

# Approche thermodynamique de l'effet de serre

par Guillaume Legros

Université Pierre et Marie Curie – Paris6  
Institut Jean le Rond d'Alembert (CNRS UMR 7190)  
email: guillaume.legros@upmc.fr  
tél: 01 30 85 48 84



	Introduction à l'effet de serre
<b>Introduction</b>	<b>Définition</b>
Bilan énergétique de la Terre	<u>Effet de serre</u> : phénomène de rétention thermique d'un local non-ventilé, dû à une transparence sélective des matériaux de l'enveloppe en fonction des diverses longueurs d'ondes du rayonnement
Forçage radiatif	
Perspectives	

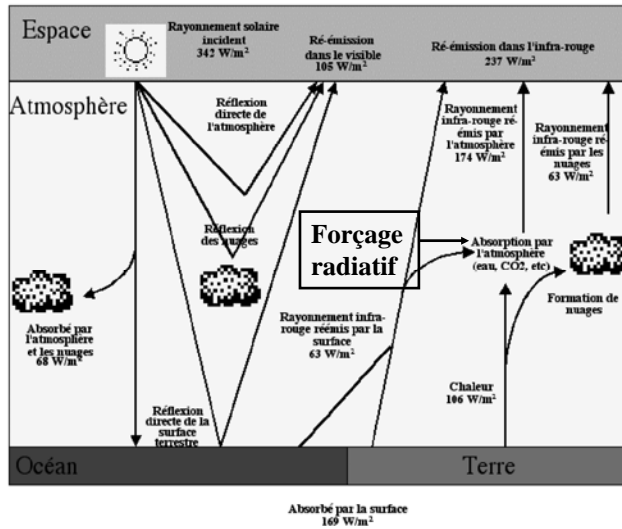
**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

Forçage radiatif

Perspectives

**Définition**



**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

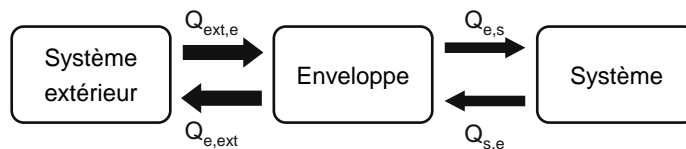
Forçage radiatif

Perspectives

**Influence de l'atmosphère**

Effet de serre: phénomène de rétention thermique d'un local non-ventilé, dû à une transparence sélective des matériaux de l'enveloppe en fonction des diverses longueurs d'ondes du rayonnement.

Modèle simple:



A l'équilibre système + enveloppe:  $Q_{ext,e} = Q_{e,ext}$

➡ Equilibre du système:  $Q_{s,e} = Q_{e,s}$

**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

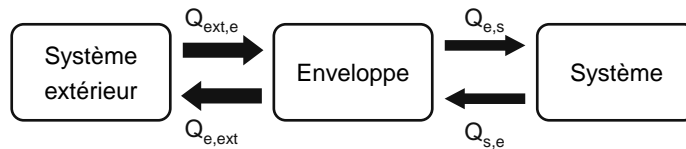
Forçage radiatif

Perspectives

**Influence de l'atmosphère**

Effet de serre: phénomène de rétention thermique d'un local non-ventilé, dû à une transparence sélective des matériaux de l'enveloppe en fonction des diverses longueurs d'ondes du rayonnement.

Modèle simple:



Avec ce modèle, le déplacement d'équilibre du système ne dépend que de l'irradiation solaire ( $Q_{ext,e}$ ).

**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

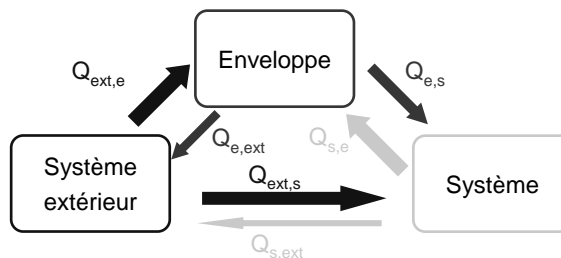
Forçage radiatif

Perspectives

**Influence de l'atmosphère**

Effet de serre: phénomène de rétention thermique d'un local non-ventilé, dû à une transparence sélective des matériaux de l'enveloppe en fonction des diverses longueurs d'ondes du rayonnement.

Modèle plus complexe:



A l'équilibre système + enveloppe:  $Q_{ext,e} + Q_{ext,s} = Q_{e,ext} + Q_{s,ext}$

~~■~~ ➔ Equilibre du système

**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

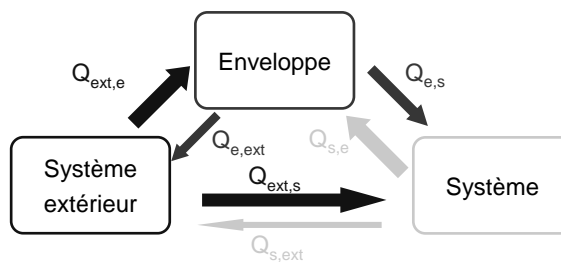
Forçage radiatif

Perspectives

**Influence de l'atmosphère**

Effet de serre: phénomène de rétention thermique d'un local non-ventilé, dû à une transparence sélective des matériaux de l'enveloppe en fonction des diverses longueurs d'ondes du rayonnement.

Modèle plus complexe:



Avec ce modèle, le déplacement d'équilibre du système ne dépend plus uniquement de l'irradiation solaire ( $Q_{ext,e} + Q_{ext,s}$ ).

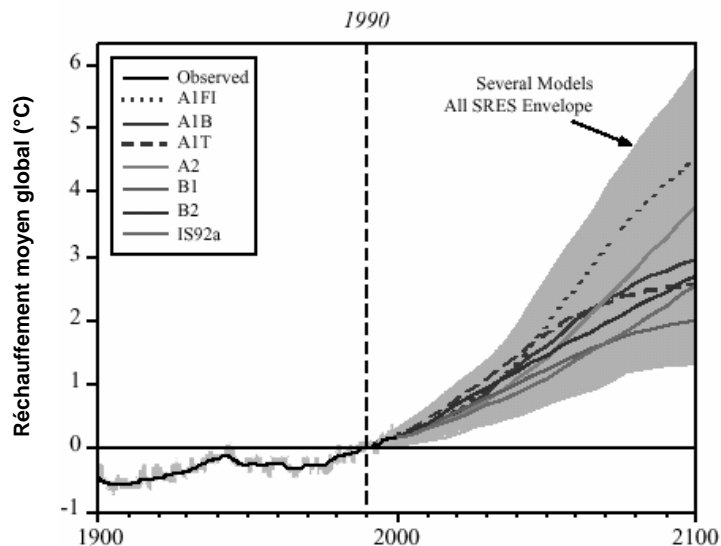
**Introduction**

Bilan énergétique de la Terre

Forçage radiatif

Perspectives

**Impact**



Introduction

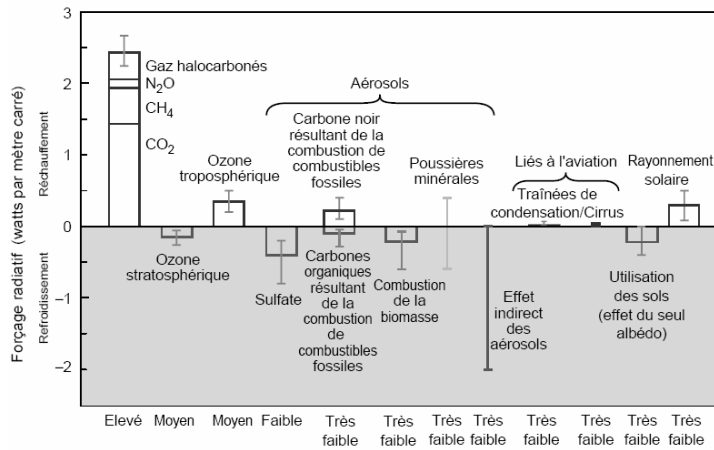
Bilan énergétique de la Terre

Forçage radiatif

Perspectives

**Situation actuelle**

**Forçage radiatif moyen global du système climatique en l'an 2000 par rapport à 1750**



Niveau des connaissances scientifiques

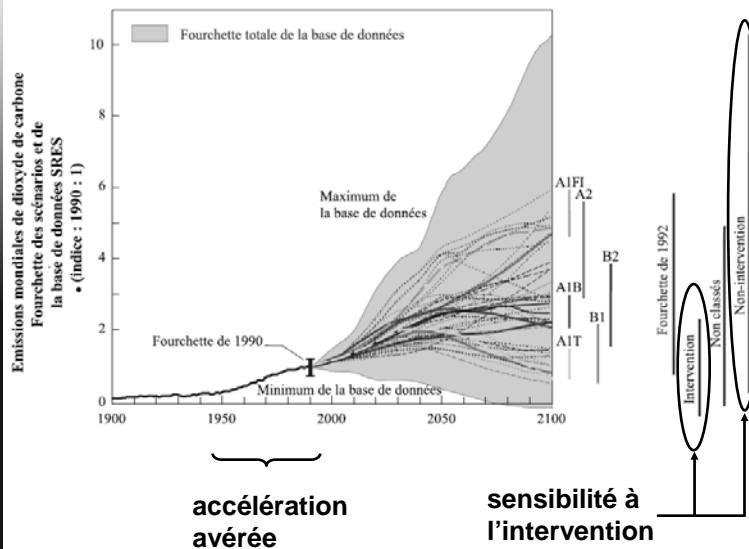
Introduction


Bilan énergétique de la Terre


Forçage radiatif

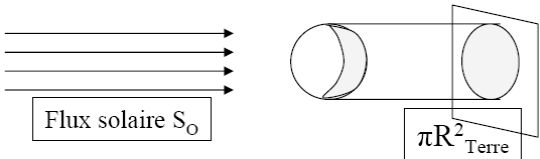
Perspectives

**Dynamique**





	Bilan énergétique
Introduction	<b>Définitions</b>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Système: Terre $\longrightarrow$ système fermé
Régime permanent Régime transitoire	<u>1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique pour un système fermé:</u>
Forçage radiatif	$\Delta E = \cancel{W} + Q$
Perspectives	<p>où <math>\Delta E</math> est la variation totale d'énergie du système  <math>W</math> l'énergie échangée sous forme de travail avec l'extérieur  <math>Q</math> l'énergie échangée sous forme de chaleur avec l'extérieur</p> <p><u>N.B.:</u> on compte ici positivement l'énergie reçue par la Terre et négativement l'énergie perdue.</p>

	Bilan énergétique
Introduction	<b>Définitions</b>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Système: Terre $\longrightarrow$ système fermé
Régime permanent Régime transitoire	<u>1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique pour un système fermé:</u>
Forçage radiatif	$\Delta E = \cancel{W} + Q$
Perspectives	<p>La variation <math>\Delta E</math> est le fait d'une énergie reçue <math>E_S</math> par la Terre et d'une énergie émise, en grande partie dans l'infrarouge, <math>E_{IR}</math>:</p> $\Delta E = E_S - E_{IR}$

UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÉS		Bilan énergétique
Introduction	<b>Bilan en régime permanent</b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent	$\longrightarrow E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où	$\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>Estimation de <math>E_S</math></u> : $E_S$ est l'énergie reçue par la Terre, principalement depuis le Soleil.	
Forçage radiatif		
Perspectives	D'où	$E_S = \pi R^2 (1 - \alpha) \Phi_S$
	avec $\alpha$ : albedo (i.e. réflectivité <u>totale</u> hémisphérique) $R$ : rayon moyen de la Terre $\Phi_S$ : flux surfacique solaire reçu par la Terre	

UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÉS		Bilan énergétique
Introduction	<b>Bilan en régime permanent</b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent	$\longrightarrow E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où	$\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>Estimation de <math>E_{IR}</math></u> : $E_{IR}$ est l'énergie émise par la Terre vers l'extérieur	
Forçage radiatif	D'où	
Perspectives	$E_{IR} = 4 \pi R^2 \Phi_{IR}$	
	avec $\alpha$ : albedo (i.e. réflectivité <u>totale</u> hémisphérique) $R$ : rayon moyen de la Terre $\Phi_{IR}$ : flux surfacique émis par la Terre	

	Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent $\longrightarrow E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où $\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>En régime permanent:</u>
Forçage radiatif	$4\pi R^2 \Phi_{IR} = \pi R^2 (1 - \alpha) \Phi_S$
Perspectives	soit $\Phi_{IR} = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S$


	Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent $\longrightarrow E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où $\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>En régime permanent:</u>
Forçage radiatif	$\Phi_{IR} = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S$
Perspectives	<p>Or le Terre peut être assimilée à un corps opaque:</p> $\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T^4$ <p>où <math>\varepsilon</math> est l'émissivité totale hémisphérique de la Terre  <math>\sigma</math> la constante de Planck</p>


UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÄT		Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent	→ $E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où	$\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>En régime permanent:</u>	
Forçage radiatif	$T_0 = \sqrt[4]{\frac{1-\alpha}{4} \frac{\Phi_S}{\varepsilon \sigma}}$	
Perspectives	où $T_0$ est la température d'équilibre de la Terre.	


UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÄT		Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Régime permanent	→ $E_S = E_{IR}$
Régime permanent	D'où	$\Delta E = 0$
Régime transitoire	<u>En régime permanent:</u>	
Forçage radiatif	$T_0 = \sqrt[4]{\frac{1-\alpha}{4} \frac{\Phi_S}{\varepsilon \sigma}}$	
Perspectives	<u>Ordres de grandeur:</u> pour $\varepsilon = 0$ (i.e. sans effet de serre) $\Phi_S \approx 1400 \text{ W.m}^{-2}$ $\alpha \approx 0,3$ $T_0 \approx 257 \text{ K} = -16 \text{ }^\circ\text{C}$	


UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÉS		Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Ordres de grandeur: pour $\varepsilon = 0$ (i.e. sans effet de serre)	
Régime permanent	$\Phi_s \approx 1400 \text{ W.m}^{-2}$	
Régime transitoire	$\alpha \approx 0,3$	
Forçage radiatif	$T_0 \approx 257 \text{ K} = -16 \text{ }^\circ\text{C}$	
Perspectives	à comparer à la température moyenne actuelle:	
	$T_0^{\text{réelle}} \approx +15 \text{ }^\circ\text{C}$	
	Cette différence s'explique en grande partie du fait de l'effet de serre, que rend l'atmosphère semi-transparente $\rightarrow \alpha_{\text{atm}} \neq 0$	
	D'où $\varepsilon^{\text{réelle}} < 1$	


UPMC UNIVERSITÉ PARIS-UNIVERSITÉS		Bilan énergétique
Introduction	<b><u>Bilan en régime permanent</u></b>	
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	Ordres de grandeur: pour $\Phi_s \approx 1400 \text{ W.m}^{-2}$	
Régime permanent	$\alpha \approx 0,3$	
Régime transitoire	$E_s = \pi R^2(1 - \alpha)\Phi_s \approx 86.10^6 \text{ Mtep/an}$	
Forçage radiatif	à comparer avec les 10 000 Mtep/an d'énergie consommée à l'échelle mondiale	
Perspectives	$E_{\text{consommée}} \approx \frac{E_s}{8600} \lll E_s$	


	<h2>Bilan énergétique</h2>
Introduction	<h3><u>Bilan en régime transitoire</u></h3>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	<u>Deux cas de figure possibles:</u>
Régime permanent	
Régime transitoire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si l'énergie solaire incidente est inférieure à l'énergie IR émise:           <math display="block">\Delta E &lt; 0</math> </li> </ul>
Forçage radiatif	
Perspectives	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si l'énergie solaire incidente est supérieure à l'énergie IR émise:           <math display="block">\Delta E &gt; 0</math> </li> </ul> <p>C'est apparemment le 2<sup>nd</sup> cas de figure que nous vivons actuellement: l'effet de serre tend à faire diminuer l'énergie émise dans l'IR.</p>


	<h2>Bilan énergétique</h2>
Introduction	<h3><u>Bilan en régime transitoire</u></h3>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	<u>Plus précisément:</u> $\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_c + \Delta U$
Régime permanent	
Régime transitoire	<p>Pour le système étudié, <math>\Delta E_p</math> n'est pas affectée a priori par la diminution des émissions IR de la Terre.</p>
Forçage radiatif	$\longrightarrow \Delta E \approx \Delta E_c + \Delta U$
Perspectives	<p>L'augmentation d'énergie totale du fait de la diminution de l'énergie émise peut donc s'accompagner:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• d'une augmentation de l'énergie cinétique (vents, etc.)</li> <li>• d'une augmentation de la chaleur sensible via l'augmentation de la température de la Terre ou de l'atmosphère</li> <li>• d'une augmentation de l'énergie interne stockée (biomasse, etc.)</li> <li>• d'une diminution de la masse de glace (fusion)</li> </ul>


	<h2>Bilan énergétique</h2>
Introduction	<h3><u>Conclusion</u></h3>
<b>Bilan énergétique de la Terre</b>	<p>L'effet de serre positif se traduit par une augmentation de l'énergie de notre planète.</p>
Régime permanent	
Régime transitoire	
Forçage radiatif	<p>A une époque où la consommation d'énergie cesse de croître, cette constatation est positive.</p>
Perspectives	<p>Pour autant, le défi à relever est que cette augmentation d'énergie ne se traduise pas par des effets néfastes à l'échelle planétaire (grandes catastrophes climatiques).</p> <p>L'enjeu consiste à présent en la maîtrise de l'effet de serre afin de convertir l'apport d'énergie en énergie utile, de façon directe (énergie solaire, énergie éolienne) ou par stockage (biomasse).</p>


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Définition:</u> le forçage radiatif <math>F</math> quantifie la diminution induite de l'énergie IR émise naturellement par la Terre.</p>
<b>Forçage radiatif positif</b>	$E_{IR} = 4 \pi R^2 (\Phi_{IR} - F)$
négatif	
Perspectives	<p><u>N.B.:</u> <math>F</math> est homogène à un flux surfacique</p> <p>Si on établit de nouveau le bilan énergétique de la Terre en régime permanent, on obtient:</p> $4 \pi R^2 (1 - \alpha) (\Phi_{IR} - F) = \pi R^2 (1 - \alpha) \Phi_S$ <p>soit encore <math display="block">\Phi_{IR} = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S + F</math></p>


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Définition:</u> le forçage radiatif <math>F</math> quantifie la diminution induite de l'énergie IR émise naturellement par la Terre.</p>
<b>Forçage radiatif positif</b> négatif	$E_{IR} = 4 \pi R^2 (\Phi_{IR} - F)$
Perspectives	<p><u>N.B.:</u> <math>F</math> est homogène à un flux surfacique</p> <p>Si on établit de nouveau le bilan énergétique de la Terre en régime permanent, on obtient:</p> $4 \pi R^2 (1 - \alpha) (\Phi_{IR} - F) = \pi R^2 (1 - \alpha) \Phi_S$ <p>soit encore <math>\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T_1^4 = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S + F</math></p> <p>où <math>T_1</math> est la nouvelle température d'équilibre de la Terre</p>


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>En présence de forçage radiatif:</u></p>
<b>Forçage radiatif positif</b> négatif	$\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T_1^4 = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S + F$
Perspectives	<p><u>En l'absence de forçage radiatif:</u></p> $\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T_0^4 = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S$ <p>Ainsi pour un forçage radiatif positif (<math>F &gt; 0</math>): <math>T_1 &gt; T_0</math></p>


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<p>En présence de forçage radiatif:</p>
<b>Forçage radiatif positif</b> négatif	$\Phi_{IR} = \varepsilon\sigma T_1^4 = \frac{1-\alpha}{4}\Phi_S + F$
Perspectives	<p>En l'absence de forçage radiatif:</p> $\Phi_{IR} = \varepsilon\sigma T_0^4 = \frac{1-\alpha}{4}\Phi_S$ <p>Si on différencie cette dernière expression:</p> $\frac{d\Phi_{IR}}{(1-\alpha)\Phi_S} = 4\frac{dT}{T} \xrightarrow{\text{1er ordre}} \frac{dF}{(1-\alpha)\Phi_S} = 4\frac{dT}{T_0}$ <p style="text-align: center; margin-left: 100px;"><math>\Delta\Phi_{IR} = 4F</math></p>


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<p>En présence de forçage radiatif:</p>
<b>Forçage radiatif positif</b> négatif	$\Phi_{IR} = \varepsilon\sigma T_1^4 = \frac{1-\alpha}{4}\Phi_S + F$
Perspectives	<p>En l'absence de forçage radiatif:</p> $\Phi_{IR} = \varepsilon\sigma T_0^4 = \frac{1-\alpha}{4}\Phi_S$ <p>On en déduit une approximation du réchauffement planétaire depuis le début de l'ère industrielle:</p> $\Delta T = \frac{F}{(1-\alpha)\Phi_S} T_0$


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<u>Application numérique:</u> approximation du réchauffement planétaire entre 1750 et 2000
Forçage radiatif positif négatif	$\Delta T = \frac{F}{(1 - \alpha)\Phi_s} T_0$
Perspectives	avec $F = 2,43 \text{ W/m}^2$ (source: GIEC)  $\Delta T \approx 0,7 \text{ K}$  ce qui l'ordre de grandeur des variations de températures moyennes estimées.


	<h2>Forçage radiatif positif</h2>
Introduction	<h3><u>Forçage lié à l'effet de serre cumulé</u></h3>
Bilan énergétique de la Terre	<u>Application numérique:</u> approximation de l'excès d'énergie accumulé entre 1750 et 2000
Forçage radiatif positif négatif	$\Delta E = 4\pi R^2 F$
Perspectives	avec $F = 2,43 \text{ W/m}^2$ (source: GIEC)  $\Delta E \approx 86.10^4 \text{ Mtep}$  soit 86 fois la consommation énergétique annuelle actuelle.  ➡ Le forçage radiatif constitue une mesure de l'excès d'énergie mobilisable grâce à l'effet de serre


	<h2 style="color: #ccc;">Forçage radiatif négatif</h2>
Introduction	<p><b><u>Forçage lié à l'utilisation des ENR</u></b></p>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Forçage négatif</u>: une solution est de faire diminuer <math>E_S</math></p>
Forçage radiatif positif	$\Delta E = E_S - E_{IR}$
Forçage radiatif négatif	<p><u>Faisabilité</u>:</p>
Perspectives	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. L'énergie solaire reçue à la surface de la Terre dépend de <math>\alpha</math> <math>\rightarrow</math> une augmentation de la concentration en poussières et aérosols peut entraîner un refroidissement planétaire;</li> <li>2. La capture de l'énergie solaire pour les besoins humains est autant d'énergie qui ne chauffe par la Terre.</li> </ol> <p>En 1<sup>ère</sup> approximation, on va supposer que toutes les ENR prélèvent à la source l'énergie solaire incidente, afin de quantifier le forçage négatif dû à l'utilisation des ENR.</p>


	<h2 style="color: #ccc;">Forçage radiatif négatif</h2>
Introduction	<p><b><u>Forçage lié à l'utilisation des ENR</u></b></p>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Forçage négatif</u>: on note <math>F_{ENR}</math> le forçage négatif associé aux ENR (rapporté à la surface totale de la Terre)</p>
Forçage radiatif positif	$E_S = \pi R^2 [(1 - \alpha) \Phi_S - 4F_{ENR}]$
Forçage radiatif négatif	
Perspectives	<p>Ainsi, en présence des forçages négatif et positif, le nouveau bilan s'écrit:</p> $\Phi_{IR} = \epsilon \sigma T_2^4 = \frac{1 - \alpha}{4} \Phi_S + (F - F_{ENR})$ <p>De même, la variation de température de la Terre donne:</p> $\Delta T = \frac{(F - F_{ENR})}{(1 - \alpha) \Phi_S} T_0$

	Forçage radiatif négatif
Introduction	<b><u>Forçage lié à l'utilisation des ENR</u></b>
Bilan énergétique de la Terre	<u>Forçage négatif</u> : on note $F_{ENR}$ le forçage négatif associé aux ENR (rapporté à la surface totale de la Terre)
Forçage radiatif positif	$\Delta T = \frac{(F - F_{ENR})}{(1 - \alpha)} T_0$
négatif	
Perspectives	<p>On en déduit qu'un forçage radiatif négatif peut annuler le réchauffement planétaire:</p> $F = F_{ENR}$ <p>Avec <math>F \approx F_{ENR} \approx 2,43 \text{ W / m}^2</math> et <math>R=6\ 000 \text{ km}</math>, le forçage radiatif négatif correspond à une énergie:</p> $4\pi R^2 F_{ENR} \times 365 \times 24 \approx 96.10^{11} \text{ MWh / an} = 82.10^4 \text{ Mtep}$

	Forçage radiatif négatif
Introduction	<b><u>Forçage lié à l'utilisation des ENR</u></b>
Bilan énergétique de la Terre	<u>Forçage négatif</u> : Avec $F \approx F_{ENR} \approx 2,43 \text{ W / m}^2$ et $R=6\ 000 \text{ km}$ , le forçage radiatif négatif correspond à une énergie:
Forçage radiatif positif	$4\pi R^2 F_{ENR} \times 365 \times 24 \approx 82.10^4 \text{ Mtep}$
négatif	
Perspectives	<p>à comparer avec la consommation annuelle d'énergie primaire de <math>10^4 \text{ Mtep}</math>, ce qui correspond à <math>1/75^e</math> du forçage radiatif négatif nécessaire pour compenser annuellement l'effet de serre cumulé.</p> <p>➡ Envisager l'utilisation des ENR pour compenser l'effet cumulé de l'effet de serre semble illusoire.</p> <p>➡ Envisager l'utilisation des ENR pour compenser l'effet de serre additionnel associé aux émissions annuelles actuelles apparaît réaliste.</p>

	<h2>Perspectives</h2>
Introduction	<p><b><u>Conditions pour la maîtrise de l'effet de serre</u></b></p>
Bilan énergétique de la Terre	<p>Si on considère en conséquence la variation annuelle de température <math>\delta T</math> due au forçage total <math>F = \delta F - F_{ENR}</math>:</p>
Forçage radiatif	$\delta T = \frac{\delta F - F_{ENR}}{(1 - \alpha)\Phi_s} T_0$
Perspectives	<p>La condition de maîtrise de l'effet de serre devient alors:</p>
	$\delta F \leq F_{ENR}$
	<p>cas où le forçage radiatif négatif lié à l'utilisation des ENR compense le forçage radiatif positif additionnel dû aux émissions de GES.</p>

	<h2>Perspectives</h2>
Introduction	<p><b><u>Conditions pour la maîtrise de l'effet de serre</u></b></p>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Condition de maîtrise de l'effet de serre additionnel:</u></p>
Forçage radiatif	$\delta F \leq F_{ENR}$
Perspectives	<p>Afin d'évaluer <math>\delta F</math>, on peut avoir recours à la formule recommandée par le GIEC:</p>
	$\delta F = 4,37 \frac{\ln \frac{C(t)}{C_0}}{\ln 2} \approx \frac{\delta C}{C_0} \times 6,3 \text{ W / m}^2$
	<p>où <math>C(t)</math> est la concentration en <math>\text{CO}_2</math> à l'instant <math>t</math> considéré et <math>C_0</math> la concentration pré-industrielle.</p>
	<p>Actuellement, on estime <math>\delta F = 2,8 \text{ ppm/an}</math>, soit:</p>
	$\delta F \approx 0,06 \text{ W / m}^2$

	<h2>Perspectives</h2>
Introduction	<p><b><u>Conditions pour la maîtrise de l'effet de serre</u></b></p>
Bilan énergétique de la Terre	<p><u>Condition de maîtrise de l'effet de serre additionnel:</u></p>
Forçage radiatif	$\delta F \approx 0,06 \text{ W / m}^2$
<b>Perspectives</b>	<p>On en déduit la consommation d'énergie annuelle <math>E_{ENR}</math> nécessaire pour contrebalancer le forçage radiatif positif:</p>
	$E_{ENR} \geq 4\pi R^2 \delta F \times 365 \times 24 \approx 2.10^4 \text{ Mtep}$
	<p>à comparer avec la consommation annuelle d'énergie primaire de <math>10^4</math> Mtep</p>
	<p>➔ l'utilisation extensive des ENR ne peut à elle seule contrebalancer les émissions de GES</p>
	<p>➔ l'utilisation extensive des ENR peut contribuer à contrebalancer de façon non-négligeable les émissions de GES</p>