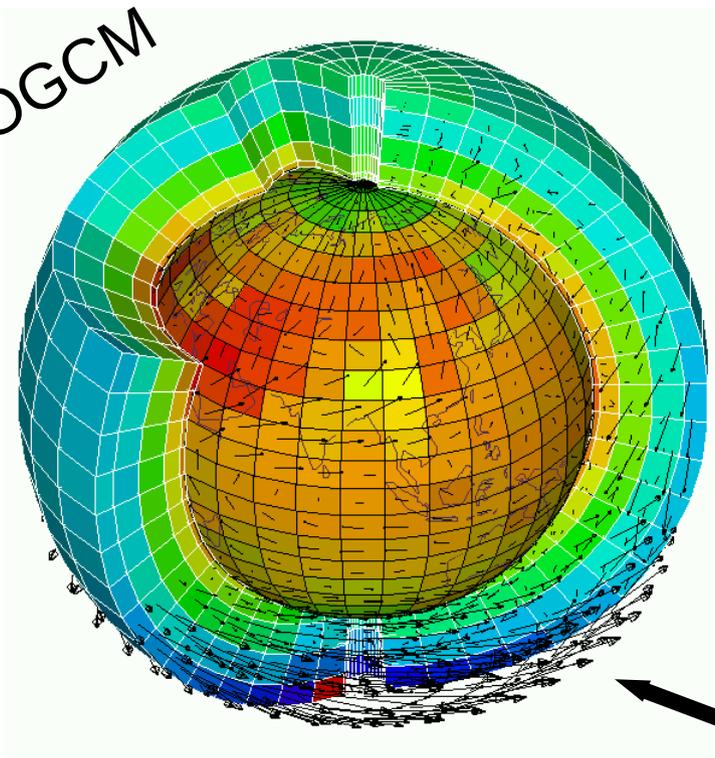


# Simulation de l'évolution récente du climat

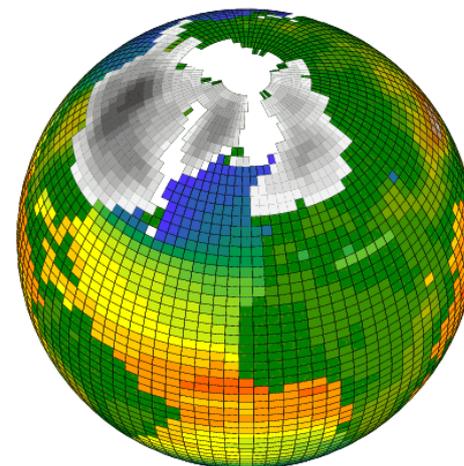


# Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

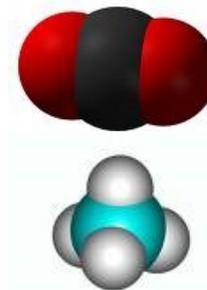
AOGCM



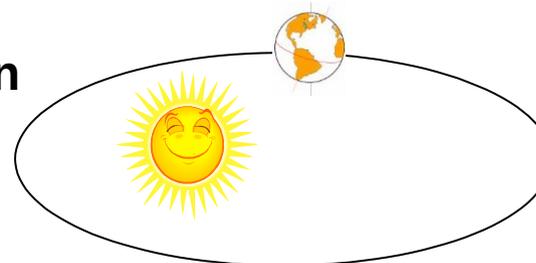
Calottes  
glaciaires



Composition  
atmosphérique  
CO<sub>2</sub>: 185 ppm  
CH<sub>4</sub>: 350 ppb...



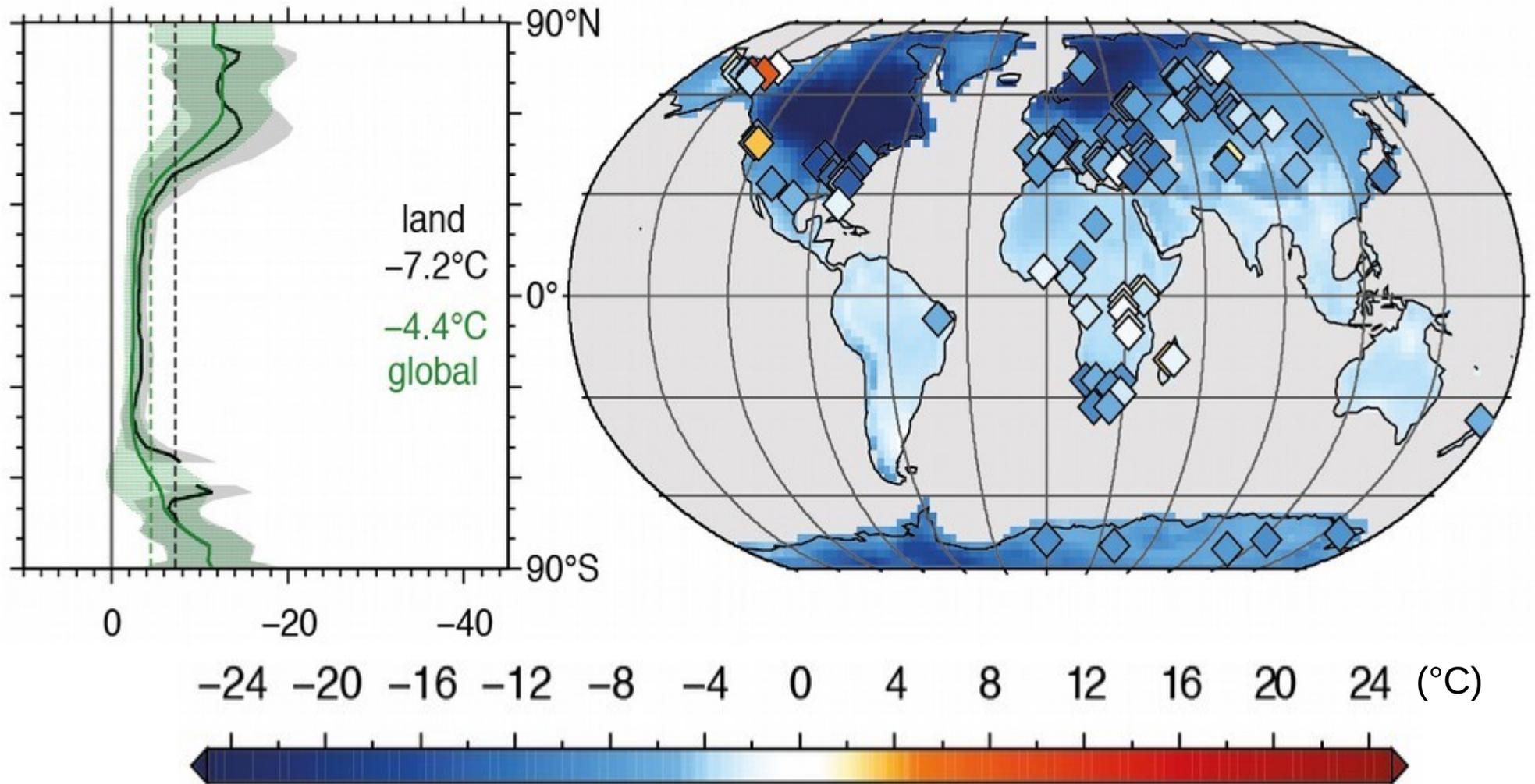
Insolation  
21ky BP



Forçage en gaz à effet de serre ~ climat futur  
Autre forçage majeur: calottes glaciaire

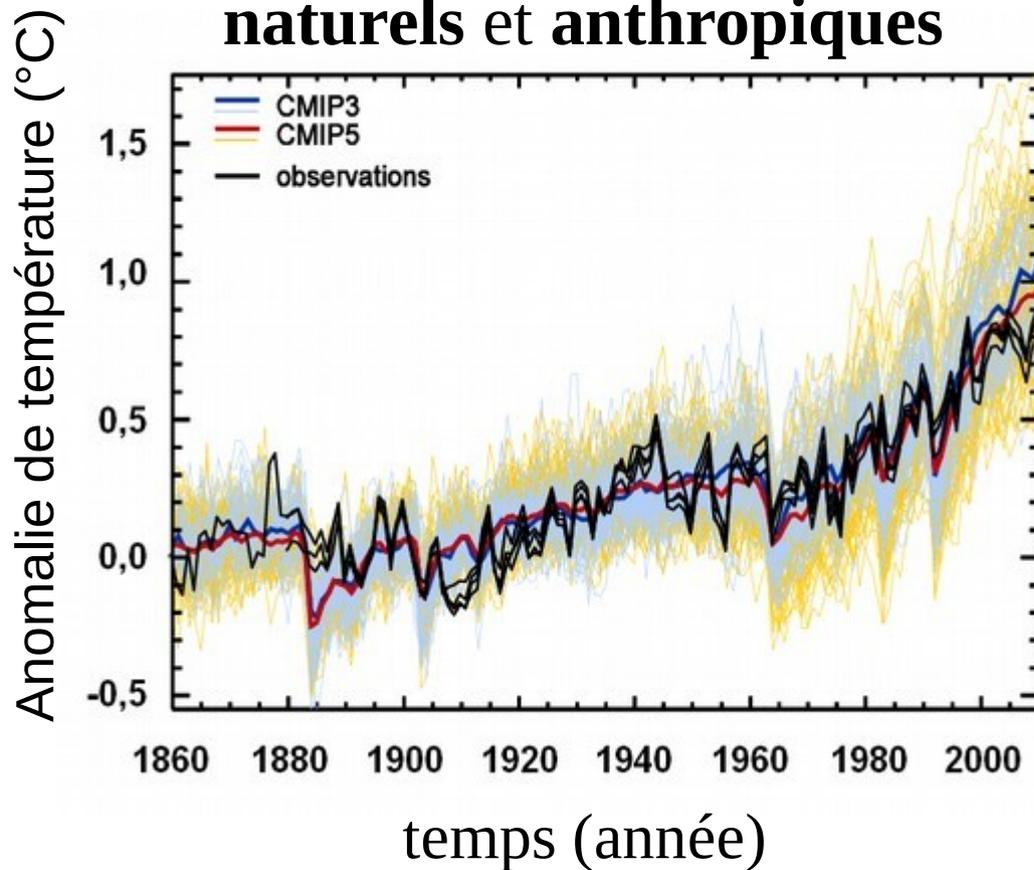
# Simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire

**Changement de température sur les continents** simulé par les modèles de climat et estimé d'après les observations

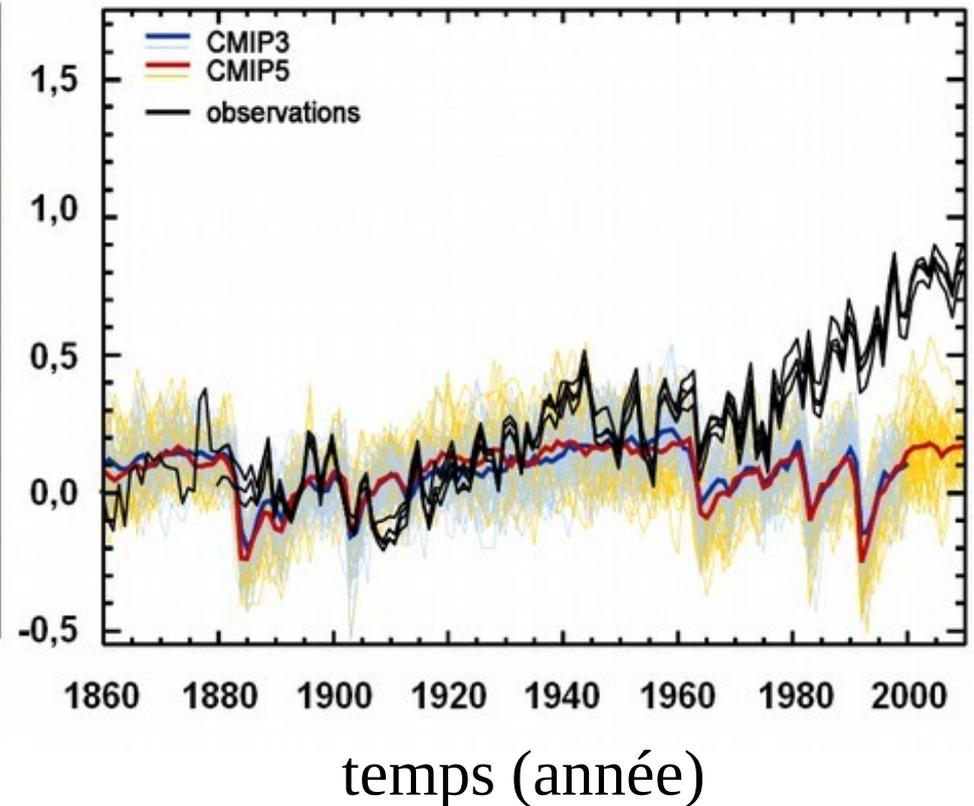


# Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

Simulations avec **forçages naturels et anthropiques**



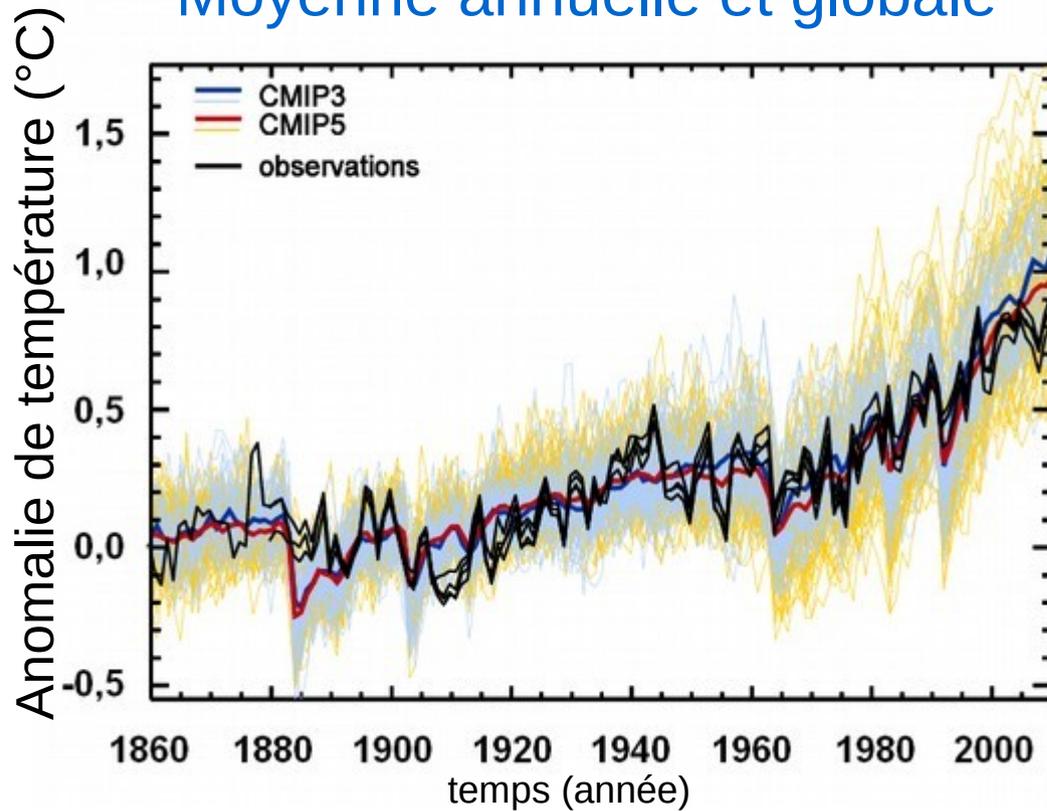
Simulations avec **forçages naturels seulement**



# Évolution récente de la température de surface : observations et simulations

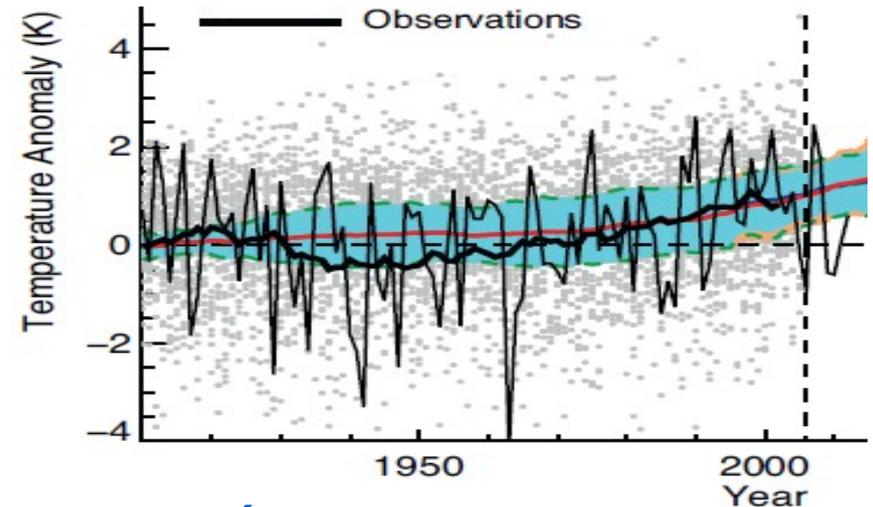
Simulations avec **forçages naturels** et **anthropiques**

Moyenne annuelle et globale

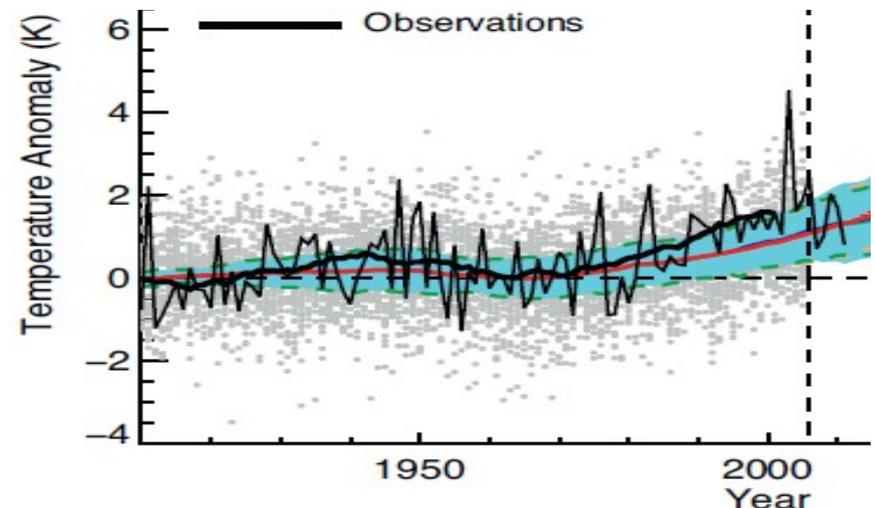


[GIEC, 2013]

Hiver sur la France



Été sur la France

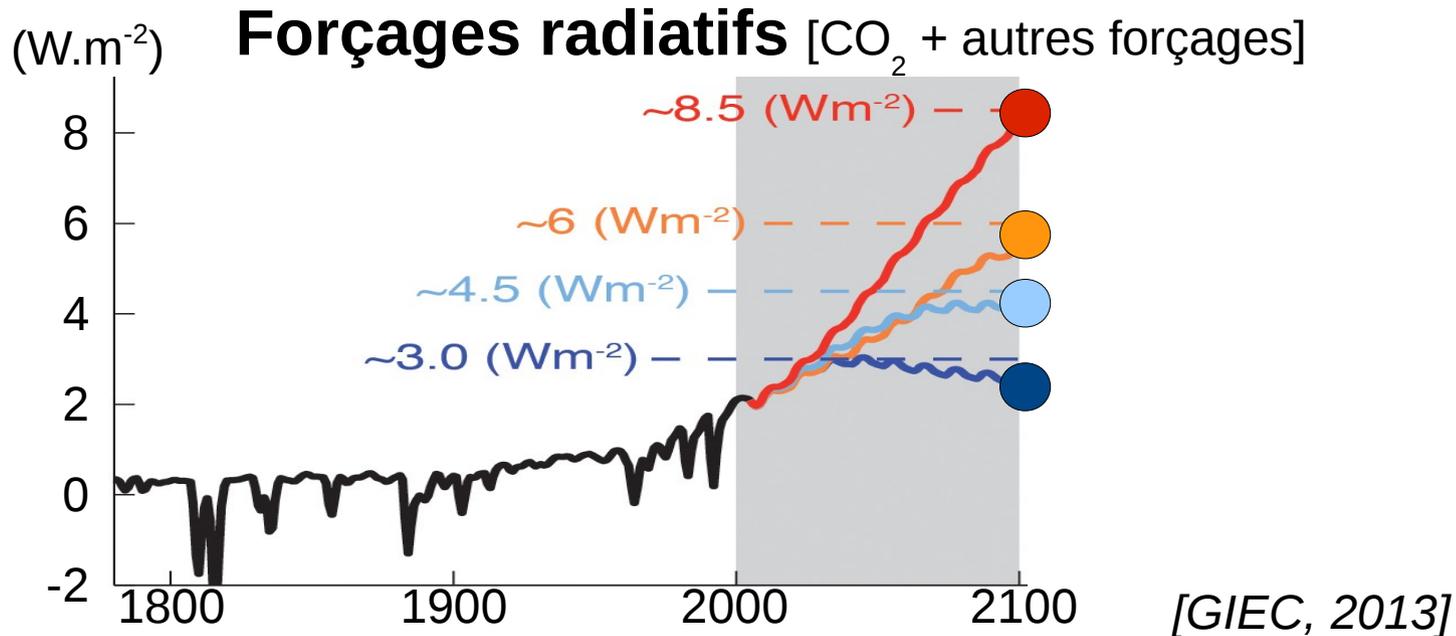
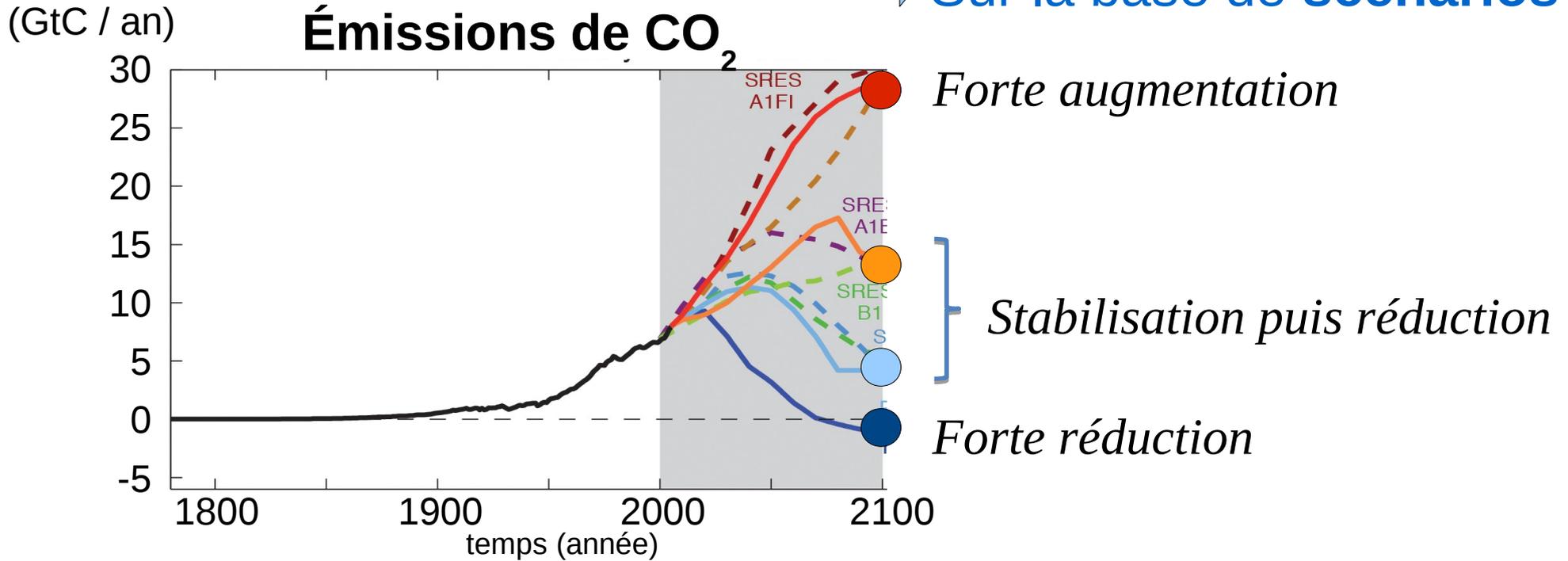


[Terray et Boé, 2013]

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**
  - **Climat présent et passé**
  - **Climat futur**
  - **Variabilité interne**

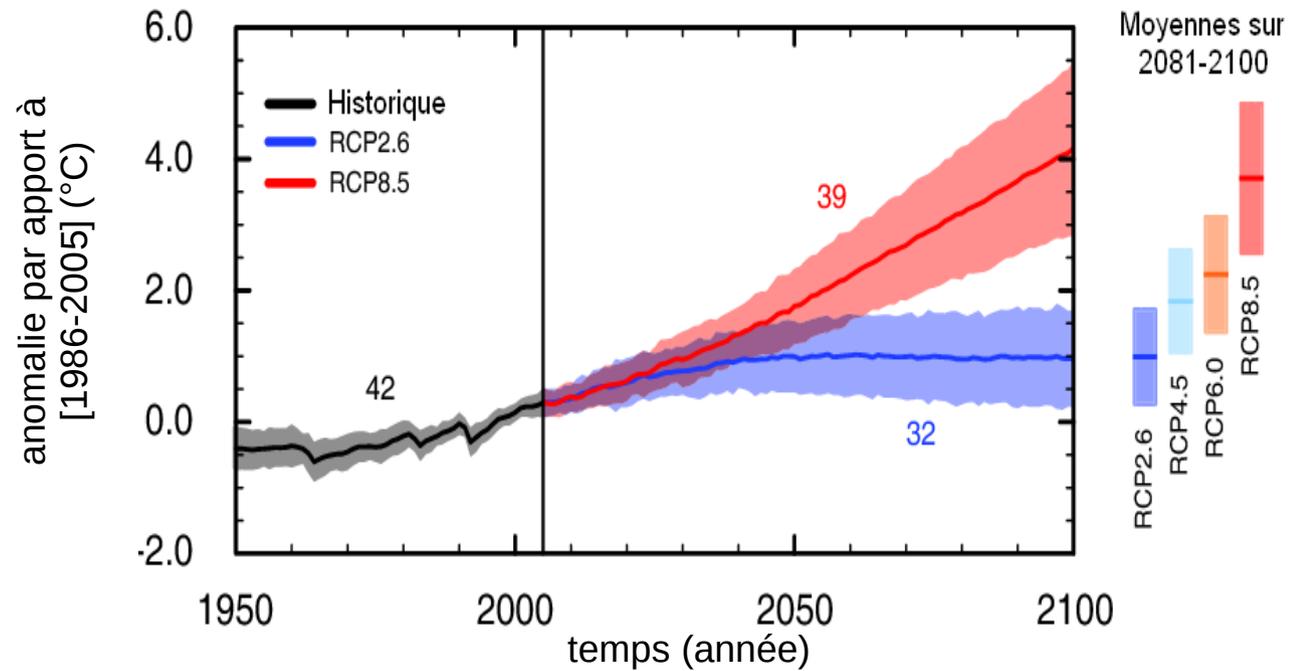
# Projections futures

➔ Sur la base de scénarios



# Température de surface

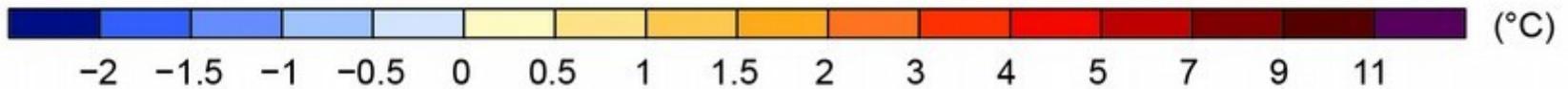
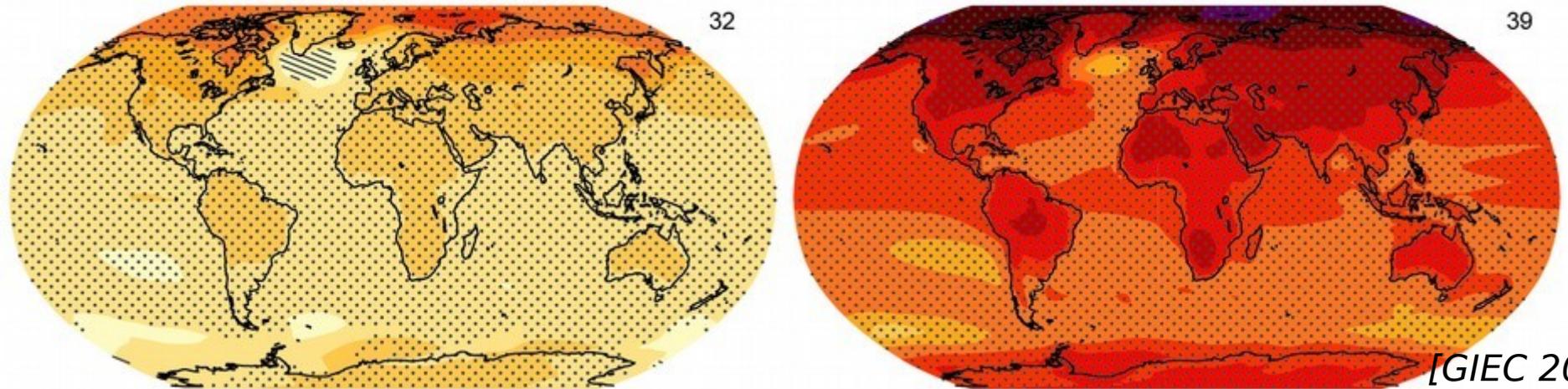
Moyenne globale  
1950 à 2100  
(40 modèles CMIP5)



Différence entre les périodes [1986-2005] et [2081-2100]

**RCP 2.6**

**RCP 8.5**

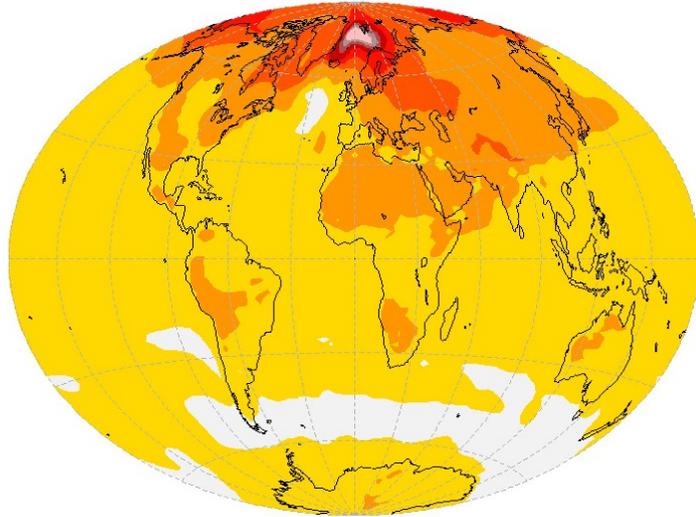


[GIEC 2013]

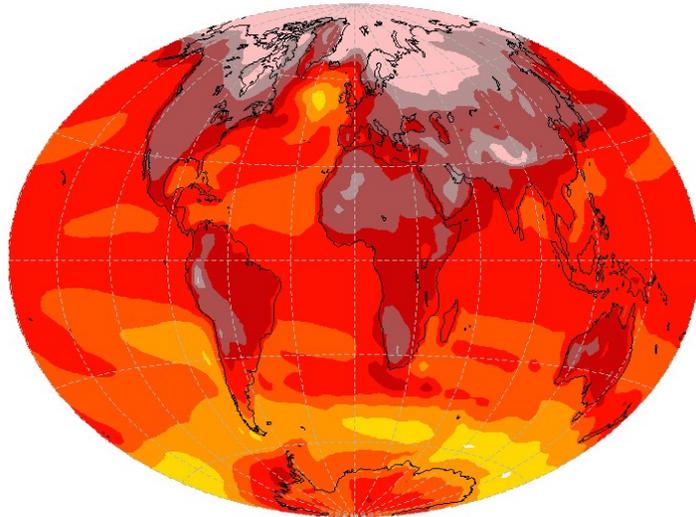
# Changement de la température de surface

Différence entre **2100** et **1990**

**RCP2.6**

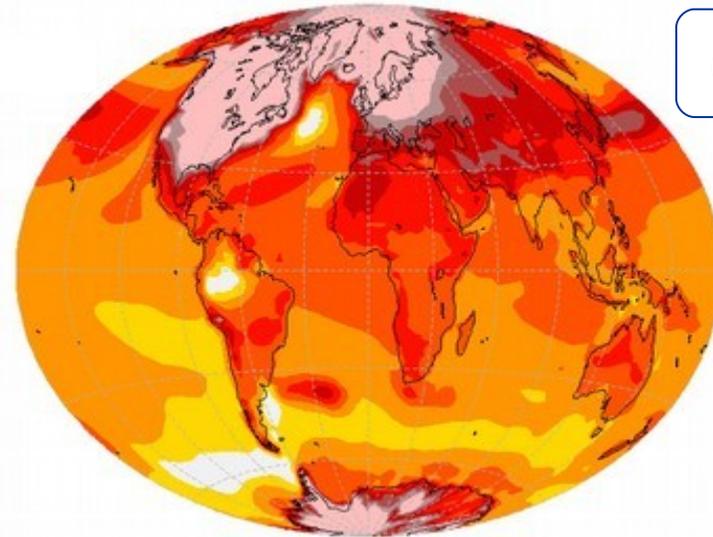


**RCP8.5**

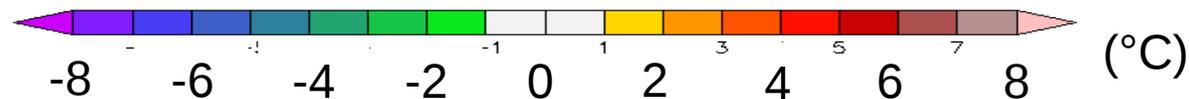


Différence entre la période **actuelle** et celle dernier maximum **glaciaire**

**Glaciaire**



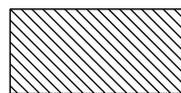
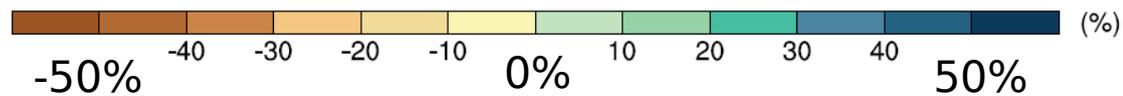
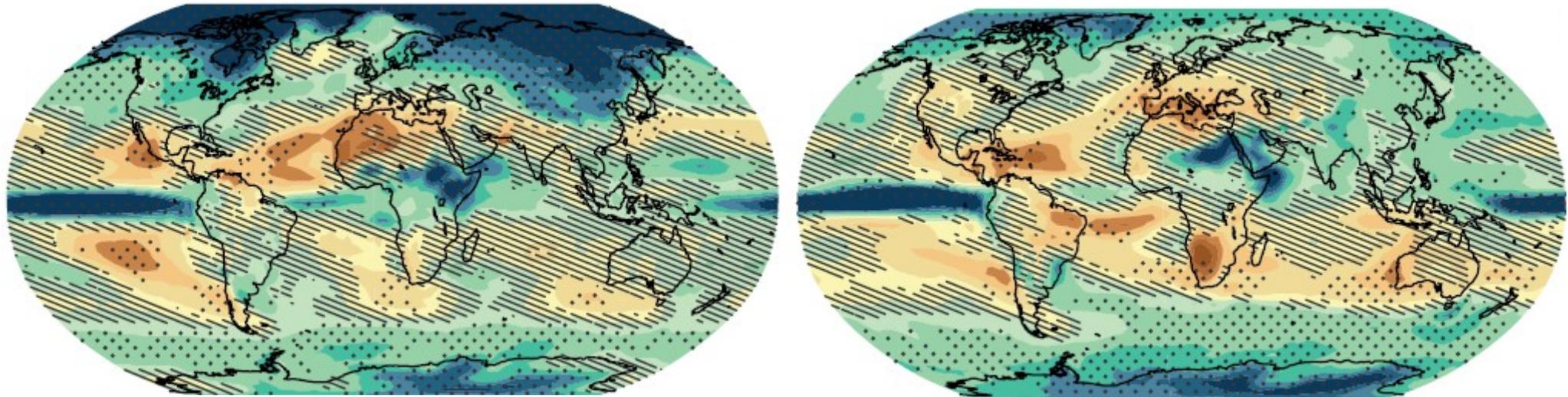
Modèle : IPSL-CM5A-LR



# Distribution géographique et saisonnière du *changement relatif des précipitations* entre 2000 et 2100, scénario RCP8.5

Décembre à février

Juin à septembre



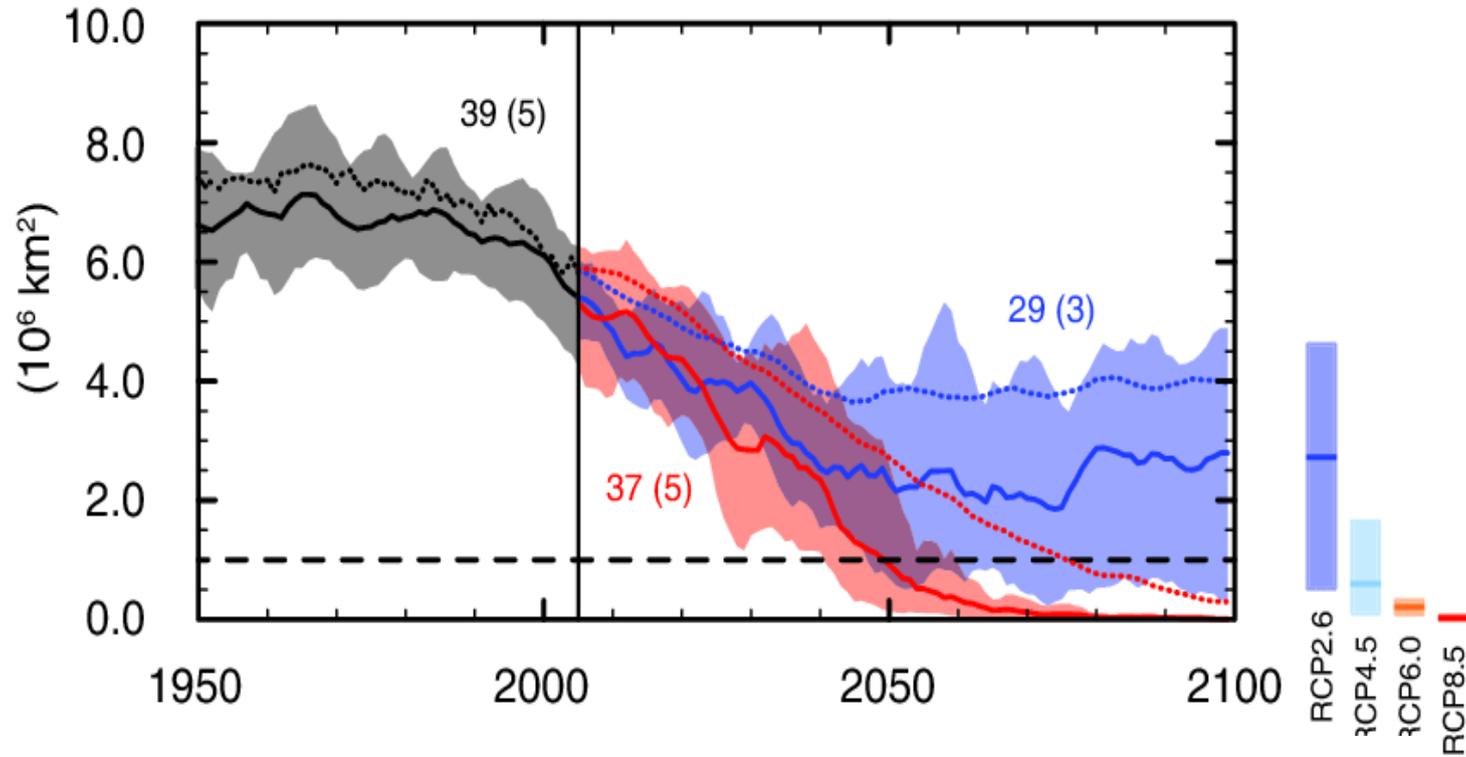
Signal/bruit faible



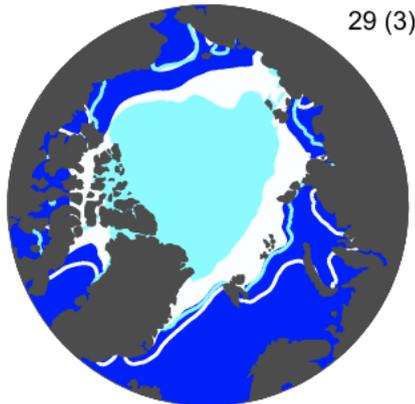
Signal/bruit élevé et modèles en accord

39 modèles CMIP5

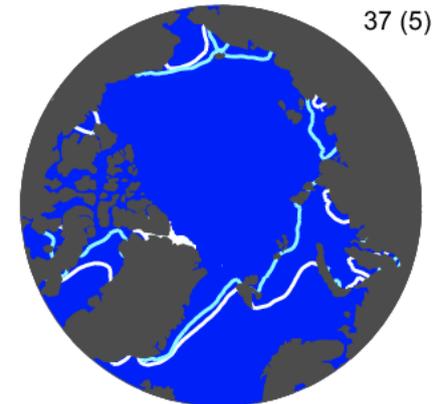
# Changements d'extension de la banquise arctique en septembre



RCP2.6



- CMIP5 multi-model average 1986–2005
- CMIP5 multi-model average 2081–2100
- CMIP5 subset average 1986–2005
- CMIP5 subset average 2081–2100

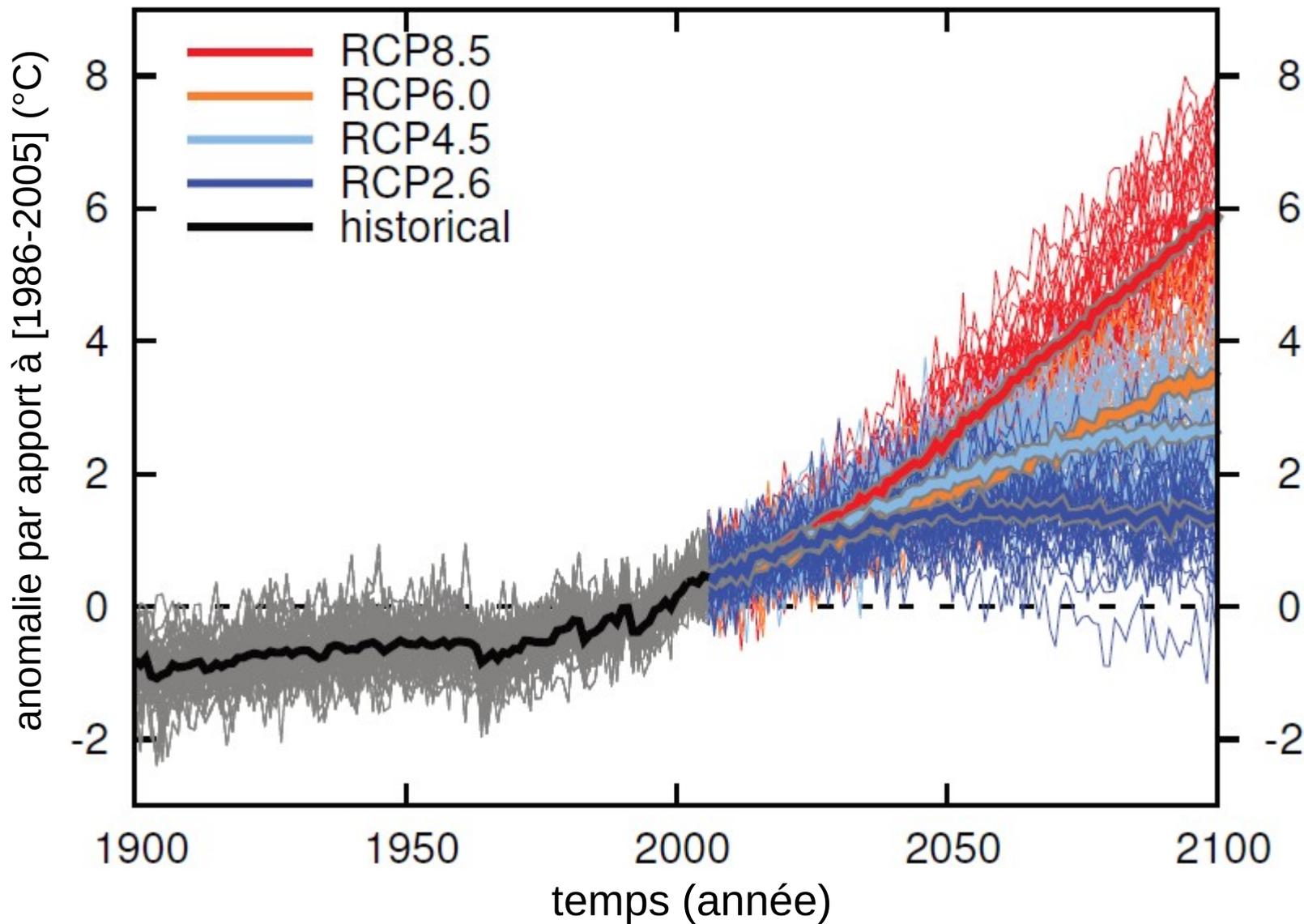


RCP8.5

- **I - Physique du climat : l'effet de serre**
- **II - Modélisation du climat**
- **III - Estimation des changements climatiques**
  - Climat présent et passé
  - Climat futur
  - **Variabilité interne**

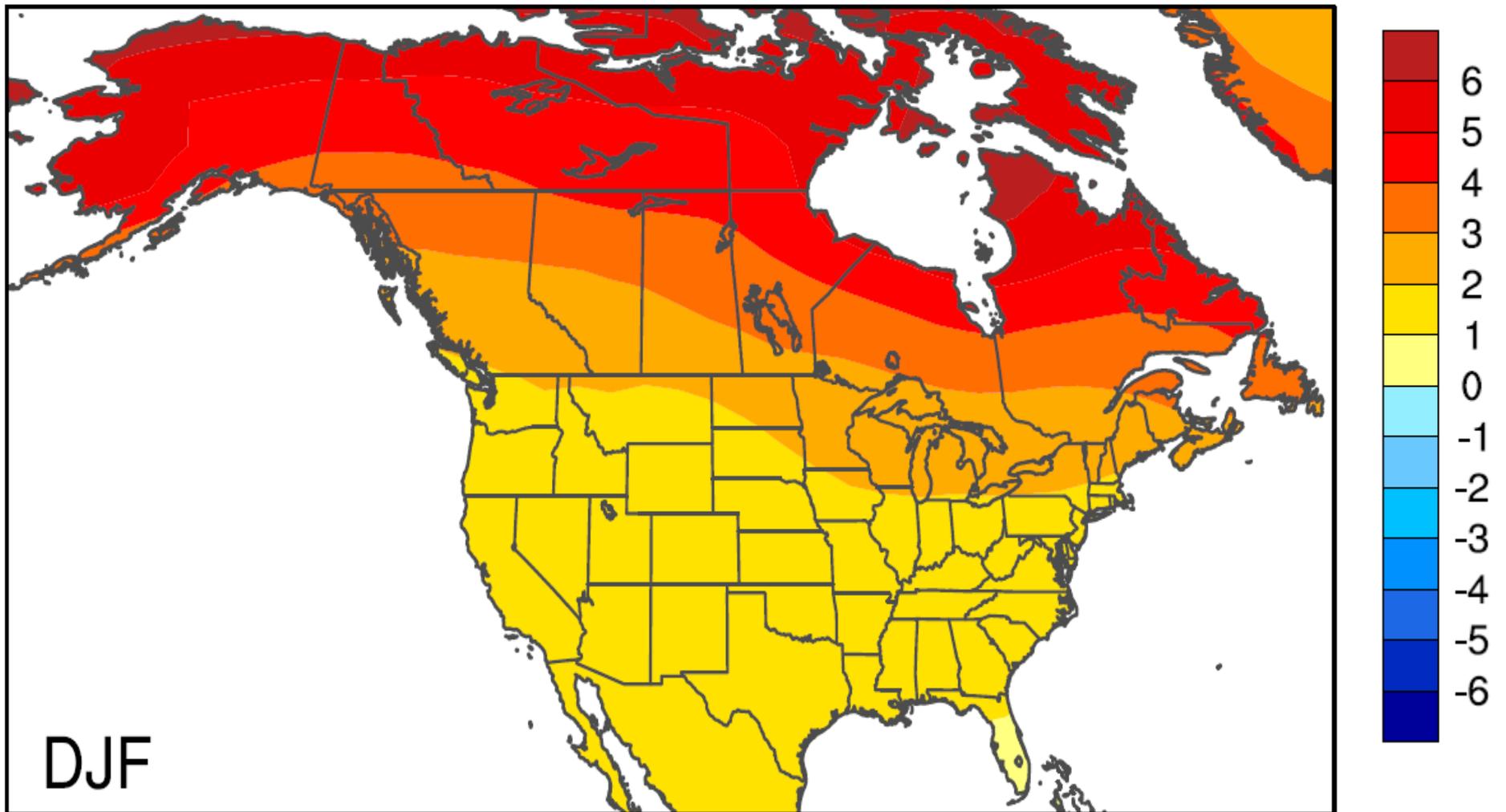
# Changement climatique et variabilité interne

Température moyenne au dessus des continents,  
en hiver boréal (dec.-fev.)



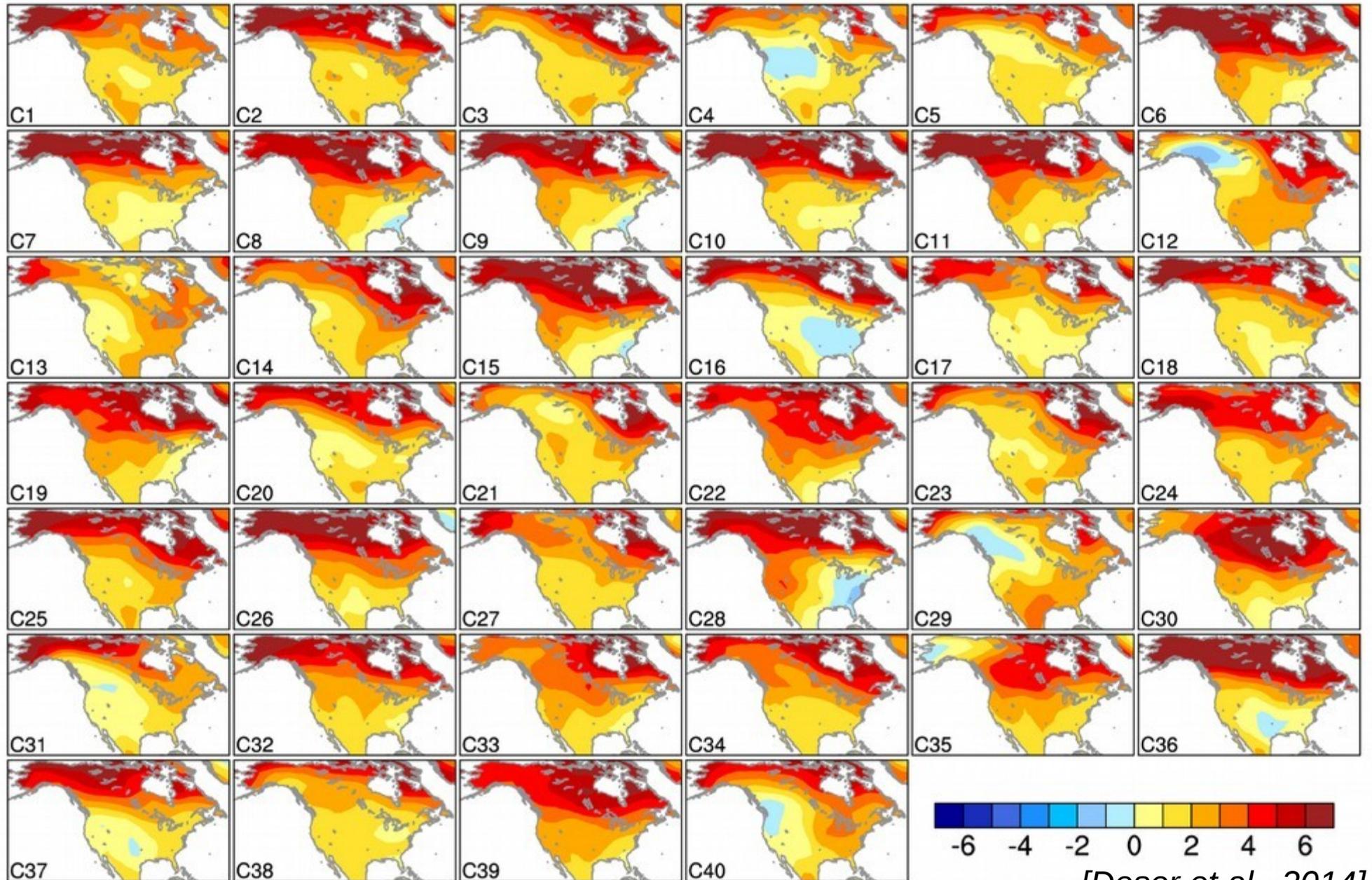
# Changement climatique et variabilité interne

Tendance sur 50 ans de la température hivernale ( $^{\circ}\text{C}/50$  ans)  
pour un scénario « intermédiaire - haut »



# Changement climatique et variabilité interne

Tendance sur 50 ans de la température hivernale ( $^{\circ}\text{C}/50$  ans)



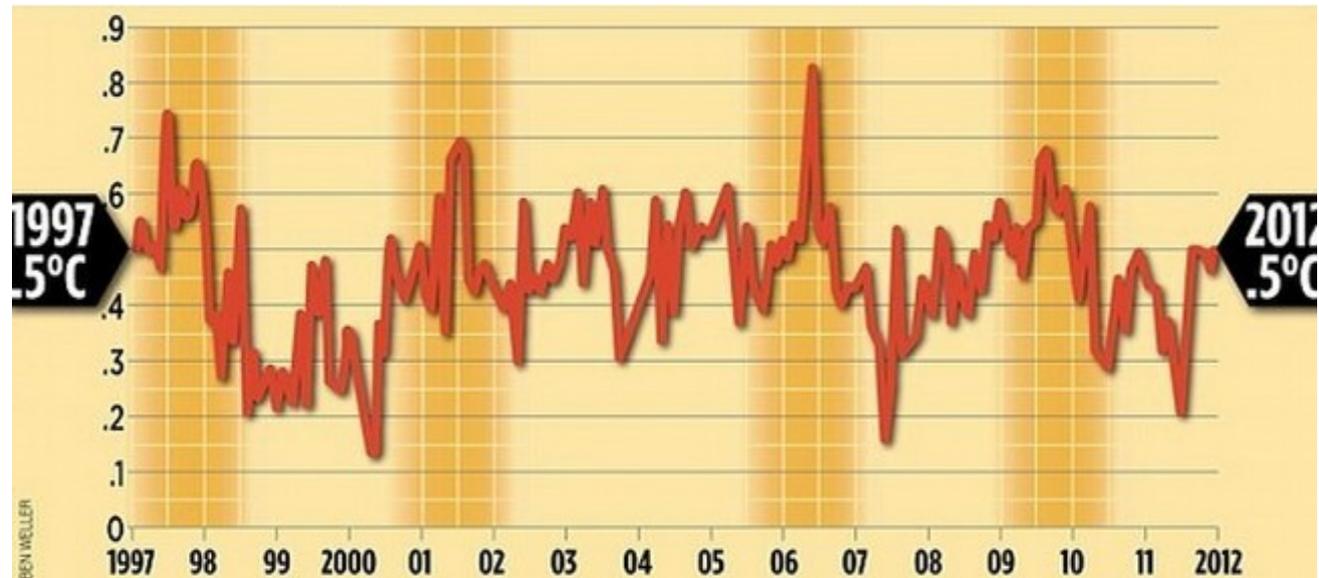
[Deser et al., 2014]

## Supplément

**Faire la différence entre le doute et la tromperie**

# Doute ou tromperie ?

## Négation du réchauffement climatique

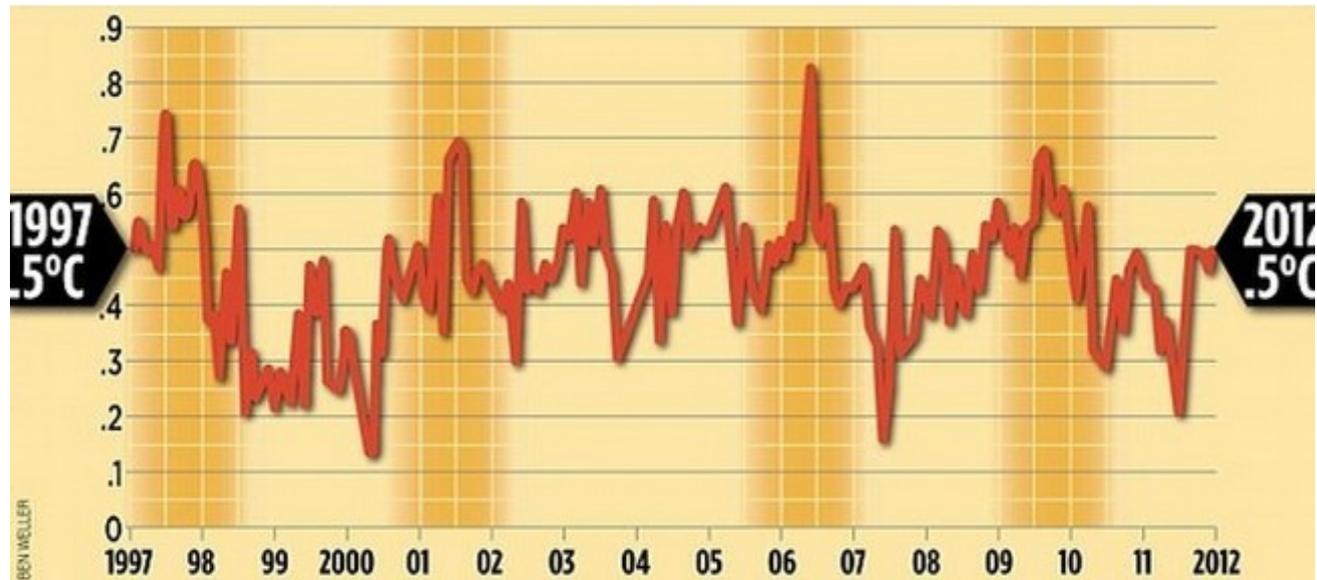


**« Autrement dit, depuis 1997, les variations de températures observées ne permettraient pas de constater de réchauffement climatique »**

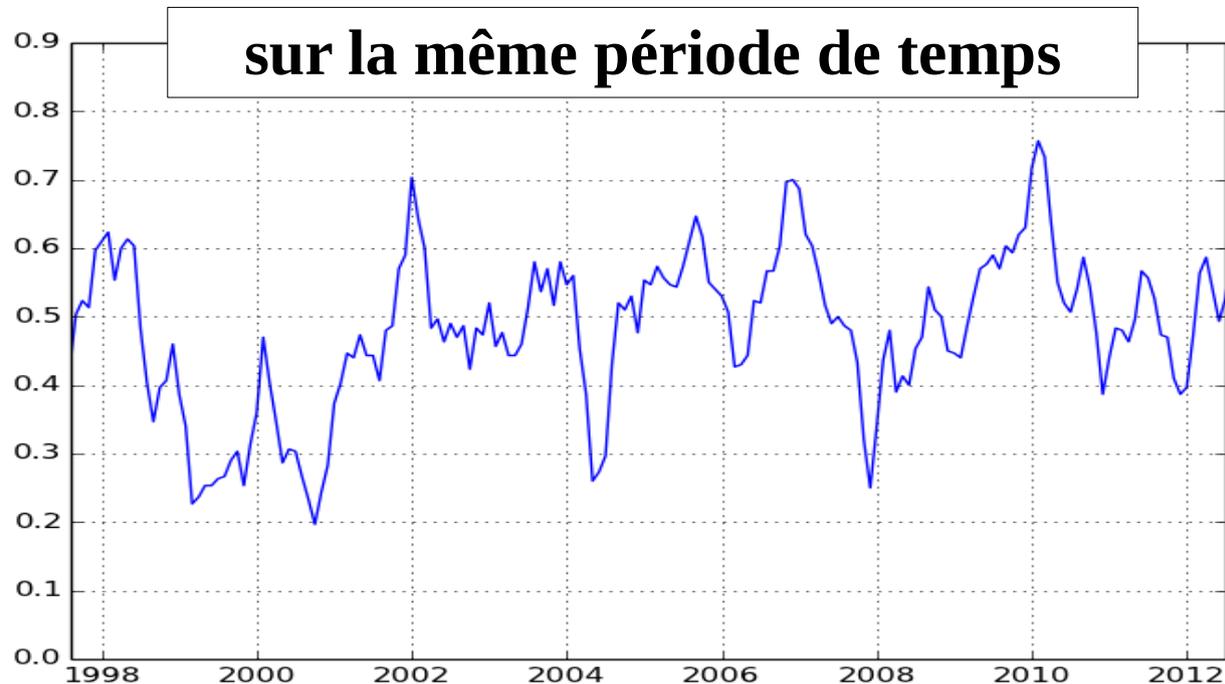
# Doute ou tromperie ?

## Négation du réchauffement climatique

**Résultat montré**



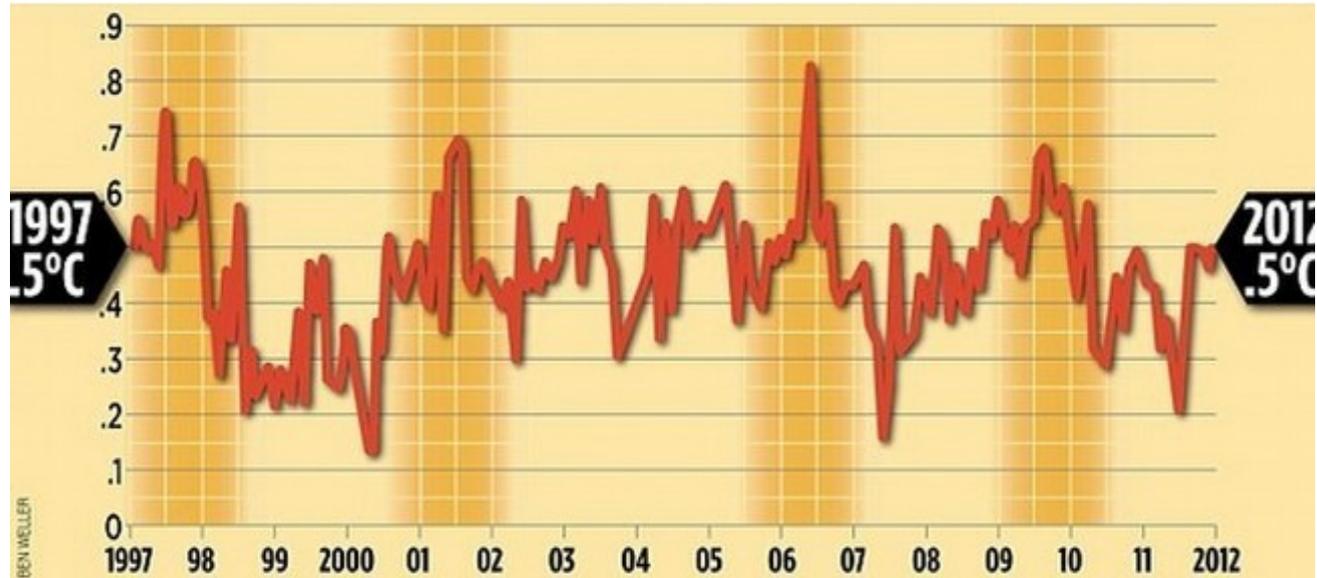
**Résultat** que l'on obtient à partir des données publiques du GISS (NASA)



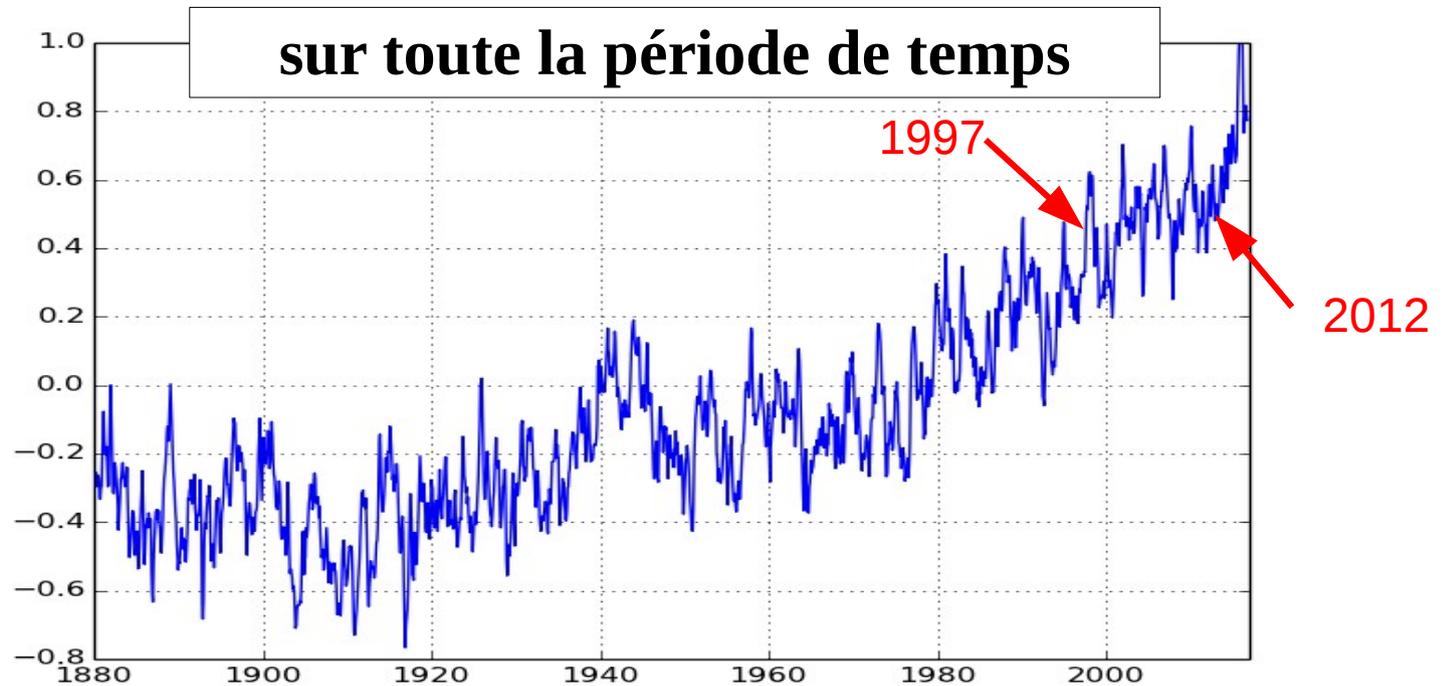
# Doute ou tromperie ?

## Négation du réchauffement climatique

**Résultat montré**



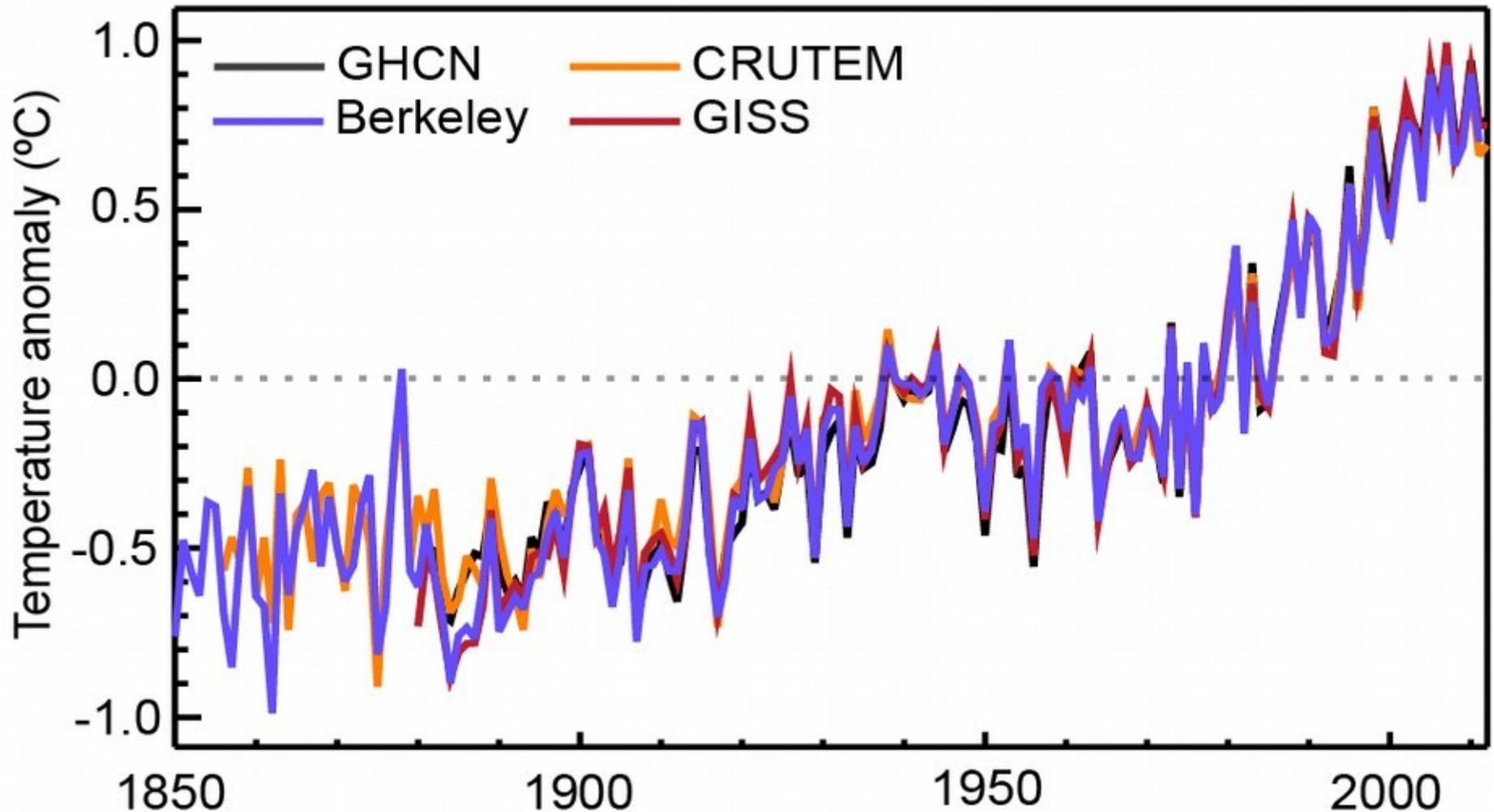
**Résultat** que l'on obtient à partir des données publiques du GISS (NASA)



# Doute ou tromperie ?

## Remise en cause du réchauffement climatique

Des physiciens de Berkeley ont voulu montrer que les physiciens du climat se trompaient... et ont finalement obtenu les mêmes résultats.



# Doute ou tromperie ?

Vers un refroidissement ?

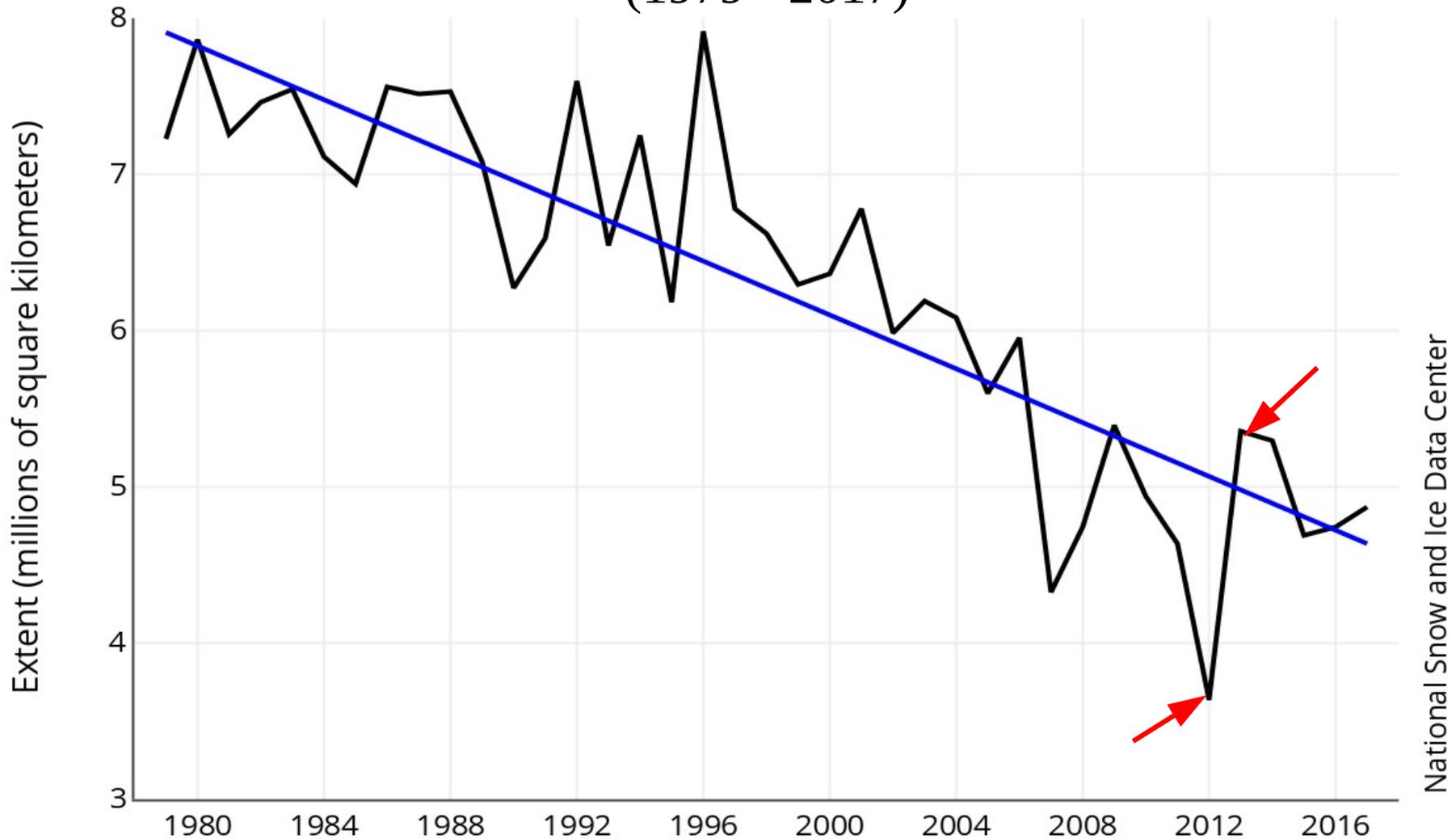


**"Réchauffement global ? Non, nous sommes en voie de refroidissement, revendiquent les scientifiques" [... En Arctique la banquise] *aurait effectivement augmenté de 60% par rapport à la même période l'année passée.***

# Doute ou tromperie ?

Vers un refroidissement ?

Extension de la glace de mer en arctique au mois de septembre  
(1979 - 2017)



# Tous les évènements extrêmes ou catastrophiques ne sont pas dus au changement climatique

**On a encore très peu de certitude** sur l'évolution des évènements extrêmes, même s'il y a des arguments forts pour dire que certains vont augmenter (comme les canicules).

Les médias sont souvent peu nuancés.

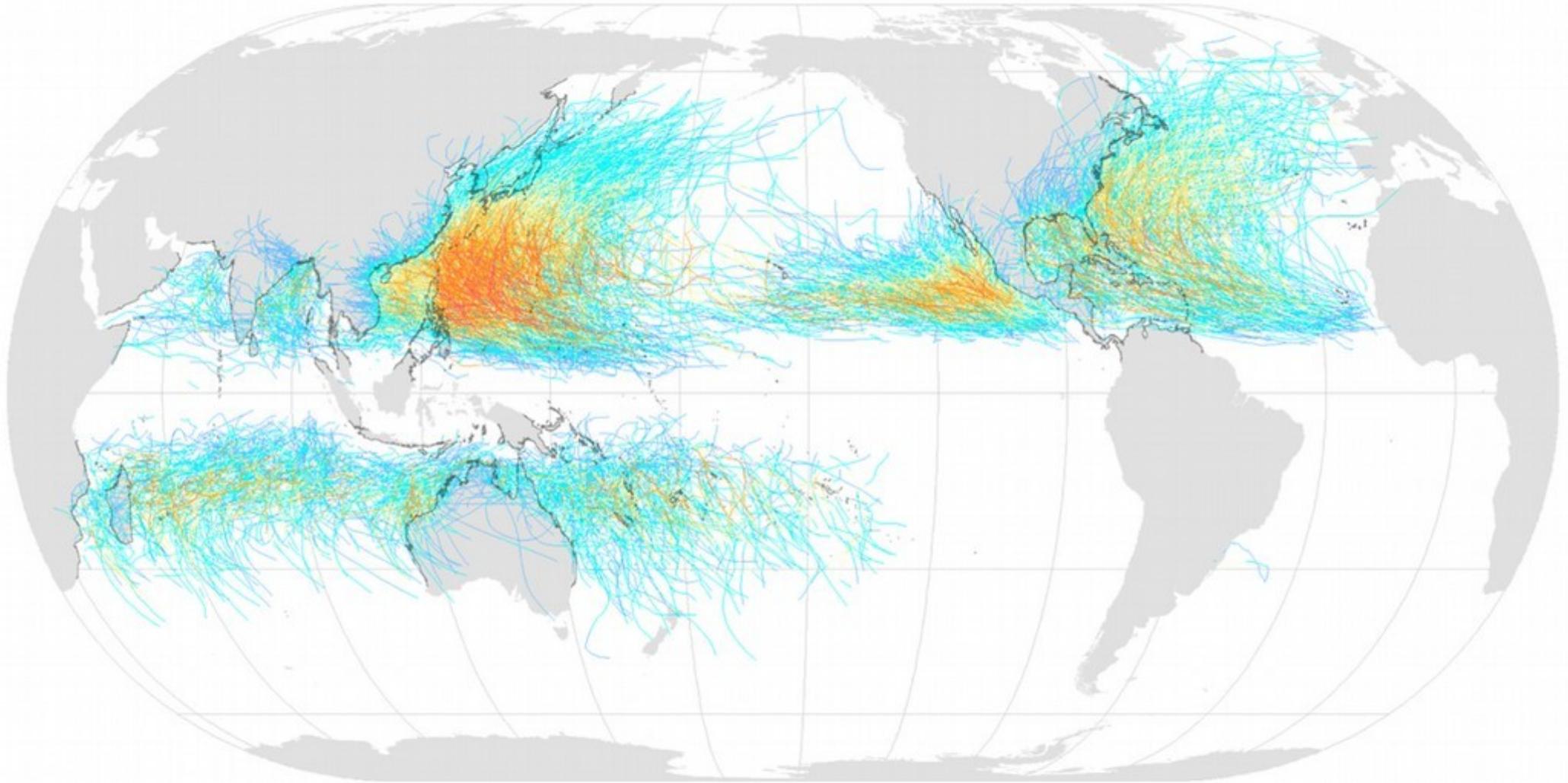
«**Avec le changement climatique, des cyclones plus intenses** » La Tribune, 07/09/2017.

**Réchauffement climatique : "Les cyclones très intenses pourraient augmenter"**, L'Obs, 08/09/2017,

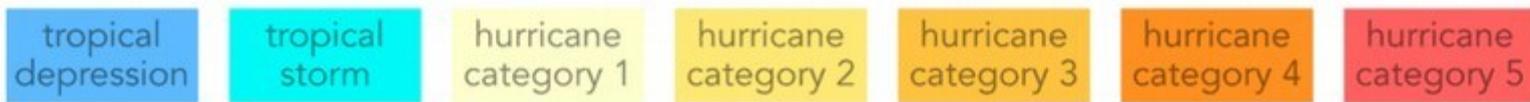
Pourtant le météorologue interviewé ne disait pas ça :

« En aucun cas il n'est une conséquence du réchauffement climatique : **on ne peut attribuer un événement particulier au réchauffement global.** Mais les **projections climatiques actuelles envisagent la possibilité** que la fréquence des cyclones intenses augmente avec le réchauffement. » P. Chauvin, Météo France

# Tropical Cyclones, 1945–2006



Saffir-Simpson Hurricane Scale:



Wikipedia

- Peu de cyclones passent sur des régions habitées
- Pas d'estimation globale fiable avant l'arrivée des satellites

# En conclusion

- Le climat n'est pas immuable, il **a varié dans le passé**, parfois de façon brutale, et le **réchauffement récent est dû aux activités humaines.**
- Les changements climatiques passés ont entraîné des **changements environnementaux majeurs** (niveau des mers, faunes, flores..)
- Les **changements climatiques futurs** dus aux activités humaines pourront être de **grande amplitude** au regard de ceux du passé
- Ces **changements seront radicaux** par rapports à ceux ayant existé depuis 15 000 ans.
- Il n'y a pas eu de variation de la température moyenne de la Terre de plus de 2°C plus durant le dernier million d'années. **On va vers l'inconnu.**
- Le **climat conditionne très fortement** l'environnement naturel, notre environnement et nos sociétés.