Chapitre 6.2 – L'effet de serre et le déséquilibre énergétique de la Terre

Émittance

L'émittance correspond à l'intensité de rayonnement électromagnétique émise par la surface d'un corps à une température T donnée. À partir d'un spectre d'émission $I_\lambda(\lambda, T)$ en W/m^2 par nm, nous pouvons évaluer l'émittance totale $I_{\text{émi}}$ par la somme des contributions de toutes les longueurs d'onde λ pour une température T :

$$I_{\text{émi}} = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_\lambda(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda$$

où $I_{\text{émi}}$: Émittance totale (W/m^2).

$I_\lambda(\lambda, T)$: Émittance pour une longueur d'onde λ avec une surface à température T ($\frac{\text{W/m}^2}{\text{nm}}$).

λ : Une longueur d'onde dans le spectre d'émission (m).

T : Température de la surface (K).

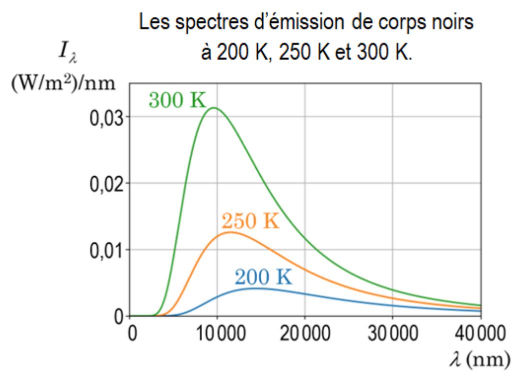
Il est à noter que la fonction

$$I_\lambda(\lambda, T)$$

peut être très complexe, mais qu'elle peut se réduire à la distribution de la loi de Planck

$$I_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5\left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1\right)}$$

si l'approximation du corps noir est admissible.



Émittance de la Terre à sa surface sous l'approximation du corps noir

Avec une température planétaire moyenne estimée[1] à

$$T_{2025} = 288\ \text{K} = 15\,°\text{C}$$

(Température planétaire moyenne estimée en 2025)

la planète Terre est un émetteur d'infrarouge selon la théorie du spectre d'émission d'un corps noir.

En exploitant l'approximation du corps noir et sans atmosphère, à cette température de 15 ºC, l'émittance à la surface de la Terre serait de l'ordre de

$$\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})} = 390\ \text{W/m}^2$$

ce qui provoquerait un refroidissement spectaculaire de la planète puisque $\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})} > \bar{I}_{\text{inc}} = 340\ \text{W/m}^2$.

<u>Preuve :</u>

En utilisant la loi de Stefan-Boltzmann $I = \sigma T^4$ correspondant exactement à

$$I_{\text{émi}} = \int_{\lambda=0}^{\infty} I_\lambda(\lambda, T)\,\mathrm{d}\lambda \quad \text{où} \quad I_\lambda = 2\pi hc^2 / \lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1 \right) \ ,$$

nous pouvons évaluer l'émittance $\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})}$ de la façon suivante :

$$\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})} = \sigma T^4 \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})} = \left(5{,}67 \times 10^{-8} \frac{\text{W/m}^2}{\text{K}^4} \right) (288\ \text{K})^4$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN})} = 390{,}08\ \text{W/m}^2} \qquad ■$$

Situation A : ***Une surface de planète « corps noir » avec albédo en équilibre thermique.*** À partir de la constante solaire S = 1,36 kW/m², d'un albédo de 0,3 et de l'approximation du corps noir avec planète sans atmosphère, déterminez la température $T_{\text{CN}\alpha}$ à la surface de la Terre qui serait nécessaire pour que la Terre soit en équilibre thermique.

Évaluons l'irradiance incidente moyenne sur la planète Terre :

$$\bar{I}_{\text{inc}} = \frac{1}{4} S \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{inc}} = \frac{1}{4} \left(1{,}36\ \text{kW/m}^2 \right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\bar{I}_{\text{inc}} = 340\ \text{W/m}^2}$$

Évaluons l'irradiance absorbé à la surface de la planète Terre :

$$\bar{I}_{\text{abs}} = (1-\alpha)\bar{I}_{\text{inc}} \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{\text{abs}} = \left(1-(0{,}3)\right)\left(340\,\text{W/m}^2\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{\bar{I}_{\text{abs}} = 238\ \text{W/m}^2}$$

Considérant l'hypothèse de l'équilibre thermique de la planète Terre, évaluons l'émittance sous l'approximation du corps noir qui serait requise :

$$\bar{I}_{\text{abs}} + \bar{I}_{\text{émi}(\text{CN}\alpha)} = 0 \quad \Rightarrow \quad \left(238\,\text{W/m}^2\right) + \bar{I}_{\text{émi}(\text{CN}\alpha)} = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\bar{I}_{\text{émi}(\text{CN}\alpha)} = -238\ \text{W/m}^2}$$

[1] Estimation obtenue à l'aide de plusieurs mesures effectuées sur plusieurs années à différents points à la surface de la Terre.

Évaluons la température à la surface de la planète Terre dans ces conditions hypothétiques en exploitant la loi de Stefan-Boltzmann :

$$I = \sigma T^4 \quad \Rightarrow \quad T = \left(\frac{I}{\sigma}\right)^{1/4} \qquad \text{(Isoler } T\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad T = \left(\frac{\left(238\ \text{W/m}^2\right)}{\left(5{,}67\times10^{-8}\ \text{W/m}^2/\text{K}^4\right)}\right)^{1/4} \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

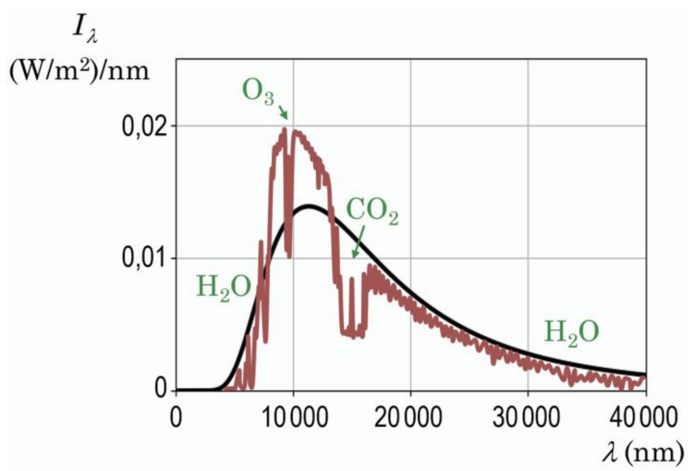
$$\Rightarrow \quad \left(T_{\text{CN}\alpha}\right) = 254{,}53\ \text{K} \qquad \text{(Définition de } T_{\text{CN}\alpha}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{T_{\text{CN}\alpha} = -18{,}76\,^\circ\text{C}} \qquad \left(T(\text{K}) = 273 + T(^\circ\text{C})\right)$$

Remarque : Dans le livre de référence, cette température $T_{\text{CN}\alpha}$ porte le nom température du *modèle corps noir avec albédo*. Elle est nettement inférieure à 15 ºC ce qui prouve que ce modèle est insuffisant pour expliquer l'émittance réelle de la Terre d'où la nécessité d'exploiter l'interaction atmosphère-rayonnement dans le modèle d'émittance de la Terre. Cette interaction est à la base de la définition de *l'effet de serre*.

Émittance de la Terre mesurée en haute atmosphère

À l'aide de nombreux détecteurs placés sur des satellites et en s'appuyant sur des modèles[2] décrivant l'absorption et la réémission du rayonnement infrarouge par l'atmosphère, nous pouvons obtenir le sceptre d'émission moyen de notre planète à un température moyenne de surface 15 ºC qui inclue le rayonnement des continents, des océans et de l'atmosphère vers l'espace :



En réalisant l'intégrale numérique de ce spectre, nous obtenons une émittance approximative de

$$\bar{I}_{\text{émi}} = 237\ \text{W/m}^2$$

(Émittance de la surface de la Terre mesuré en haute atmosphère)

Preuve :

Malheureusement, en raison de la nature numérique du modèle planétaire du spectre d'émission moyen, il n'est pas possible algébriquement d'obtenir l'aire sous la courbe de ce graphique.

[2] Ces modèles sont très complexes, car ils font intervenir plusieurs interactions entre la lumière et différents atomes et molécules dans l'atmosphère ce qui n'a pas été abordé en détail dans ce cours.

Fait à noter :

- λ : 8 000 à 12 000 nm :
    - À ces longueurs d'onde, l'atmosphère est relativement transparente provoquant plus de réémission vers l'espace.
    - L'intensité mesurée est plus élevée que celle prédite par le modèle du corps noir.
    - Présence d'un creux de rayonnement autour de λ = 9 000 nm en raison d'une raie d'absorption causée par la molécule d'ozone O_3 présente dans l'atmosphère.

- λ : 14 000 à 16 000 nm :
    - À ces longueurs d'onde, l'atmosphère est plus opaque provoquant moins de réémission vers l'espace
    - L'intensité mesurée est plus faible que celle prédite par le modèle du corps noir.
    - Présence de larges bandes d'absorption en raison de plusieurs raies d'absorption causée par la molécule de CO_2 présente dans l'atmosphère.

- λ : 4 000 à 40 000 nm :
    - Présence de plusieurs raies d'absorption (bris dans la continuité du spectre) en raison de la présence de vapeur d'eau H_2O dans l'atmosphère.

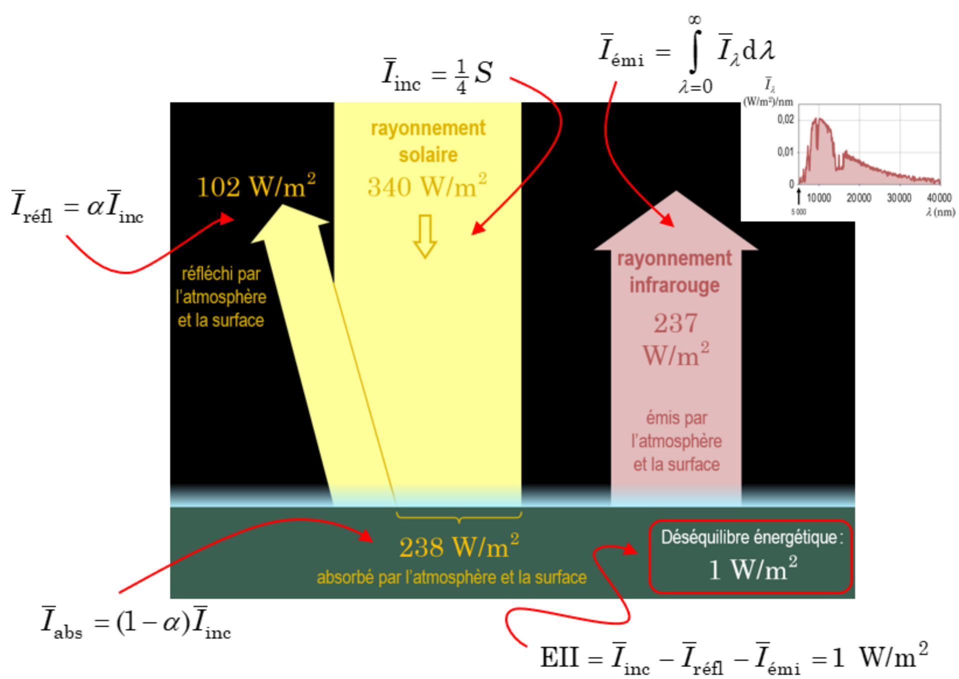
Le déséquilibre énergétique de la Terre

Puisque la Terre reçoit du Soleil par irradiation plus d'énergie que la Terre n'en évacue par émittance, le déséquilibre énergétique de la Terre (EEI : *Earth's Energy Imbalance*) est alors positif.

En moyenne sur (**1**) l'ensemble de la surface de la Terre, (**2**) sur le cycle des saisons et (**3**) sur les cycles solaires, le déséquilibre énergétique de la Terre est estimé à

$$\mathrm{EEI} = 1 \ \mathrm{W/m^2} \ .$$

(Déséquilibre énergétique de la Terre estimé en 2025)



Preuve :

À partir des différents mécanismes étudiés d'irradiation entrant et sortant de la planète Terre, évaluons le déséquilibre énergétique EEI en W/m^2 basé sur un albédo $\alpha = 0,3$:

$$\text{EEI} = \sum \bar{I}_{\text{entrant}} - \sum \bar{I}_{\text{sortant}} \quad \Rightarrow \quad \text{EEI} = \left(\bar{I}_{\text{inc}}\right) - \left(\bar{I}_{\text{réfl}} + \bar{I}_{\text{émi}}\right)$$

$$\Rightarrow \quad \text{EEI} = \bar{I}_{\text{inc}} - \left(\alpha \bar{I}_{\text{inc}}\right) - \bar{I}_{\text{émi}}$$

$$\Rightarrow \quad \text{EEI} = (1-\alpha)\bar{I}_{\text{inc}} - \bar{I}_{\text{émi}}$$

$$\Rightarrow \quad \text{EEI} = \left(1-(0,3)\right)\left(340\ \text{W/m}^2\right) - \left(237\ \text{W/m}^2\right)$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2} \quad \blacksquare$$

Situation B : *L'absorption de l'énergie dans l'eau de la Terre.* À partir du déséquilibre énergétique planétaire de la Terre de EEI = 1 W/m^2, estimez l'augmentation de la température de l'eau entre 2025 et 2026 en considérant que l'ensemble du surplus énergie provenant du déséquilibre énergétique planétaires était stocké dans l'eau de la Terre sachant que 0,023% de la masse de la Terre[3] correspond à de l'eau (hydrosphère), que la masse volumique de la Terre[4] est ρ = 5 515 kg/m^3 et que son rayon est R = 6 378 km.

Dans ce calcul, il est important de noter que le changement de température sur une année n'affectera pas significativement l'émittance $\bar{I}_{\text{émi}} = 237\ \text{W/m}^2$ qui dépend de la température de la Terre. Ainsi, sur une année, nous allons considérer que $\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2$ est constant.

Débutons par évaluer la masse de la Terre :

$$M = \rho V \quad \Rightarrow \quad M = \rho\left(\frac{4\pi R^3}{3}\right) \qquad \left(\text{Volume : } V = \frac{4\pi R^3}{3}\right)$$

$$\Rightarrow \quad M = \left(5515\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)\frac{4\pi\left(6378\times10^3\,\text{m}\right)^3}{3} \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{M = 5,9935\times10^{24}\,\text{kg}} \qquad \text{(Évaluer } M\text{)}$$

Évaluons la masse d'eau sur Terre :

$$m = (0,023\%)M \quad \Rightarrow \quad m = \left(\frac{0,023}{100}\right)\left(5,9935\times10^{24}\,\text{kg}\right) \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{m = 1,3785\times10^{21}\,\text{kg}} \qquad \text{(Évaluer la masse d'eau)}$$

[3] Référence : https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrosphere

[4] Référence : https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_mass

Évaluons l'énergie moyenne accumulées durant une année avec $\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2$ et la définition de la puissance moyenne $\bar{P}$:

$$\bar{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \qquad \text{(Puissance moyenne)}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E = P\Delta t \qquad \text{(Isoler } \Delta E\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E = (I\ A)\Delta t \qquad \text{(Intensité : } I = \frac{P}{A}\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E = I\left(4\pi R^2\right)\Delta t \qquad \text{(Surface : } A = 4\pi R^2\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\Delta E = 4\pi R^2 \left(\text{EEI}\right)\Delta t} \qquad (I = \text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2)$$

$$\Rightarrow \quad \Delta E = 4\pi\left(6378\times10^3\right)^2\left(1\,\text{W/m}^2\right)\left(\frac{365,25\,\text{jour}}{1\,\text{an}}\times\frac{24\,\text{h}}{\text{jour}}\times\frac{60\times60\,\text{s}}{\text{h}}\right) \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\Delta E = 1,6132\times10^{22}\,\text{J}} \qquad \text{(Évaluer } \Delta E\text{)}$$

Évaluons l'augmentation de la température de l'eau en utilisant la capacité calorifique de l'eau de $C_{\text{eau}} = 4180\,\frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}$:

$$Q = mC\Delta T \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \frac{Q}{mC} \qquad \text{(Isoler } \Delta T\text{)}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta T = \frac{\left(1,6132\times10^{22}\,\text{J}\right)}{\left(1,3785\times10^{21}\,\text{kg}\right)\left(4180\,\frac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}\right)} \qquad \text{(Remplacer valeurs num.)}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\Delta T = 0,00280\ °\text{C}} \qquad \text{(Évaluer } \Delta T\text{)}$$

De ce calcul, nous pouvons définir un rythme d'augmentation de la température de l'eau tel que

$$\frac{\Delta T_{\text{eau}\left(1\,\text{W/m}^2\right)}}{\Delta t} = 0,00280\ °\text{C}\,/\,\text{an} \quad .$$

Si l'on suppose toujours que $\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2$ est constant dans le temps, il faudrait alors

$$\frac{1°\text{C}}{\Delta T\,/\,\Delta t} = \frac{1°\text{C}}{0,00280\ °\text{C/an}} = 357,2\ \text{ans}$$

pour que <u>cette masse d'eau augmente d'un seul degré</u> ce qui semble nettement sous-estimer les mesures observées par la communauté[5] scientifique.

[5] Des mesures scientifiques seront présentées dans la suite de ce document pour justifier ce commentaire.

Situation B : ***L'absorption de l'énergie dans l'atmosphère de la planète.*** À partir du déséquilibre énergétique planétaire de la Terre de EEI = 1 W/m^2, estimez l'augmentation de la température de l'atmosphère entre 2025 et 2026 en considérant que l'ensemble du surplus énergie provenant du déséquilibre énergétique planétaires était stocké dans l'atmosphère de la Terre sachant que la masse de l'atmosphère[6] correspond à 8,618 ×10^{-7} de celle de la Terre.

À partir de la masse de la Terre $M = 5{,}9935\times10^{24}\,\text{kg}$ obtenue précédemment, évaluons la masse de l'atmosphère :

$$m = \left(8{,}618\times10^{-7}\right)M \quad\Rightarrow\quad m = \left(8{,}618\times10^{-7}\right)\left(5{,}9935\times10^{24}\,\text{kg}\right) \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow\quad \boxed{m = 5{,}1652\times10^{18}\,\text{kg}} \qquad \text{(Évaluer masse de l'atmosphère)}$$

À partir de l'énergie $\Delta E = 1{,}6132\times10^{22}\,\text{J}$ accumulée sur une année obtenue précédemment, évaluons l'augmentation de la température de l'atmosphère en utilisant la capacité calorifique de l'air $C_{\text{air}} = 1005\,\dfrac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}$:

$$Q = mC\Delta T \quad\Rightarrow\quad \Delta T = \frac{Q}{mC} \qquad \text{(Isoler la variation de température)}$$

$$\Rightarrow\quad \Delta T = \frac{\left(1{,}6132\times10^{22}\,\text{J}\right)}{\left(5{,}1652\times10^{18}\,\text{kg}\right)\left(1005\,\dfrac{\text{J}}{\text{kg}\,°\text{C}}\right)} \qquad \text{(Remplacer valeurs numériques)}$$

$$\Rightarrow\quad \boxed{\Delta T = 3{,}108\ °\text{C}} \qquad \text{(Évaluer } \Delta T\text{)}$$

De ce calcul, nous pouvons définir un rythme d'augmentation de la température de l'atmosphère tel que

$$\frac{\Delta T_{\text{atm}\left(1\,\text{W/m}^2\right)}}{\Delta t} = 3{,}108\ °\text{C}\,/\,\text{an} \quad .$$

Si l'on suppose toujours que $\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2$ est constant dans le temps, il faudrait alors

$$\frac{1°\text{C}}{\Delta T/\Delta t} = \frac{1°\text{C}}{3{,}108\ °\text{C/an}} = 0{,}322\ \text{ans} = 117{,}5\ \text{jours}$$

pour que <u>cette masse d'air augmente d'un seul degré</u> ce qui serait complètement alarmant au sujet du réchauffement climatique.

---

[6] Référence : https://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_terrestre

Le réchauffement de la Terre observé entre 1850 et 2020

Par rapport à des mesures de température prisent à l'époque préindustrielle comprise en 1850 et 1900, la température moyenne observée sur Terre entre 2013 et 2022 serait supérieure[7] à

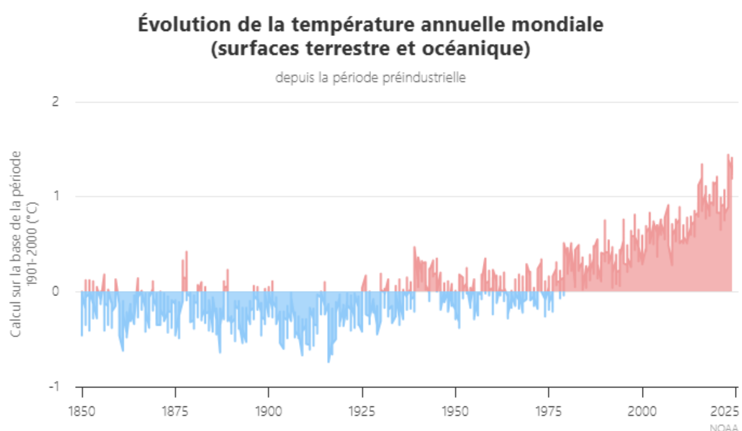
$$\Delta T_{\text{obs}(1850-2022)} = 1{,}14\,°\text{C} \quad .$$

(Variation de température moyenne mesurée en 1850 et 2022)

On peut ainsi prétendre que sur une période approximative[8] de 168 ans, la température terrestre aurait augmenté en moyenne de

$$\frac{\Delta T_{\text{obs(1850-2022)}}}{\Delta t} = \frac{1{,}14\,°\text{C}}{168\,\text{ans}} = 0{,}0068\,°\text{C/an} \quad .$$

Selon le rapport[9] du **G**roupe d'**E**xpert **I**ntergouvernemental sur l'**É**volution du **C**limat (GIEC), le réchauffement climatique est en phase d'accélération en raison de l'augmentation des *gaz à effet de serre* (GES). Le graphique ci-contre illustre une augmentation remarquable à partir de 1975.



https://climat.be/changements-climatiques/changements-observes/rechauffement-planetaire

Illustration de l'écart de température annuelle par rapport à une moyenne des températures au 20e siècle ce qui illustre une nette tendance à la hausse à partir de 1975.

Nous devons arriver à la conclusion que :

Le mécanisme reliant le déséquilibre énergétique de la Terre $\text{EEI} = 1\ \text{W/m}^2$ mesuré en date de 2025 provoquant une augmentation globale de la température de la Terre nécessite un modèle très complexe. Les mécanismes d'emmagasinement de l'énergie strictement dans l'eau de la Terre avec

$$\frac{\Delta T_{\text{eau}\left(1\,\text{W/m}^2\right)}}{\Delta t} = 0{,}00280\ °\text{C / an}$$

ou strictement dans l'atmosphère de la Terre avec

$$\frac{\Delta T_{\text{atm}\left(1\,\text{W/m}^2\right)}}{\Delta t} = 3{,}108\ °\text{C / an}$$

sont nettement insuffisant pour justifier l'augmentation de la température observée sur Terre de

$$\frac{\Delta T_{\text{obs(1850-2022)}}}{\Delta t} = 0{,}0068\,°\text{C/an} \quad .$$

---

[7] Référence : https://climat.be/changements-climatiques/changements-observes/rechauffement-planetaire

[8] Le 168 ans correspondrait à l'intervalle d'années entre 1975 et 2018 étant le milieu des dates de référence des mesures.

[9] Le rapport est disponible au lien suivant : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf