

Pollution atmosphérique

Quelques éléments de transfert radiatif

Bruno Sportisse, sportiss@cerea.enpc.fr

CEREA, Joint Laboratory Ecole des Ponts/EDF R&D
INRIA/ENPC CLIME project

2007

Bilan d'énergie

Énergie solaire absorbée par le système Terre/atmosphère	235 W m^{-2}
Flux d'énergie interne (géothermie)	0.087 W m^{-2}
Production humaine d'énergie	
moyenne	0.025 W m^{-2}
milieu urbain	$\simeq 50 \text{ W m}^{-2}$
Forçage radiatif lié aux gaz à effet de serre depuis la période préindustrielle	$\simeq 2.5 \text{ W m}^{-2}$

TAB.: Flux d'énergie pour le système Terre/atmosphère. Source : [?].

Plan

Spectre de rayonnement

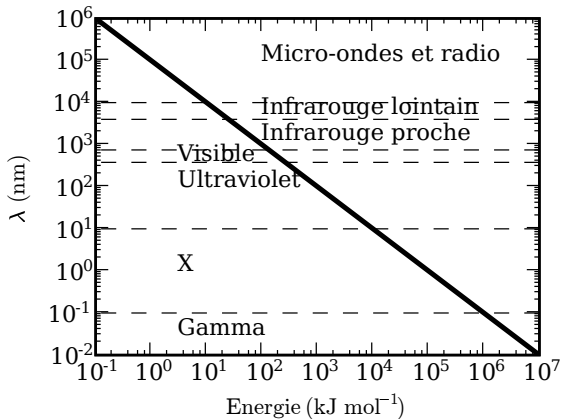


FIG.: Décomposition du spectre de rayonnement. En abscisse : l'énergie (en kJ mol^{-1}) ; en ordonnée : la longueur d'onde (en nm).

Angle solide

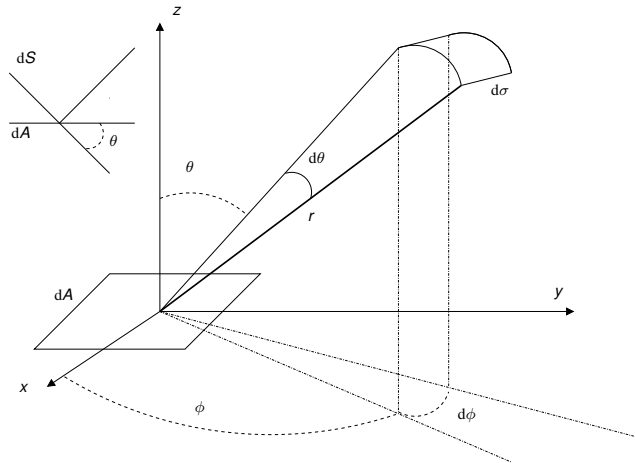


FIG.: Définition d'un angle solide. Dans la figure de gauche, les éléments de surface dA et dS sont représentés par leur coupe dans le plan vertical.

Émissivité infrarouge

Surface	ϵ_{IR}	Surface	ϵ_{IR}
Mer	0.95-1	Herbe	0.90-0.95
Neige fraîche	0.99	Désert	0.85-0.90
Neige « âgée »	0.80	Forêt	0.95
Nuages d'eau liquide	0.25-1	Béton	0.70-0.90
Cirrus	0.10-0.90	Ville	0.85

TAB.: Valeurs indicatives, en fonction de la surface du sol, de l'émissivité pour un rayonnement infrarouge. Source : [?].

Émissions Terre et Soleil

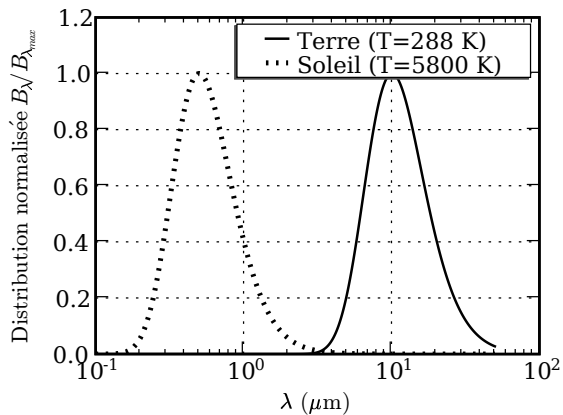


FIG.: Spectres d'émission normalisés de la Terre (corps noir à $T = 288$ K) et du Soleil (corps noir à $T = 5800$ K).

Profils de Lorentz et de Doppler

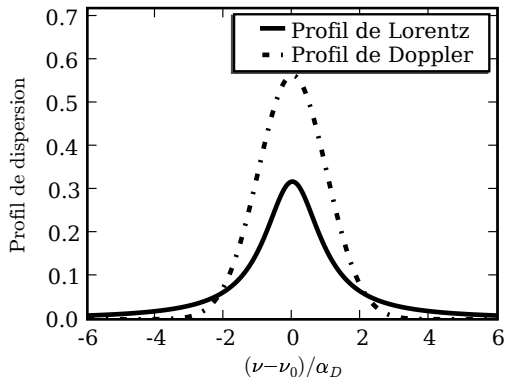


FIG.: Fonctions de distribution *normalisées* de Lorentz et de Doppler.

Diffusion par une particule

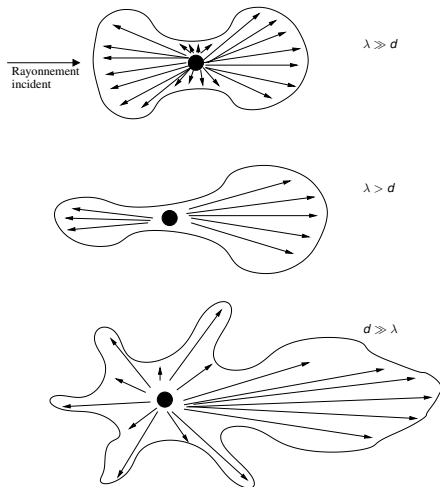


FIG.: Diffusion d'un rayonnement incident de longueur d'onde λ par une particule (sphère grisée) de diamètre d . La taille des vecteurs issus de la particule indique, par direction, l'intensité du rayonnement diffusé.

Diffusion par une particule

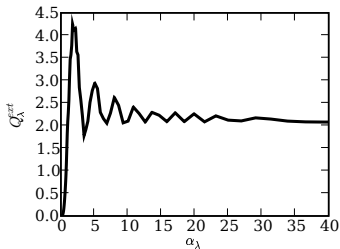


FIG.: Évolution de l'efficacité d'extinction en fonction du paramètre de taille. Crédit : Marilynne Tombette, CEREAA.

Type d'aérosol	n_λ	k_λ
Eau	1.34	0.
Ammonium	1.53	-5×10^{-3}
Sulfate	1.43	0.
Sel de mer	1.5	0.
Suie	1.75	-0.45
Aérosol minéral	1.53	-8.5×10^{-3}
Aérosol organique	1.53	-8.5×10^{-3}

TAB.: Valeurs indicatives d'indices de réfraction ($n_\lambda + jk_\lambda$), pour divers types d'aérosols. La longueur d'onde est $\lambda = 450$ nm, ce qui correspond à un rayonnement dans le visible.

Source : [?].

Albédo

Surface	Albédo (visible)	Surface	Albédo (visible)
Eau liquide	0.05-0.20	Herbe	0.15-0.25
Neige fraîche	0.75-0.95	Désert	0.20-0.40
Neige « âgée »	0.40-0.70	Forêt	0.10-0.25
Glace de mer	0.25-0.40	Bitume	0.05-0.20
Nuages	0.20-0.90	Ville	0.10-0.27

TAB.: Valeurs indicatives d'albédo en fonction de la surface du sol pour un rayonnement visible. Source : [?].

Plan

Quelques données

O ₂	H ₂ O	O ₃	H	O	CO ₂	N	N ₂	Ar
102.7	99	97	91.1	91	90	85	79.6	79

TAB.: Quelques potentiels d'ionisation (longueur d'onde en nm).

Espèce	centre de la bande (μm)	bande (μm)	
CO ₂	4.3	[4.1, 4.8]	
	10.6	[8, 12]	
	15	[12, 18]	
O ₃	9.6	[9, 10]	
	H ₂ O	6.2	[5.3, 6.9]
stratosphère		7.4	[6.9, 8]
		8.5	[8, 9]
H ₂ O	15	[12.5, 20]	
	troposphère	24	[20, 29]
		57	[29, 100]
CH ₄	7.6	[6, 10]	
N ₂ O	4.5	[4.4, 4.8]	
	7.9	[7.4, 8.4]	

TAB.: Quelques bandes importantes d'absorption en infrarouge. À mettre en regard de la figure 8. Source : [?].

Absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère

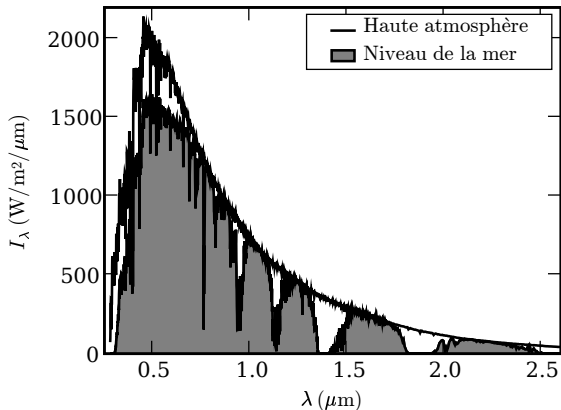


FIG.: Spectres de radiance en haut de l'atmosphère et à la surface de la mer. La différence entre les deux courbes correspond à l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère.

Absorption du rayonnement terrestre

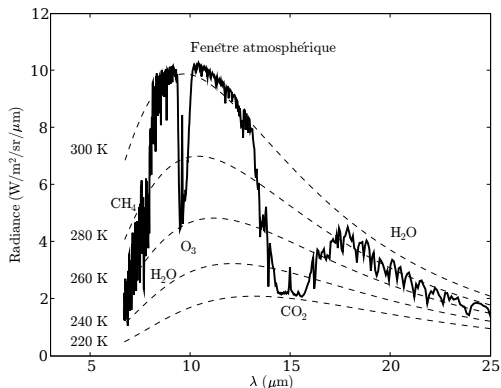


FIG.: Spectre de rayonnement infrarouge (terrestre) tel qu'il est vu par un satellite à 70 km d'altitude, au-dessus d'une zone de température 305 K. Le spectre est calculé par le modèle radiatif MODTRAN pour une atmosphère standard USA 1976 par ciel clair. Les distributions de rayonnement émis par un corps noir sont également données pour des températures de 220, 240, 260, 280 et 300 K. Les gaz absorbants sont indiqués à côté des pics d'absorption.

Constante solaire et température effective

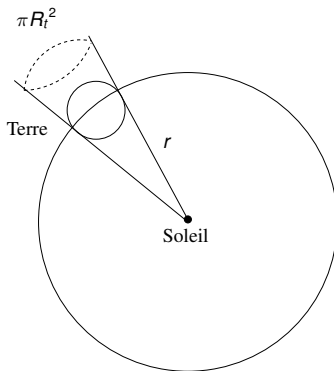


FIG.: Flux reçu par la Terre (de rayon R_t et à la distance r du Soleil). Le flux solaire par unité de surface (en W m^{-2}) reçu par la sphère de rayon r et de centre le Soleil est $S = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 / (4\pi r^2)$ avec R_s et T_s le rayon et la température du Soleil. La surface d'interception de la Terre est πR_t^2 , d'où un flux reçu $\pi R_t^2 \times S$ et un flux par unité de surface $\pi R_t^2 \times S / (4\pi R_t^2) = S/4$.

Budget énergétique global

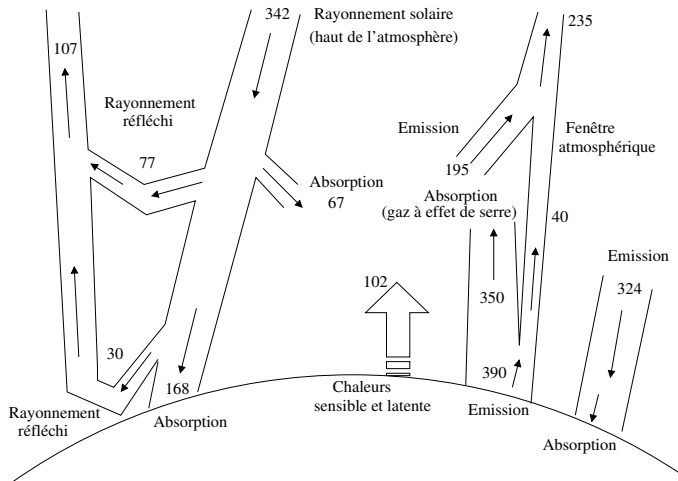


FIG.: Budget énergétique global pour le système Terre/atmosphère. Les flux sont exprimés en W m^{-2} et ont des valeurs indicatives. Source : [?].

Effet de serre

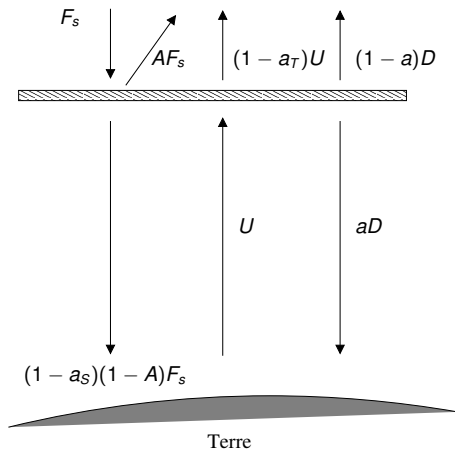


FIG.: Un modèle simplifié d'effet de serre.

Notion de forçage radiatif

Définition (IPCC 2001)

« The radiative forcing of the surface-troposphere system due to perturbation in or the introduction of an agent (say, a change in greenhouse gas concentrations) is the change in net (down minus up) irradiance (solar plus long-wave ; in W m^{-2}) at the tropopause AFTER allowing the stratospheric temperatures to readjust to radiative equilibrium, but with surface and tropospheric temperatures and state held fixed at the unperturbed values. »

Emballlement de l'effet de serre

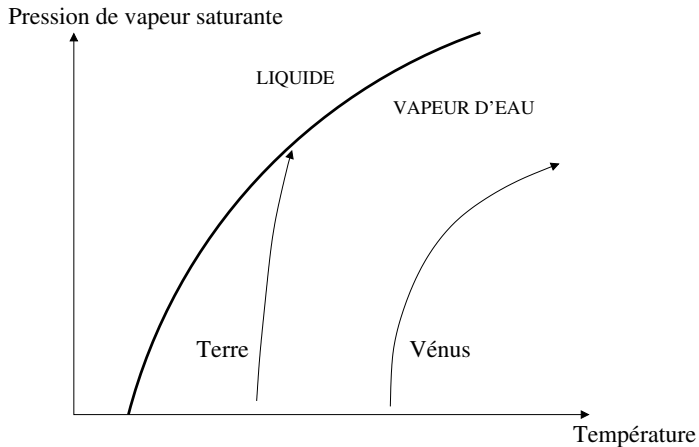


FIG.: Emballement de l'effet de serre (évolution « historique » des atmosphères de Vénus et de la Terre). Source : [?].

Forçage radiatif

Espèce X_i	ΔF_{X_i} (W m^{-2})	Incertitude	Niveau de confiance
Gaz à effet de serre	2.43	10 %	Fort
dont CO_2	1.46	-	-
dont CH_4	0.48	-	-
dont N_2O	0.14	-	-
dont halocarbonés	0.34	-	-
O_3 stratosphérique	-0.15	67 %	Moyen
O_3 troposphérique	0.35	43 %	Moyen
Aérosols sulfatés (direct)	-0.4	[-0.8, -0.2]	Faible
Aérosols feux de biomasse (direct)	-0.2	[-0.6, -0.07]	Très faible
Suie (carbone élémentaire, direct)	0.1	[0.03, 0.3]	Très faible
Aérosols organiques (direct)	-0.1	[-0.3, -0.03]	Très faible
Aérosols minéraux	[-0.6, 0.4]	-	Très faible
Effet indirect des aérosols	[-2, 0]	-	Très faible
Traînées de condensation (aviation)	0.02	350 %	Très faible
Formation de cirrus (aviation)	[0, 0.04]	-	Très faible
Albédo de surface (usage des sols)	-0.2	100 %	Très faible
Activité solaire	0.3	67 %	Très faible

TAB.: Forçage radiatif moyen annuel de 1750 à 2000 tel qu'estimé par les travaux de l'IPCC en 2001. Source : [?].

Potentiel de réchauffement global *direct*

Espèce	Temps de vie (an)	GWP	GWP	GWP
		à 20 ans	à 100 ans	à 500 ans
CO ₂	100	1	1	1
CH ₄	12	62	23	7
N ₂ O	114	275	296	156
CFC-11	45	6300	4600	1600
CFC-12	100	10200	10600	5200
CFC-13	640	10000	14000	16300

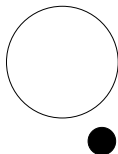
TAB.: Potentiel de réchauffement global *direct* rapporté à celui de CO₂ pour quelques espèces, à 20, 100 et 500 ans. Source : [?].

Forçage radiatif des aérosols

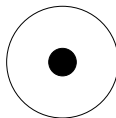
Type de mélange	[?]	[?]
mélange externe	0.27	0.31
cœur de carbone/mélange interne multiple	0.54	0.55
mélange interne	0.78	0.62

TAB.: Forçage radiatif (en W m^{-2}) imputable aux aérosols carbonés (suie) en fonction du mélange de l'aérosol. Sources : [? ?].

Mélange externe



Coeur en carbone



Mélange interne

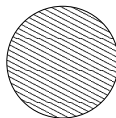


FIG.: Représentation du mélange des aérosols : mélange externe, cœur de carbone entouré d'un film et mélange interne. La couleur noire désigne la partie carbonée de l'aérosol (suie, carbone élémentaire ou *black carbon* selon la terminologie).

Rôle des propriétés hydrophiles de l'aérosol

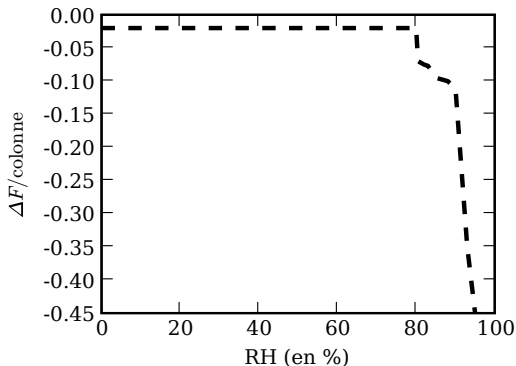


FIG.: Évolution indicative d'un forçage radiatif normalisé à la colonne d'aérosols, exprimé en $\text{W m}^{-2}/(\text{mg m}^{-2})$. La distribution en taille est centrée autour d'un rayon sec de $0.1 \mu\text{m}$; l'aérosol est composé de 90 % de sulfate et de 10 % de carbone suie (cœur). L'absorption de l'eau a lieu pour une humidité relative de 80 % (humidité relative de déliquescence du sulfate d'ammonium, tableau ??). Source : [?].

Microphysique et propriétés radiatives

Nuage	densité des aérosols ($d_p \geq 50$ nm)	densité des gouttes de nuage	rayon effectif (r_e)
nuage propre	$< 500 \text{ cm}^{-3}$	90 cm^{-3}	$r_e \geq 7.5 \text{ }\mu\text{m}$
nuage brun	$> 1500 \text{ cm}^{-3}$	315 cm^{-3}	$r_e \leq 6.5 \text{ }\mu\text{m}$

TAB.: Données microphysiques mesurées sur l'océan Indien : comparaison entre un nuage « propre » (*pristine*) et le « nuage brun » (exercice ??) pour un même contenu en eau liquide $L = 0.15 \text{ g m}^{-3}$. Source : [?].

Microphysique et propriétés radiatives

Effet	description	impact
Effet indirect des aérosols pour les nuages avec un contenu en eau liquide fixé (albédo des nuages, effet Twomey)	Plus de petites gouttes réfléchissent plus le rayonnement solaire.	$\Delta F_0 < 0$
Effet indirect des aérosols pour les nuages avec un contenu en eau liquide variable (effet de temps de vie)	Les petites gouttes diminuent les précipitations et augmentent le temps de vie des nuages.	$\Delta F_0 < 0, \rho_0 \downarrow$
Effet semi-direct	L'absorption du rayonnement solaire (suie) peut augmenter l'évaporation	$\Delta F_0 < 0 ? , \rho_0 \downarrow$

TAB.: Effets indirects des aérosols. ΔF_0 désigne le bilan radiatif au sol et ρ_0 l'intensité de pluie (par exemple en mm heure^{-1}). Source : [?].

Effet Twomey

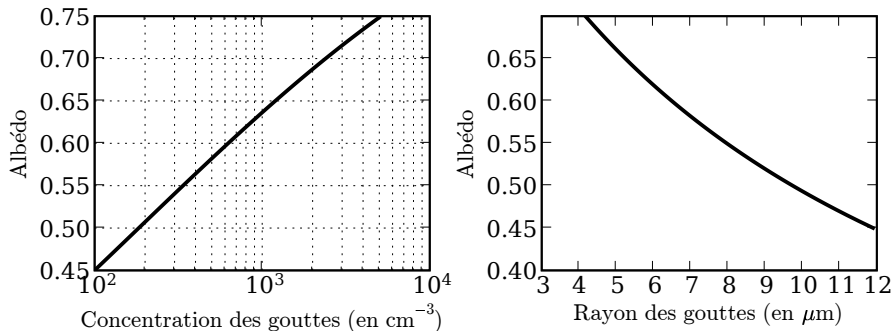


FIG.: Évolution de l'albédo d'un nuage en fonction de la densité en nombre ou du rayon effectif des gouttes (supposées suivre une distribution monodisperse).

Pollution particulaire et visibilité



FIG.: Diminution de la visibilité du fait de la pollution particulaire. À gauche : un ciel « de Rayleigh » (17 juin 2004, $PM_{10}=20 \mu\text{g m}^{-3}$). À droite : un épisode de pollution particulaire (9 juin 2004, $PM_{10}=80 \mu\text{g m}^{-3}$). PM_{10} désigne les particules dont le rayon est, en première approximation, inférieur ou égal à $10 \mu\text{m}$. Crédit : Airparif.

Pollution aux oxydes d'azote et visibilité



FIG.: Épisode de pollution au dioxyde d'azote sur Paris, le 1^{er} février 2006. Une concentration maximale de près de $350 \mu\text{g m}^{-3}$ a été mesurée ce jour-là. Crédit : Airparif ([?]).

Pollution et visibilité

Coefficient d'extinction (10^{-4} m^{-1})	Jour « propre » (7 avril 1983)	Jour pollué (25 août 1983)
Particulaire/diffusion	0.26	4.08
Gazeux/diffusion	0.11	0.11
NO ₂ /absorption	0.01	0.03
Suie/absorption	0.09	0.78
Total	0.47	5

TAB.: Évolution du coefficient d'extinction entre un jour « propre » et un jour pollué à Los Angeles. La longueur d'onde est dans le visible, $\lambda = 550 \text{ nm}$. La dégradation de la visibilité lors du jour pollué est directement imputable à la diffusion par les particules. Source : [?].