

# CHALEUR EN TRANSIT & TEMPS DE SEJOUR

## *Regarder la serre de l'intérieur*

Préprint #3 – Série PRIMEVOIRE : Mécanismes climatiques

Georges MARGUERITE

PRIMEVOIRE

*Structure de recherche indépendante  
(auteur non affilié à une institution académique)*

DOI : 10.5281/zenodo.16946895


Version 2 – 10 septembre 2025

Commentaires, remarques constructives et suggestions bienvenus.

Contact : [georges.marguerite@primevoire.fr](mailto:georges.marguerite@primevoire.fr)

© 2025, Georges MARGUERITE – PRIMEVOIRE

Ce document est diffusé sous licence **Creative Commons Attribution  
Partage dans les mêmes conditions 4.0 International (CC BY-SA 4.0)**.

 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fr>

## RESUME

Ce travail prolonge un premier préprint [PR1] consacré au modèle radiatif d'une sphère dépourvue d'atmosphère et un second [PR2] portant sur la dynamique thermique induite par les différences de température entre équateur et pôles.

Ici, nous nous concentrons sur le **stockage de la chaleur** dans l'atmosphère et du **temps de séjour associé**, qui conditionnent la température ambiante et l'inertie thermique du système.

Ces résultats offrent une base pédagogique pour comprendre les mécanismes internes de régulation thermique avant d'introduire les effets radiatifs des gaz à effet de serre et le rôle de la vapeur d'eau.

## ABSTRACT

This work extends a first preprint [PR1] on the radiative model of a sphere without atmosphere and a second [PR2] focused on the thermal dynamics driven by temperature differences between the equator and the poles.

Here, we concentrate on the **storage of heat** in the atmosphere and the associated **residence time**, which govern ambient temperature and the system's thermal inertia.

These results provide a pedagogical basis for understanding internal thermal regulation mechanisms before including the radiative effects of greenhouse gases and the role of water vapor.

—

**Mots-clés :** stockage de chaleur, temps de séjour thermique, atmosphère, régulation thermique, modèle climatique, énergie en transit

**Keywords:** heat storage, thermal residence time, atmosphere, thermal regulation, climate model, energy in transit

## TABLE DES MATIERES

<b>AVANT-PROPOS .....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>HYPOTHESES ET DEFINITIONS .....</b>	<b>5</b>
<b>1 ÉTUDE D'UNE SERRE ELEMENTAIRE – PHENOMENES THERMIQUES EN JEU .....</b>	<b>7</b>
1-1 FLUX INTERNE .....	7
1-2 TRANSITOIRE THERMIQUE ET REGIME STABILISE .....	7
1-3 CONFINEMENT THERMIQUE ET TEMPS DE RENOUVELLEMENT.....	9
1-4 INERTIE ET DEPHASAGE THERMIQUES.....	11
<b>2 SERRE ATMOSPHERIQUE.....</b>	<b>13</b>
2-1 BILAN THERMIQUE DE LA SERRE.....	13
2-2 EXTRAPOLATION DU BILAN THERMIQUE D'UNE SERRE A UNE COLONNE D'AIR ATMOSPHERIQUE.....	15
2-3 TEMPS DE SEJOUR ET CHALEUR DE RAYONNEMENT EN TRANSIT .....	16
<b>3 DERIVE CLIMATIQUE.....</b>	<b>17</b>
3-1 CAS D'UNE SERRE .....	17
3-2 CAS DE L'ATMOSPHERE .....	17
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>18</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>19</b>

## AVANT-PROPOS

Ce texte constitue la troisième étape d'un parcours entamé avec l'étude d'une sphère nue, dépourvue d'atmosphère, soumise uniquement à l'irradiance solaire. Ce premier préprint visait à mettre en évidence les limites du modèle d'équilibre radiatif appliqué à la Terre.

Le second travail a porté sur l'ajout d'une enveloppe atmosphérique neutre, en examinant comment les différences de températures entre régions équatoriales et polaires créent spontanément des mouvements de masses d'air. On y voyait apparaître les bases d'une véritable machine thermique planétaire.

Le présent texte poursuit l'exploration de la serre atmosphérique, non plus sous l'angle des mouvements générés par les différences de températures, mais en considérant la chaleur elle-même : son transit, son stockage et son temps de séjour au sein de l'atmosphère. Cette approche met en lumière les mécanismes invisibles de régulation thermique, souvent négligés dans les analyses extérieures du système, mais essentiels pour comprendre l'inertie et le déphasage du climat.

## INTRODUCTION

L'appréhension du climat repose souvent sur des modèles réducteurs, fondés sur l'hypothèse d'un système thermique en équilibre.

Or, ce système tend vers un équilibre... qui ne se réalise jamais. C'est précisément ce décalage permanent – cette quête inaboutie de stabilité – qui constitue le moteur du climat.

Nous avons montré, dans nos articles précédents, que même une sphère théorique, homogène et sans masse, soumise à une source de chaleur extérieure, présentait une répartition anisotrope de température. L'ajout d'une masse rompt d'emblée l'idée d'un équilibre instantané, tel que le suppose une modélisation radiative statique.

La présence d'une masse introduit deux notions fondamentales : celle de chaleur en transit, et celle de temps de séjour de cette chaleur dans le système.

Le présent article se propose de mettre en lumière ces deux grandeurs thermodynamiques, à travers l'image d'une serre, afin d'illustrer les mécanismes internes qui régissent la dynamique thermique d'une atmosphère même immobile.

Dans notre précédent article, nous avons étudié les processus de mise en mouvement des masses d'air par effet thermique. Ici, au contraire, nous considérerons l'air comme immobile, afin d'isoler les mécanismes de stockage et de restitution de la chaleur au sein d'un système fermé.

Cette approche vise à faire émerger une idée centrale : **le climat est une science du déséquilibre**. Loin de tendre vers un état stable, le système climatique oscille autour d'équilibres toujours différés.

Les activités humaines ne créent pas ce déséquilibre – il est consubstantiel au climat lui-même – mais elles en modifient l'ampleur, la fréquence et surtout, elles en perturbent les régulations naturelles.

L'analyse de la serre, vue de l'intérieur, met en évidence ce qui échappe à tout modèle d'équilibre instantané : la dynamique du stockage et du renouvellement de la chaleur. Ce biais méthodologique — négliger l'inertie et le temps de séjour — est l'un des dangers des approches exclusivement radiatives du climat.

## HYPOTHESES ET DEFINITIONS

### HYPOTHESES GENERALES

- Source de chaleur externe : rayonnement solaire.
- Sphère massive, homogène, à propriétés thermiques uniformes.
- Atmosphère composée uniquement de gaz parfaits diatomiques (azote et oxygène), radiativement neutres.
- Abstraction des échanges latéraux, pour ne considérer que les flux thermiques radiaux. Toutes les grandeurs sont exprimées par unité de surface :  $W.m^{-2}$  pour les flux,  $J.m^{-2}$  pour les énergies.

### HYPOTHESES SPECIFIQUES A LA SERRE

- Température homogène.
- Air immobile (absence de convection)<sup>1</sup>.
- Absence de dilatation du gaz.
- Transmission de la chaleur par conduction uniquement (analogue aux solides).
- Transparence aux IR (air et parois)

### CONVENTION

L'air étant supposé immobile, nous emploierons les symboles  $\Phi_{in}$  et  $Q_{out}$  pour exprimer le flux ou la quantité de chaleur transmis à l'air par contact avec le sol, sans en préciser le mode.

Les flux radiatifs (notamment infrarouges) ne sont pas pris en compte à ce stade. Ils seront traités spécifiquement dans le préprint suivant.

### DEFINITION

La chaleur  $Q$  est une énergie de dimension  $M L^2 T^{-2}$ , exprimée en joules.

Elle est reliée à la variation de température par :

---

<sup>1</sup> L'air est ici considéré comme immobile (gélifié), assimilable à un milieu solide pour une transmission thermique stratifiée de faible amplitude.

### Formulation massique (classique)

$$Q = mC_p \Delta T \quad (1)$$

où :

- $m$  est la masse de l'air contenu dans la serre [kg]
- $C_p$  est la capacité thermique massique de l'air à pression constante
- $\Delta T$  est la différence de température entre les états initial et final

### Formulation surfacique (cas d'école d'une serre homogène)

$$Q_{st} = \rho h C_p \Delta T \quad (2)$$

où :

- $\rho$  est la densité de l'air [ $\text{Kg.m}^{-3}$ ]
- $H$  est la hauteur de la colonne d'air [m]
- $C_p$  est la capacité thermique massique de l'air à pression constante
- $\Delta T$  est la différence de température entre les états initial et final
- $Q_{st}$  est alors la chaleur « stockée » par unité de surface [ $\text{J.m}^{-2}$ ]

La température résulte de l'agitation moléculaire de la matière. Dans une atmosphère immobile, les mouvements moléculaires sont browniens et ne confèrent pas de direction privilégiée à l'énergie ; la chaleur apparaît alors comme une forme dégradée de l'énergie, en opposition à la forme motrice associée à des mouvements organisés (ex. système cylindre-piston).

Comme les variations de températures sont modérées, nous considérons les capacités thermiques comme constantes.

### GRANDEURS, SYMBOLES ET UNITES UTILISEES

Grandeur	Symbole	Unité SI	Signification physique
Irradiance solaire nette	I	$\text{W.m}^{-2}$	Puissance radiative transmise au sol
Flux de chaleur (moyen ou global)	$\Phi$	$\text{W.m}^{-2}$	Puissance thermique totale échangée
Flux de chaleur instantané	$\varphi(t)$	$\text{W.m}^{-2}$	Puissance thermique à un instant donné
Énergie échangée sous forme de chaleur	Q	$\text{J.m}^{-2}$	Énergie transférée vers ou depuis le système
Température	T	K	Mesure de l'état thermique du système
Variation d'enthalpie	$\Delta H$	$\text{J.m}^{-2}$	Variation de l'énergie interne à pression constante
Temps	t	s	Variable temporelle

## 1 ÉTUDE D'UNE SERRE ELEMENTAIRE – PHENOMENES THERMIQUES EN JEU

Nous nous proposons ici de regarder de plus près ce qui se passe à l'intérieur d'une serre, pour saisir les phénomènes en jeu.

### 1-1 Flux interne

#### Hypothèse initiale

Afin de dégager les mécanismes fondamentaux sans introduire de complexité liée aux variations diurnes ou saisonnières, nous supposons, momentanément, un flux d'entrée constant tout au long des cycles.

La serre reçoit le rayonnement solaire, dont l'irradiance est diminuée de la part réfléchie ou diffusée, pour donner un flux net efficace qui en réchauffe le sol :

$$\Phi_e = I (1 - \rho_s) - \Phi_{loss} \quad (3)$$

où

- $\rho_s$  est l'albédo du sol (adimensionnel) ;
- $\Phi_{loss}$  inclut l'ensemble des pertes, comme la diffusion vers l'extérieur, avant absorption.

La chaleur du sol est ensuite partagée entre deux flux :

1. La plus grande part est évacuée vers l'espace par rayonnement infrarouge ( $\Phi_{IR}$ ) ;
2. une partie plus faible est transmise à l'air de la serre par contact ( $\Phi_{cont}$ ).

On peut donc écrire un bilan pour le sol :

$$\Phi_{grd} = \Phi_{cont} + \Phi_{IR} \quad (4)$$

avec  $\Phi_{cont} \ll \Phi_{IR}$

Dans la suite de cette étude, consacrée à la dynamique thermique de l'air, nous prendrons :

$$\Phi_{in} = \Phi_{cont} \quad (5)$$

où  $\Phi_{in}$  représente le flux réellement reçu par l'air, distinct du flux radiatif global du sol. Cette convention permet de séparer clairement les contributions du sol et de l'air, et d'éviter toute ambiguïté avec les flux radiatifs qui seront abordés dans le prochain préprint.

### 1-2 Transitoire thermique et Régime stabilisé

En première approche, nous pouvons Imaginer la première exposition de la serre au rayonnement solaire :





- Avant le lever du Soleil, sa température est  $T_0$  ;
- Elle croît tout au long du jour pour diminuer durant la nuit ;
- À la fin du cycle, la température moyenne reste supérieure à  $T_0$ .

La serre a capté plus de chaleur qu'elle n'en a restituée :

$$\Phi_{out} < \Phi_{in} \quad (6)$$

où  $\Phi_{out}$  est le flux de chaleur dissipée à l'extérieur de la serre.

Ce phénomène est cohérent avec ce que Fourier décrit à propos du fonctionnement de l'héliothermomètre [2] :

*« (la chaleur) s'accumule de plus en plus dans une capacité enveloppée d'une matière très peu conductrice ».*

De façon plus générale :

Durant le transitoire, tant que le flux sortant  $\Phi_{out} < \Phi_{in}$ , l'atmosphère accumule de l'énergie :

$$\Delta H_i = (\Phi_{in} - \Phi_{out})t_i \quad (7)$$

Ce processus se traduit par une élévation de l'enthalpie de l'atmosphère :

$$\Delta H = Q_{in} - Q_{out} = Q_{st} \quad (8)$$

L'enthalpie étant directement reliée à la température par la relation :

$$\Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

(où  $m$  est la masse de la colonne d'air, et  $c_p$  sa capacité thermique), l'évolution de la température moyenne suit l'accumulation de chaleur en transit.

Ainsi :

- $\Delta H > 0$  correspond à une élévation de température
- $\Delta H < 0$  à un refroidissement,
- $\Delta H = 0$  à un régime stabilisé.

### 1-3 Confinement thermique et temps de renouvellement

#### Confinement

Ce qui distingue une serre de l'atmosphère environnante, c'est le confinement de l'air qu'elle renferme. À l'intérieur, la chaleur s'accumule dans un volume restreint, tandis qu'à l'extérieur, elle se dilue dans une masse d'air beaucoup plus importante.

Cette concentration de chaleur sur une masse d'air plus faible se traduit par une température plus élevée à l'intérieur.

Nous pouvons définir l'élévation de la température de la serre par :

$$\Delta T = \frac{Q_{st}}{\rho \cdot h \cdot c_p} \quad (10)$$

### Illustration expérimentale : l'expérience de Wood (1909)

Robert W. Wood [3] réalisa une expérience comparant deux serres identiques, l'une avec des parois en verre (opaque au rayonnement infrarouge), l'autre avec des parois en sel gemme (transparentes à l'infrarouge).

Malgré cette différence spectrale, les deux serres atteignirent des températures internes quasi identiques.

Cette observation montre que la chaleur encapsulée  $Q_{st}$  – et donc la dynamique thermique interne – ne dépend pas exclusivement de la transparence ou de l'opacité aux IR des parois, mais avant tout de la capacité thermique et des conditions de transfert globales (conduction, convection, rayonnement combinés).

Cette expérience constitue une référence essentielle pour comprendre que la dynamique interne d'une serre peut être décrite sans recourir, dans un premier temps, à un modèle radiatif. Elle illustre la pertinence de la notion de chaleur en transit dans un système clos ou quasi clos.

### Temps de renouvellement

La masse et la capacité thermique de l'air confiné dans la serre forment un réservoir de chaleur qui se remplit ou se vide dans les phases transitoires.

En régime établi, le niveau de chaleur stockée est maximum. Toutefois, elle ne cesse d'être alimentée par son contact avec le sol et de se dissiper vers l'extérieur, pour se renouveler constamment.

En régime établi, nous pouvons définir le taux de renouvellement de ce réservoir thermique comme le rapport entre la chaleur stockée et le flux thermique traversant la serre :

$$t_{ren} = \frac{Q_{st}}{\Phi_{out}} \quad (11)$$

où :

- $Q_{st}$  : chaleur stockée [ $J \cdot m^{-2}$ ]
- $\Phi_{out}$  : flux thermique dissipé [ $W \cdot m^{-2}$ ]
- $t_{ren}$  : temps de renouvellement [s]

À l'inverse, le taux de renouvellement traduit la part de la chaleur stockée renouvelée à chaque instant.

$$\tau_{ren} = \frac{Q_{out}}{\Phi_{st}} = \frac{1}{t_{ren}} \quad (12)$$

Le flux thermique dissipé étant stabilisé, il est constant tout au long de son parcours. Le flux qui traverse la colonne d'air de la serre est égal à celui qui en traverse le plafond, qui est de la forme :

$$\Phi_{out} = \lambda \frac{A}{d} \Delta T \quad (13)$$

où :

- $\lambda$  : conductivité thermique du plafond [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $d$  : épaisseur du plafond [m]
- $A$  : superficie [ $\text{m}^2$ ]
- $\Delta T$  : différentiel de température intérieur/extérieur [K]

Ce qui peut s'écrire également :

$$\Phi_{out} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (14)$$

où  $R_{th} = \frac{d}{A\lambda}$  est la résistance thermique surfacique du plafond [ $\text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ ]

Note : Cette notation, en usage dans le domaine de la construction, présente l'avantage d'exprimer la résistance que le plafond oppose à la dissipation thermique.

## 1-4 Inertie et déphasage thermiques

### Cycles d'ensoleillement

Deux cycles principaux gouvernent la dynamique de la serre :

- un cycle **diurne**, avec accumulation de chaleur durant le jour et dissipation pendant la nuit,
- un cycle **saisonnier**, où la durée relative du jour et de la nuit détermine le bilan net sur plusieurs mois.

Ainsi, durant la moitié de l'année où les jours sont plus longs que les nuits, la serre accumule plus de chaleur qu'elle n'en perd. L'inverse se produit lorsque les nuits deviennent plus longues.

Fourier résume ce mécanisme [2] :

*« Les alternatives des saisons sont entretenues par une quantité immense de chaleur solaire qui oscille dans l'enveloppe terrestre, passant au-dessous de la surface durant six mois, et retournant de la Terre dans l'air pendant l'autre moitié de l'année. »*

Si la transmission de la chaleur à l'intérieur de la serre se faisait aussi rapidement que par rayonnement, son refroidissement serait quasi instantané dès l'arrêt du flux solaire — en une fraction de seconde.

Ainsi, par ses dimensions réduites, l'héliothermomètre de Horace de Saussure présente une inertie thermique très faible, qui lui permet d'indiquer rapidement une température stable [4].

### Lien avec les cycles d'ensoleillement

Lors des cycles diurne et saisonnier, l'inertie thermique conditionne la vitesse de variation de la température.

- Sans inertie, la température de l'air suivrait instantanément les variations de flux solaire.

- Avec inertie, la température **intègre** ces variations, produisant un **lissage** du cycle et un **décalage temporel** (déphasage) entre maximum d'ensoleillement et maximum de température.

Le sol, en absorbant une partie du rayonnement solaire et en restituant cette énergie sous forme de flux thermique, ne transmet pas instantanément à l'air les variations de l'irradiance. Une partie de la chaleur est stockée, puis restituée avec un certain retard. Cette inertie crée un déphasage entre le cycle du rayonnement incident et la température de l'air.

### Déphasage thermique

Le déphasage est la manifestation visible de l'inertie : le maximum de température est atteint **après** le maximum de flux solaire (en journée comme sur l'année).

En notation :

$$\varphi_{lag} = \frac{t_{max,T} - t_{max,I}}{P} \times 360^\circ \quad (15)$$

où :

- $\varphi_{lag}$  est le déphasage angulaire
- $t_{max,T}$  est l'instant du maximum de température
- $t_{max,I}$  est l'instant du maximum d'irradiance solaire
- $P$  est la périodicité du cycle (jour ou année)

L'inertie thermique modère les variations de température durant les cycles solaires. En absence de celle-ci, la température de la serre tomberait à une valeur minimale au crépuscule et la garderait constante jusqu'à l'aurore, tandis qu'elle suivrait strictement la course du Soleil durant la journée.

*« L'intermittence des jours et des nuits produirait des effets subits et totalement différents de ceux que nous observons. La surface des corps serait exposée tout à coup, au commencement de la nuit, à un froid infiniment intense. Les corps animés et les végétaux ne résisteraient point à une action aussi forte et aussi prompte, qui se reproduirait en sens contraire au lever du Soleil. » [2]*

En régime cyclique stabilisé, les flux instantanés ne s'équilibrent jamais :

$$\Phi_{out}(t) \neq \Phi_{in}(t) \quad (16)$$

mais l'intégration sur la durée du cycle assure l'égalité :

$$Q_{out} = Q_{in} \quad (17)$$

$$\text{avec} \quad Q_{in} = \int_t^{t+\Delta t} \Phi_{in}(t) dt = \bar{\Phi}_{in} \Delta t, \quad Q_{out} = \int_t^{t+\Delta t} \Phi_{out}(t) dt \quad (18-19)$$

où  $\bar{\Phi}_{in}$  est le flux moyen reçu.

Ainsi, l'écart entre  $\Phi_{in}$  et  $\Phi_{out}$  ne traduit pas une rupture d'équilibre mais un **décalage temporel** :

$$\Delta H(T) = \int (\Phi_{in}(t) - \Phi_{out}(t)) dt \quad (20)$$

Pendant la phase ascendante,  $\Delta H > 0$  (accumulation), puis  $\Delta H < 0$  (dissipation), et au terme du cycle :

$$\sum_{cycle} \Delta H = 0 \quad (21)$$

Fourier avait décrit ce phénomène de déphasage thermique dans les solides [2] :

*« À une profondeur médiocre, comme 3m à 4m, la température observée ne varie pas pendant la durée de chaque jour ; mais elle change très sensiblement dans le cours d'une année ; elle s'élève et s'abaisse alternativement. L'étendue de ces variations, c'est-à-dire la différence entre le maximum et le minimum de température, n'est pas la même à toutes les profondeurs ; elle est d'autant moindre que la distance à la surface est plus grande. Les différents points d'une même verticale ne parviennent pas en même temps à ces températures extrêmes. »*

Nous pouvons traduire cela en termes de temps de séjour, se comptant en heures pour les couches superficielles du globe, en mois à quelques dizaines de mètres de profondeur, et à quelques milliers d'années à de plus grandes profondeurs...

La superposition des cycles quotidien et annuel s'exprime :

$$\sum_{Annuel} (\sum_{Quotidien} \Delta H) = 0 \quad (22)$$

À plus grande échelle (périodes glaciaires/interglaciaires), le système présente un résidu :

$$\sum_{Cycles} \Delta H = \Delta H_{Résiduel} \quad (23)$$

## 2 SERRE ATMOSPHERIQUE

### 2-1 Bilan thermique de la serre

Les notions générales étant posées, nous pouvons poursuivre la revue des phénomènes thermiques en jeu à travers un exemple quantifiable.

#### Hypothèses générales

- Air immobile (transferts thermiques de proche à proche) ;
- Gaz parfaits et neutres vis-à-vis du rayonnement infrarouge ;
- Colonnes d'air homogènes au sein de la serre ;
- Rayonnement solaire uniforme (constante solaire :  $341 \text{ W.m}^{-2}$  – ordre de grandeur représentatif).

#### Apport solaire

Notre objectif est de fixer les ordres de grandeur des phénomènes thermiques en jeu.

Au cours d'un cycle journalier, elle reçoit un rayonnement solaire de :

$$Q_{sun,p} = \Phi_{sun} \cdot p \quad (24)$$

avec :

- $\Phi_{sun}$  : constante solaire [ $341 \text{ W.m}^{-2}$ ] ;
- $p$  : période [24 heures].

soit : 
$$Q_{sun,p} = 8,18 \text{ kWh.m}^{-2} \sim 30 \text{ MJ.m}^{-2} \quad (25)$$

Nota : Nous supposons ici, que le sol restitue toute l'énergie reçue au cours de la journée.

### Chaleur stockée

Compte tenu de la taille modeste de la serre, celle-ci atteint un régime thermique stabilisé en quelques minutes. L'air confiné à l'intérieur de celle-ci est échauffé au contact du sol. Durant le court transitoire, une partie de cette chaleur est employée à échauffer l'air prisonnier de la serre. Tandis qu'en régime stabilisé, cette chaleur transite à travers la colonne d'air, sans modifier sa température, pour s'évacuer à l'extérieur à travers du plafond de la serre.

La chaleur accumulée au cours de cette période est :

$$Q_{st,air} = \rho \cdot h \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (26)$$

Prenons l'exemple d'une serre de culture maraichère d'une hauteur de 0,5 m et considérons que sa température s'élève de 2 K au cours de la journée, soit :

$$\Delta T = 2 \text{ K}$$

$\rho$  : la densité de la colonne d'air ( $1,22 \text{ kg/m}^3$ )

$h$  : la hauteur de la colonne d'air (0,5 m)

$c_p$  : la chaleur massique à pression constante ( $1,004 \text{ kJ/kg}$ )

Dans ces conditions, la chaleur confinée dans la serre représente alors  $1,2 \text{ kJ.m}^{-2}$ , à rapporter à la chaleur reçue par la serre de  $30 \text{ MJ/m}^2$ , soit un ratio de 0,004 %.

C'est-à-dire que l'on a 0,004 % de la chaleur qui reste confinée à l'intérieur de la serre, durant la journée de transitoire thermique, pour 99,996 % de la chaleur solaire restituée à l'extérieur de celle-ci.

La part de la chaleur stockée dans la serre paraît négligeable par rapport à l'énergie reçue. Pourtant, c'est ce qui caractérise la température de la serre par rapport à l'extérieur. Il suffit d'ouvrir le plafond, pour que l'air s'échappe et que la température chute à sa valeur initiale en quelques instants.

C'est tout le sens de l'expérience de Wood [3]. Que le plafond soit en verre ou en sel gemme, le confinement de l'air joue un rôle essentiel.

—

La quantité de chaleur encapsulée dans la serre ne variera pas avec la chaleur reçue par celle-ci : elle restera de 1,2 kJ, dans notre exemple, quel que soit le temps d'exposition au rayonnement solaire, qui sera de 210 MJ sur une semaine, ou de 11 GJ sur une année.

L'observation directe et la quantification des phénomènes de transitoires thermiques sont donc difficiles, d'autant que cela demande des outils d'au moins un ordre de grandeur

plus sensibles. Aucun appareil de mesure n'est capable d'une telle précision. Et cela devient inopératif en régime stabilisé. Il est alors impossible de déterminer les conditions thermiques de la serre depuis l'extérieur.

## 2-2 Extrapolation du bilan thermique d'une serre à une colonne d'air atmosphérique

Faire le parallèle entre atmosphère et serre est très réducteur. Cela vient directement des hypothèses non dites du modèle de l'équilibre thermique utilisé en Astronomie pour évaluer la température d'une planète munie d'une atmosphère (Planètes à effet de serre), qui donne une température homogène en tout point de sa surface.

Or, si l'on construit des serres, c'est pour préserver l'atmosphère intérieure des conditions extérieures : gelées, vents, pluies (ou sécheresses). Nous avons vu, dans notre préprint précédent [6], qu'une source de chaleur externe engendrait une distribution anisotrope des températures de surface, provoquant de grands mouvements de masses d'air.

C'est donc en toute conscience du degré élevé d'abstraction, que nous parlerons ici de *serre atmosphérique*, afin de dégager des notions capitales pour comprendre les mécanismes climatiques, et comment les activités humaines agissent dessus.

### Hypothèses et Apport solaire

Nous reprenons les mêmes hypothèses générales que pour la serre étudiée au chapitre 1 – 5, ainsi que l'apport solaire sur une journée.

L'air de notre serre était confiné par la présence d'un plafond physique (en verre ou en sel gemme, comme dans l'expérience de Wood [3]). Ici, la colonne d'air s'élève jusqu'à la tropopause, qui forme un plafond thermodynamique (seule véritable analogie entre la troposphère et une serre).

### Calcul de la chaleur stockée dans la colonne d'air

Nous pouvons calculer la masse de la colonne d'air par la différence de pression entre le niveau de la mer et celle à la tropopause :

$$m \cdot s^{-1} = (P_0 - P_1) \quad (27)$$

Et, en remplaçant  $\rho \cdot h$  de la relation (17) par  $m \cdot s^{-1}$ , nous avons la chaleur stockée dans la colonne d'air de la troposphère :

$$Q_{st,air} = m \cdot s^{-1} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (28)$$

avec :

$P_0$  : pression au niveau de la mer (101 325 Pa)

$P_1$  : pression à la tropopause (22 632 Pa)<sup>2</sup>

$\Delta T = 2$  K (objectif de la *Conférence de Paris* pour 2100 )

$C_p$  : la chaleur massique à pression constante (1,004 kJ/kg)

<sup>2</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re\\_normalis%C3%A9e](https://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_normalis%C3%A9e)

Ce qui nous donne :  $Q_{st,air} = 15,6 \text{ MJ.m}^{-2}$ , soit la moitié de l'apport solaire moyen sur une journée.

### 2-3 Temps de séjour et chaleur de rayonnement en transit

Parler de chaleur stockée était utile pour expliciter les conséquences thermiques du confinement de l'air dans une enceinte fermée. Toutefois, cela ne rend pas la dimension dynamique de cette retenue de chaleur. Nous préférons parler de chaleur en transit pour exprimer le fait que la chaleur ne cesse de circuler d'un potentiel élevé vers un potentiel inférieur.

Si la chaleur circule ainsi à travers un espace borné, il serait intéressant d'en connaître la vitesse et le temps de séjour dans cet espace.

Même dans un cas d'école simple, comme celui-ci, il n'existe pas de formulation mathématique nous permettant de calculer de façon rigoureuse le temps de séjour de la chaleur en transit dans une colonne d'air.

Par contre, nous connaissons la vitesse des transferts thermiques par rayonnement infrarouge. Il est alors intéressant de calculer la chaleur de rayonnement en transit dans la serre :

#### Calcul de la chaleur de rayonnement en transit dans la colonne d'air

$$Q_{st,IR} = \Phi_{IR} \frac{h}{C} \quad (29)$$

avec :

- $\Phi_{IR}$  : constante solaire [ $341 \text{ W.m}^{-2}$ ] ;
- $h$  : hauteur de la colonne d'air de la troposphère [ $12\,000 \text{ m}$ ] ;
- $C$  : célérité de la lumière [ $300\,10^6 \text{ m.s}^{-1}$ ].

Soit :  $Q_{st,IR} = 13,6 \text{ MJ.m}^{-2} \quad (30)$

Ainsi, la troposphère se caractérise thermiquement par deux grandeurs :

- Une chaleur encapsulée par l'air ( $Q_{st,air}$ ), qui fixe sa température interne ;
- Une chaleur de rayonnement ( $Q_{st,IR}$ ) en transit, sans impact sur une atmosphère neutre<sup>3</sup>.

Ces deux valeurs sont des constantes du système serre.

La forte disproportion en faveur de la chaleur stockée de l'air ( $\approx 10^9$  fois elle en transit de rayonnement) conforte l'expérience de Wood, et montre que l'on ne peut pas comprendre le climat en négligeant le stockage de chaleur dans l'atmosphère.

---

<sup>3</sup> Nous reviendrons sur ce point dans le prochain préprint, avec l'introduction de gaz à effet de serre.



### 3 DERIVE CLIMATIQUE

Une dérive climatique est la manifestation d'un désordre. Elle peut être interprétée de façon analytique comme la superposition des cycles thermiques à un lent transitoire.

Contrairement au transitoire étudié plus haut dans le cadre du bilan thermique d'une serre, la dérive climatique actuelle n'est pas un phénomène éphémère. C'est au contraire un phénomène durablement entretenu, dont le déséquilibre thermique est inversé :

$$Q_{sdc} > Q_{e_{sun}} \quad (31)$$

$$\Delta Q_{dc} = Q_{sdc} - Q_{e_{sun}} \quad (32)$$

#### 3-1 Cas d'une serre

De nombreuses serres, de culture ou d'acclimatation, sont chauffées artificiellement, souvent par conditionnement de l'air, afin d'obtenir une ambiance homogène. Cet apport de chaleur ( $\Phi_{ad}$ ) ne modifie pas notablement la température du sol, dont le flux de chaleur infrarouge reste largement majoritaire ( $\Phi_{IR} \gg \Phi_{cont} + \Phi_{ad}$ ).

Alternativement, l'on peut poser un plafond d'une plus grande résistance thermique, avec le même résultat sur la température interne.

#### 3-2 Cas de l'atmosphère

Nous pouvons évaluer la quantité de chaleur moyenne accumulée chaque jour par la dérive climatique terrestre actuelle.

Pour cela, nous considérons la masse de la troposphère calculée en (27), soit environ  $8.10^3 \text{ kg/m}^2$  et une estimation haute du réchauffement climatique, de  $6^\circ\text{C}$  en un siècle, soit un  $\Delta T$  moyen d'environ  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K/jour}$ . Nous avons alors une dérive quotidienne de la chaleur troposphérique de  $1,2 \text{ kJ/m}^2$ .

$$\frac{\Delta Q_{st}}{dt} = 1,2 \text{ kJ/m}^2/\text{jour} \quad (33)$$

Cela représente  $0,0004 \%$  de la chaleur solaire moyenne, ce qui ne permet pas une observation directement quantifiable. Le recours à des modélisations mathématiques, issues de traitements statistiques de relevés météorologiques sur de longues périodes, doit alors s'appuyer sur des phénomènes physiques étayés.

#### **Chaleur en transit et temps de séjour de la chaleur**

Le rayonnement infrarouge du sol vers l'espace traverse la troposphère en quelque 40 microsecondes. Cette brièveté est la cause de la modestie de la chaleur radiative en transit, un million de fois plus faibles que le supplément quotidien de la chaleur stockée dans la troposphère.

Les courants ascendants ont une vitesse allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres par seconde, pour les plus forts. Il en découle que le temps d'ascension des masses d'air chaud est de l'ordre, au bas mot, du millier de secondes. Mais l'essentiel du parcours

est parallèle à la surface du globe, dans un sens, à haute altitude, et dans l'autre, près du sol. L'on est alors dans un temps de cycle de l'ordre d'une à plusieurs semaines. Seulement une part marginale de chaleur s'évapore dans l'espace au cours de ce cycle. Il faut alors un certain nombre de cycles pour que la chaleur des masses d'air se renouvelle totalement.

Si la chaleur de l'air s'évanouissait dans le cosmos aussi rapidement par convection que par rayonnement, la Terre se comporterait comme la Lune, comme un caillou inerte, soumise aux seules lois de diffusion au sein des solides mises en équation par Fourier [1].

L'augmentation de la température de l'atmosphère est directement liée à la chaleur stockée dans la troposphère. Celle-ci est tout aussi sensible aux apports de chaleur endogènes (autres que solaires) qu'à l'allongement du temps de séjour de la chaleur en son sein. Ce sont ces paramètres, liés aux activités humaines, qu'il convient de mieux connaître.

## CONCLUSION

L'inertie thermique du système « sphère + atmosphère » couplée aux cycles quotidien et saisonnier conduit à ce que bien que l'on puisse être en régime stabilisé, crée un déséquilibre thermique instantané permanent. Ce n'est qu'en intégrant les énergies reçues et dissipées sur l'ensemble des cycles, que le bilan se neutralise, si rien ne vient le perturber.

Par son inertie thermique, l'enthalpie de l'atmosphère se maintient à un niveau correspondant à la température d'équilibre global. Cette énergie est sans cesse remplacée, et peut être caractérisée par un temps de séjour incomparablement supérieur à celui de rayonnement.

La dérive climatique induit une perturbation du système, qu'un accroissement faible de l'énergie stockée dans l'atmosphère ou l'allongement du temps de séjour peut occasionner

S'il est difficile de quantifier avec précision l'énergie stockée et son temps de séjour dans l'atmosphère, l'on peut — et l'on doit, dans la recherche des causes d'une dérive climatique —, être attentif à tout ce qui peut faire évoluer ces paramètres dans notre environnement.

### **Limites du cas d'école**

Les hypothèses d'un air immobile et de températures homogènes nous a permis de raisonner sur un modèle simplifié pour dégager des notions importantes.

Toutefois, nous avons vu dans notre article précédent [6] que la distribution anisotrope de la température et la rotation de la sphère entraînaient la mise en mouvement des masses d'air, avec la transformation d'une partie de la chaleur du système en énergie motrice, suivant les principes énoncés par Carnot.

Cela donne un système climatique complexe autonome, très différent du strict modèle radiatif, que nous examinerons dans le prochain article.

—

## REFERENCES

### A. Textes classiques

- [1] J.-B. Fourier, *Théorie analytique de la chaleur*. Paris: Firmin Didot, 1822.  
(*Texte fondateur sur la diffusion thermique et les notions d'inertie thermique.*)
- [2] J.-B. Fourier, "Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires," *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, vol. 7, pp. 570–604. Paris: Didot, 1827.
- [3] R. W. Wood, "Note on the Theory of the Greenhouse," *Philosophical Magazine*, ser. 6, vol. 17, pp. 319–320, 1909.
- [4] H.-B. de Saussure, *Essai sur l'hygrométrie*. Paris: Bachelier, 1783.

### B. Travaux PRIMEVOIRE

- [PR1] G. Marguerite, Critique du modèle d'équilibre thermique : mise en évidence des mécanismes d'homogénéisation, Zenodo, 2025a. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.5281/zenodo.15276354>.
- [PR2] G. Marguerite, La machine thermique atmosphérique : approche thermodynamique appliquée à une atmosphère neutre, Zenodo, 2025b. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.5281/zenodo.16600937>.