

MOOC CLIMAT

Causes et enjeux du changement climatique



SEMAINE 1 : LE CLIMAT

Ce document contient les transcriptions textuelles des vidéos proposées dans la partie « L'effet de serre » de la semaine 1 du MOOC « Causes et enjeux du changement climatique ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.

Le rôle de l'effet de serre sur le climat, de Joseph Fourier à aujourd'hui

Jean-Louis DUFRESNE

Directeur de recherche – CNRS

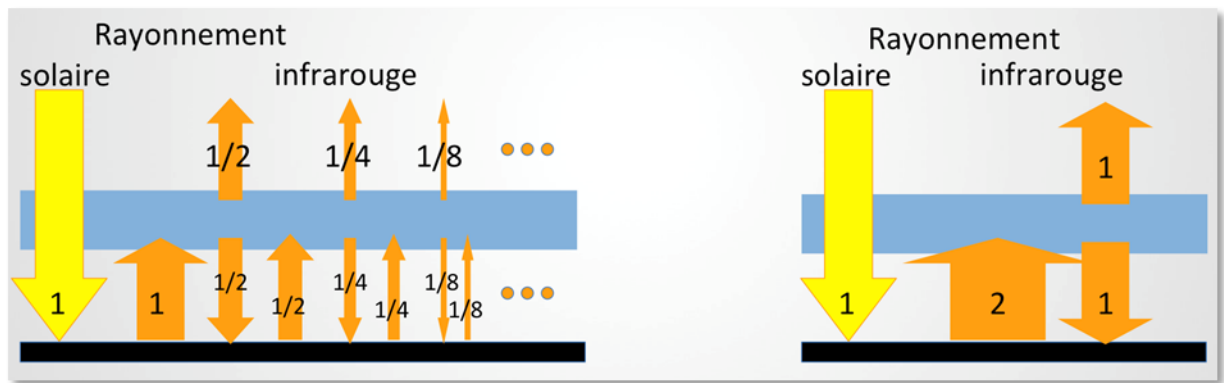
C'est Joseph Fourier au début du XIXe siècle qui le premier a mis en évidence ce qu'on appelle maintenant l'effet de serre. Alors à l'époque, il cherchait à comprendre quels étaient les phénomènes physiques qui régissaient la température de la Terre, avec une hypothèse implicite à l'époque qui était très forte, qui était que la Terre était chauffée par l'intérieur de la Terre qui était très chaud, donc il y avait une espèce de boule de feu, et ça, ça réchauffait la surface et ça avait un rôle important sur la surface.

- Alors, en mesurant des différences de température, entre les gradients de température, comment elle évoluait dans le sol - notamment dans les mines de charbon -, en fait il a pu mettre en évidence que la terre, la chaleur qui venait du centre de la Terre, jouait un rôle négligeable sur la température de surface et ça c'est confirmé maintenant par un tas d'autres mesures.
- Et donc, si ce n'était pas l'intérieur de la Terre qui contrôlait la température de surface, et bien c'était l'extérieur, c'est-à-dire les échanges entre la Terre et le Soleil d'une part et le ciel ou l'espace de l'autre.

Quel était le cadre conceptuel qu'il a mis en place à l'époque ?

- C'était : la Terre est réchauffée par le rayonnement solaire, qui lui apporte de l'énergie, cette énergie chauffe la Terre et au bout d'un certain temps, la Terre émet du rayonnement infrarouge, perd son énergie, perd l'énergie qu'elle a reçue du Soleil sous forme de rayonnement infrarouge et la température s'ajuste pour que la Terre perde autant d'énergie qu'elle en reçoit.
- ⇒ Alors, donc ça c'est un cadre qui existe toujours, qui est vrai pour la Terre mais qui est aussi vrai pour les autres planètes.
- Alors, dans le cadre de la Terre, l'énergie du soleil arrive et à peu près un tiers de cette énergie solaire est réfléchi vers l'espace, en partie beaucoup par les nuages et puis un peu aussi par les déserts ou les surfaces très claires comme la neige.
- Donc la partie qui est absorbée par la Terre sert à réchauffer la Terre et après cette énergie est perdue vers l'atmosphère, cette énergie sert à réchauffer l'atmosphère et l'atmosphère elle-même se refroidit en émettant du rayonnement infrarouge vers l'espace.
- Si on regarde la Terre depuis l'extérieur, par exemple par les satellites, on observe que la Terre reçoit en moyenne 240 W/m^2 d'énergie solaire et elle perd la même quantité d'énergie sous forme de rayonnement infrarouge. Elle perd 240 W/m^2 .
- ⇒ Par contre, si on regarde l'énergie infrarouge émise par la surface de la Terre, et bien on observe que cette énergie est de l'ordre de 390 W/m^2 .
- Donc, l'énergie émise par la surface de la Terre est beaucoup plus importante que l'énergie perdue au sommet de l'atmosphère.
- ⇒ Donc il y a une espèce de piégeage du rayonnement infrarouge par l'atmosphère. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

Alors pour essayer de l'expliquer, on peut cheminer disons, regarder comment se comporterait une vitre idéalisée, c'est-à-dire une vitre qui n'absorbe pas du tout le rayonnement solaire, par contre qui absorbe totalement le rayonnement infrarouge. Comment se comporterait une plaque située en dessous de cette vitre ?



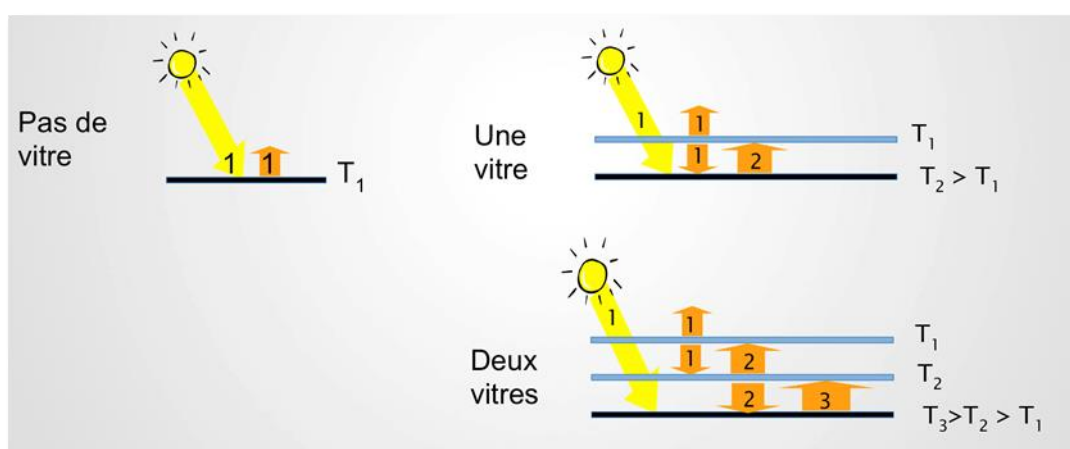
- Alors, la vitre, la plaque échauffée par le soleil, donc si elle reçoit une certaine quantité d'énergie, disons 1, en unités arbitraires, à un moment elle va perdre cette même quantité d'énergie par émission de rayonnement infrarouge.
- Cette énergie perdue va aller au-dessus, va être émise, va servir à chauffer la vitre, qui va perdre cette énergie en émettant du rayonnement infrarouge et cette énergie sera perdue moitié vers le haut, moitié vers le bas.
- ⇒ La partie vers le haut est perdue vers l'espace et la partie vers le bas sert à réchauffer la surface, donc va se réchauffer, et mettre davantage de rayonnement infrarouge.
- ⇒ Ce rayonnement infrarouge sera à nouveau absorbé par la surface, par la vitre, qui va s'échauffer, qui va émettre moitié vers le haut, moitié vers le bas.
- ⇒ La partie vers le bas va être à nouveau absorbée par la surface qui va se réchauffer etc.
- Si on fait la somme de tous ces termes-là, on obtient que l'énergie solaire qui arrive (d'unité 1), est perdue par la vitre.
- ⇒ Donc il y a conservation de l'énergie.
- Par compte la surface, par toute cette espèce de mécanisme de rayonnement qui est émis vers la vitre, par la vitre vers le bas et autre, la surface n'émet plus 1 comme au début, mais elle émet 2.
- ⇒ Sa température est augmentée grâce à l'effet de serre.
- Alors, tout ça, ça peut être calculé de façon précise sur la Terre. On connaît un certain nombre de propriétés des gaz, certains gaz absorbent le rayonnement infrarouge.
- On est capable de calculer ce qu'on appelle l'équation de transfert radiatif et on est capable de faire des mesures.
- Donc, comme je l'ai dit tout à l'heure, la surface émet 390 W par mètre carré et il en sort seulement 240.

- Donc il y a 150 W par mètre carré qui sont piégés par l'effet de serre et par le calcul, on peut montrer qu'en ciel clair, la vapeur d'eau est le principal gaz à effet de serre.
- ⇒ Il contribue à peu près à 60 % de l'effet de serre - ciel clair.
- Le CO₂ (dioxyde de carbone) est le deuxième gaz à effet de serre qui contribue à peu près à un quart.
- Et le restant, c'est les autres gaz qui contribuent à l'effet de serre que sont l'ozone, le protoxyde d'azote et le méthane, plus après d'autres gaz de façon plus marginale.
- Donc les principaux résultats : l'effet de serre, essentiellement la vapeur d'eau, plus de la moitié et ensuite deuxième gaz à effet de serre, c'est le CO₂.

Alors dans notre schéma de tout à l'heure, on avait pris une vitre qui était parfaitement transparente au rayonnement solaire et qui absorbait totalement le rayonnement infrarouge au-dessus d'une surface.

Donc on peut se demander du coup, est-ce cet effet de serre il est maximum dans la mesure où la vitre absorbe déjà tout le rayonnement infrarouge ou est-ce qu'il pourrait être encore augmentée ?

- La vitre, elle ne peut pas absorber plus qu'elle n'absorbe dans l'infrarouge puisqu'elle absorbe déjà tout mais par contre on peut quand même augmenter l'effet de serre en mettant une deuxième vitre au-dessus de la première.
- Donc je ne vais pas rentrer dans les détails mais on comprend bien que si on met une deuxième vitre au-dessus de la précédente, et bien à nouveau il y a tous les échanges dont on a parlé tout à l'heure qui vont se mettre en place et donc on va avoir un effet de serre plus efficace et puis pareil si on ajoute une troisième, une quatrième vitre etc.



- Pourquoi je dis ça ? Parce que si on regarde comment l'absorption de l'atmosphère change avec la concentration de CO₂, et bien on s'aperçoit que pour les très faibles concentrations de CO₂, beaucoup plus faibles que celle d'aujourd'hui, et bien

l'absorption augmente avec la concentration de CO₂, mais par compte, pour les concentrations proches de celles d'aujourd'hui (autour de 380 - 400 ppm), et bien l'absorption elle augmente un tout petit peu avec le CO₂ mais très peu.

- ⇒ Alors que les calculs, avec ces mêmes modèles qui montrent que l'absorption change peu mais montrent que ça change des effets radiatifs et donc ça change l'effet de serre.
- Alors pourquoi ? Pour la raison que je viens d'évoquer : si on a une seule vitre comme tout à l'heure et bien, on voit qu'on a un espèce d'effet de serre qui semble saturé, par contre si on met une vitre au-dessus de la précédente et bien, l'effet de serre continue à augmenter.
- Dans le cas du CO₂, qu'est-ce que ça veut dire ? Ça veut dire que quand on augmente la concentration de CO₂, ce n'est pas le bas de l'atmosphère qui joue un rôle important, c'est le haut de l'atmosphère, c'est l'effet de serre dans le haut de l'atmosphère qui pilote le contrôle et qui fait que l'effet de serre augmente quand on augmente le CO₂.
- Donc là, ici, il y a un paradoxe qui peut sembler un paradoxe qui a été émis il y a un peu plus d'un siècle, qui est maintenant bien compris et qui montre qu'il n'y a pas d'effet de serre maximum, notamment en ce qui concerne le CO₂.
- ⇒ Il y a un effet de saturation de l'absorption mais pas dans l'effet de serre.
- Donc l'effet de serre c'est un phénomène physique qui est bien compris, qui est bien calculé, qui est bien observé : on mesure des spectres infrarouges tous les jours à la fois à la surface de la Terre et puis aussi par l'espace, on est capable de calculer ça avec les modèles et de les valider avec les opérations satellitaires ou les observations qui sont faites à la surface.
- Donc c'est un phénomène physique qui est en fait très bien connu, ça ne veut pas dire qu'il est simple - là je l'ai exposé de façon très simple mais en fait il est beaucoup plus compliqué que ça -, mais il est bien connu.
- Alors, justement, ce qu'il y a c'est que l'effet de serre, ça fait penser à une serre horticole, alors que tous les phénomènes qui se passent dans l'atmosphère et que j'ai rapidement évoqués sont en fait très différents de ceux qui se passent dans la serre horticole.
- ⇒ Donc c'est un vrai phénomène physique, par compte l'analogie avec ce qui se passe dans une serre horticole, le vocabulaire peut prêter à confusion.

Donc aujourd'hui, c'est quelque chose qui bien établi en termes scientifiques et si on augmente l'effet de serre, par exemple en augmentant la concentration de CO₂ ou lorsque la concentration de vapeur d'eau augmente, et bien on va augmenter la température de la Terre. Ça ce sont des choses qui sont extrêmement robustes.

Alors par contre, les questions scientifiques qui sont derrière, c'est effectivement de calculer précisément ce réchauffement, notamment en prenant en compte que tout le reste va varier, notamment la vapeur d'eau et surtout calculer les conséquences de ce réchauffement sur la pluie, les vents, la distribution de vapeur d'eau, les phénomènes climatiques tels que les tempêtes, les ouragans etc.

⇒ Ça ce sont des questions scientifiques extrêmement ouvertes.

⇒ Par compte l'effet de serre lui-même, les échanges radiatifs, on travaille pour calculer plus précisément, mais on comprend bien et donc c'est maintenant un phénomène physique très solide.

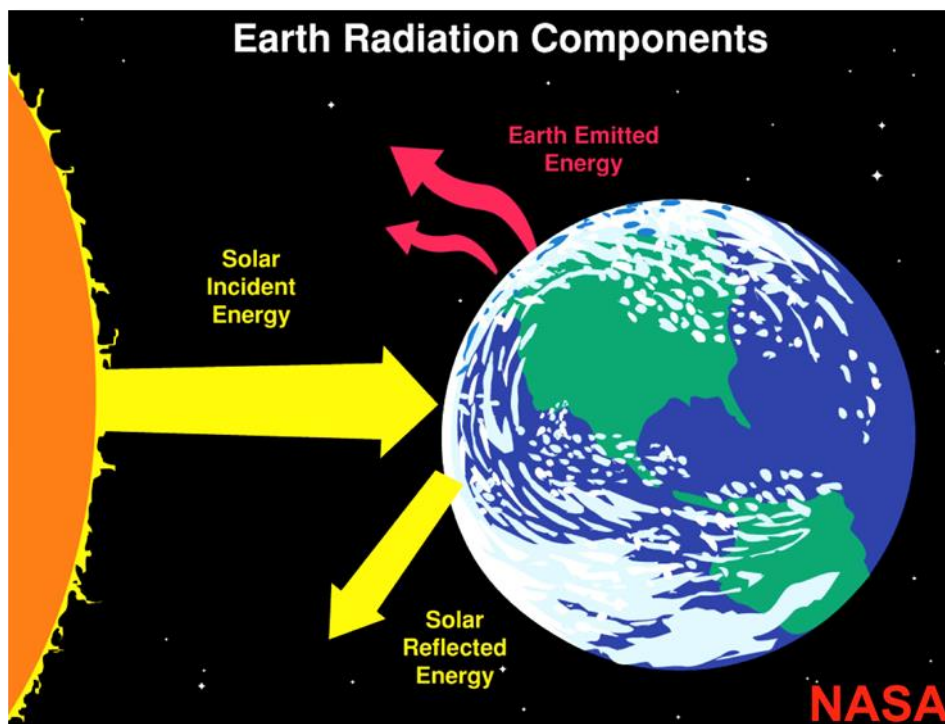
Un schéma de compréhension de l'effet de serre de l'atmosphère terrestre

Laurent LI

Directeur de recherche – CNRS

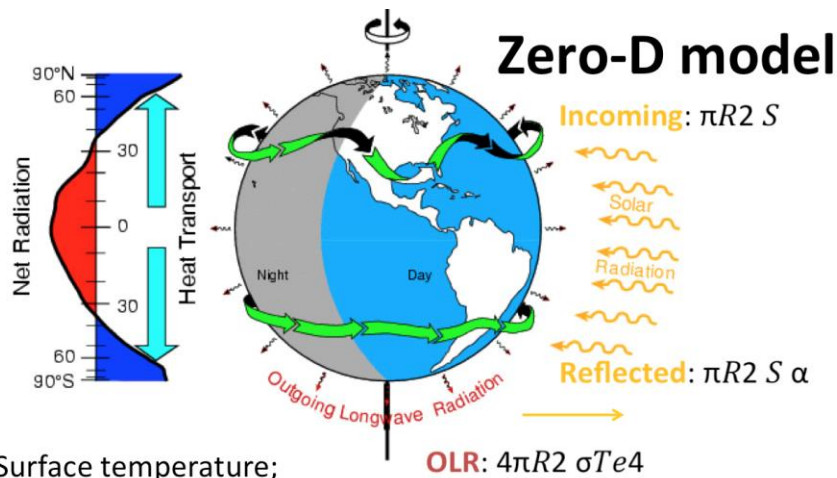
Aujourd'hui je vais vous parler de l'effet de serre. Donc je vais utiliser quelques schémas et modèles simples pour vous introduire une notion extrêmement importante pour comprendre le changement climatique et pour comprendre le comportement du système climatique. Donc il s'agit de l'effet de serre de l'atmosphère terrestre.

Je vais utiliser aujourd'hui seulement le bilan radiatif pour faire la démonstration. Donc le bilan radiatif justement, voici une démonstration de la Terre dans l'espace.



- Donc la géothermie sur la Terre est complètement négligeable pour le comportement climatique, donc la seule source d'énergie sur la Terre est venue du Soleil.
- Elle est venue du Soleil sur la longueur d'onde visible. Donc on reçoit de l'énergie du Soleil visible.
- La Terre émet aussi de l'énergie dans la longueur d'onde infrarouge. Donc il y a un certain équilibre entre cette énergie reçue du Soleil et émise par la Terre.

⇒ Donc ici on peut construire un modèle Zéro Dimension. Donc on va faire la moyenne sur l'ensemble de la Terre.



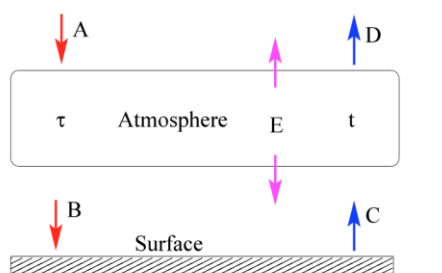
T_s : Surface temperature;
 T_e : Earth's temperature of emission;
 σ : Stefan-Boltzman constant;
 S : Solar constant; R : Earth's radius
 C : Effective heat capacity of Earth

$$CdT_s/dt = S/4 (1-\alpha) - \sigma T_e^4$$

$$\sigma T_e^4 = S/4 (1-\alpha)$$

- Donc tout d'abord, on regarde l'énergie reçue du Soleil qui est $\pi R^2 S$.
- ⇒ Donc S est la constante solaire, c'est l'énergie reçue sur une surface unitaire qui est perpendiculaire aux rayons du soleil.
- Il y a de l'énergie qui est réfléchié par l'albédo, par la réflectance de la Terre qui est $\pi R^2 S \alpha$.
- ⇒ α donc est un facteur de réflectance qui est nommé albédo planétaire de la Terre.
- Alors, tandis que sous la forme infrarouge la Terre émet de l'énergie sur l'ensemble de la surface du globe, donc $4 \pi R^2 \sigma T_e^4$.
- ⇒ Donc T_e est la température d'émission de la Terre.
- Ainsi, un équilibre est établi entre l'énergie reçue et l'énergie émise par la Terre.
- Alors, donc si on prend les paramètres habituels par exemple la constante du soleil estimée à 1370 W par mètre carré, l'albédo planétaire de la Terre est de 30 %.
- ⇒ A ce moment-là, on obtient une température d'émission, une température apparente de la Terre à -18°C.
- ⇒ Donc on voit clairement qu'avec cette température-là, la vie ne serait pas possible sur la Terre.
- Alors, on doit maintenant introduire une couche de l'atmosphère. Donc cette couche de l'atmosphère est schématisée par le schéma en haut à gauche.

One-layer model

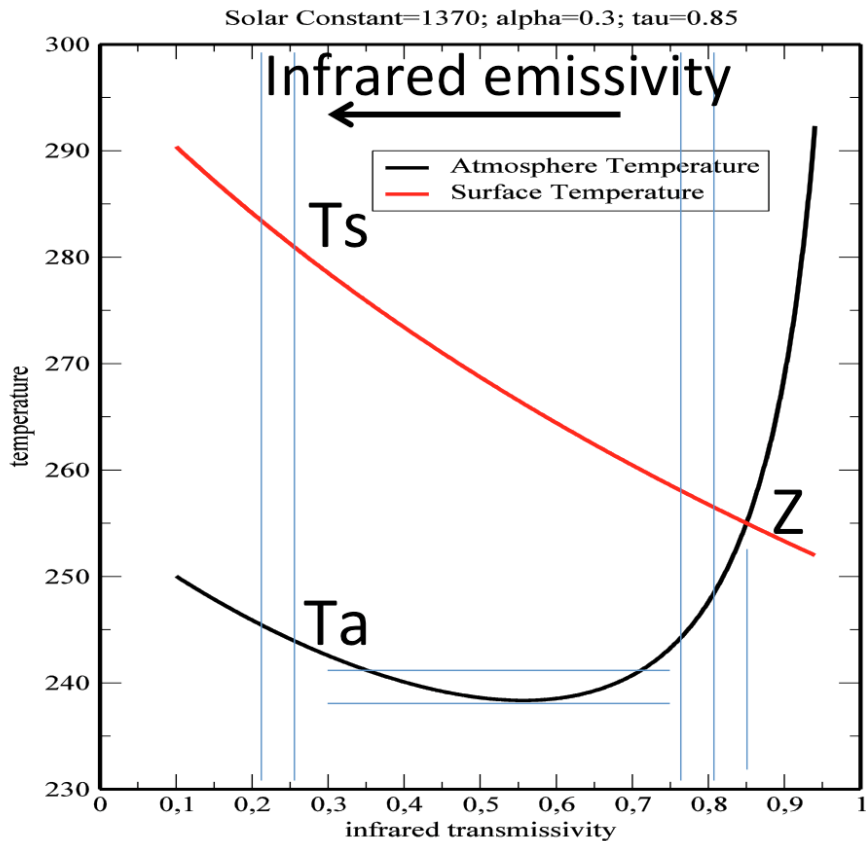


τ : Solar radiation transmissivity
 t : Infrared radiation transmissivity
 ϵ : Infrared emissivity ($\epsilon = 1 - t$)
 T_a : Temperature of atmosphere
 T_s : Temperature of surface
 α : Planetary albedo
 S : Solar constant
 σ : Stefan-Boltzman constant

$$\begin{aligned}
 A &= S/4 (1-\alpha) \\
 B &= A \tau \\
 C &= \sigma T_s^4 \\
 D &= C t \\
 E &= (1-t) \sigma T_a^4 \\
 \{ \blacksquare A &= D + E @ B = C - E \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma T_s^4 &= (A+B)/(1+t) \\
 &= S/4 (1-\alpha)(1+\tau)/(1+t) \\
 \sigma T_a^4 &= (A-D)/(1-t) \\
 &= (S/4 (1-\alpha) - t \sigma T_s^4)/(1-t)
 \end{aligned}$$

- On voit tout d'abord qu'il y a de l'énergie reçue du Soleil, donc je la note A , ensuite, cette énergie est transmise partiellement sur la surface de la Terre par un facteur τ , donc la quantité reçue par la surface B .
- Alors, j'ai dit tout à l'heure que la Terre émet de l'énergie, donc je l'ai notée C et puis rend partiellement cette énergie, donc la partie T qui est sortie, qui arrive à s'échapper de l'atmosphère.
- Et l'atmosphère elle-même émet de l'énergie, je l'ai nommée E en haut comme en bas.
- Alors donc ainsi on peut établir deux équations relativement simples, donc sur le sommet de l'atmosphère, ce serait $A = D + E$.
- ⇒ Donc l'énergie est équilibrée.
- La même chose donc, on fait une équation à la surface : $B = E + C$.
- ⇒ Donc l'énergie est aussi équilibrée à la surface.
- Ainsi, on peut obtenir la température de la surface, et la température de l'atmosphère. Donc ici je l'appelle T_s , la température de surface et T_a la température de l'atmosphère.
- Alors, à ce moment-là, on obtient une température du sol qui est de 282 K, donc qui est une dizaine de degrés (en Celsius).
- ⇒ Ça correspond à peu près à la température observée sur l'ensemble de la Terre, et ça, en fait, c'est la contribution de l'effet de serre.
- ⇒ Et c'est l'effet de serre donc qui a augmenté cette température-là.
- Donc on peut aller voir ce schéma-là qui trace donc deux températures.



- ⇒ Donc la courbe noire, c'est la température de l'atmosphère, la courbe rouge, c'est la température de surface.
- Donc on voit comment les deux températures varient en fonction de l'axe X qui est la transmissibilité infrarouge, c'est-à-dire l'opacité de l'atmosphère pour les rayonnements infrarouges.
- ⇒ Voilà donc il est intéressant de voir le point Z. Donc sur ce point-là, les deux courbes se croisent. En effet, c'est ce point-là qui a un effet de serre nul, donc il n'y a pas d'effet de serre à ce point-là.
- ⇒ C'est parce que la transmissibilité infrarouge est exactement la même que la transmissibilité solaire. Ainsi, il n'y a pas d'effet de serre.
- Alors maintenant, si on regarde la droite, à droite de ce point Z, on voit que la température de l'air, est bien supérieure à la température de surface.
- ⇒ Donc à ce point-là, c'est l'effet de parasol, donc c'est l'inverse de l'effet de serre.
- En effet, cet effet de parasol a probablement joué un rôle important sur la Terre aussi. On soupçonne qu'il y a 65 millions d'années, la disparition de l'espèce des dinosaures était liée probablement à un effet de parasol important de l'atmosphère.

Bon, ça ce n'est pas notre sujet. Donc on va regarder l'effet de serre.

➤ L'effet de serre, c'est à gauche de ce point Z. Donc, on voit à gauche de ce point Z, la température T_s : la température de surface est toujours supérieure à la température de l'air.

⇒ C'est bien donc la présence de cette couche de l'atmosphère, qui fabrique cet effet de serre.

Donc ça, c'est à peu près ma définition de l'effet de serre, donc qui est légèrement différente de la notion traditionnelle de l'effet de serre qui est basée sur une notion différentielle entre les propriétés radiatives sur le rayonnement solaire et sur le rayonnement infrarouge.

Donc c'est cette différence de propriété radiative qui fabrique l'effet de serre naturel de l'atmosphère, qui augmente la température de la surface vers un niveau bien raisonnable pour le développement de la vie.