

Note technique sur le calcul du forçage radiatif et de la sensibilité climatique

IDELKADI, ABDERRAHMANE, *IPSL*, LE 27 JANVIER 2006

Dans cette note, on décrira brièvement les méthodes utilisées pour calculer le forçage radiatif et la sensibilité climatique. On présentera ensuite quelques résultats obtenus par le modèle de l'IPSL dans le cadre IPCC.

0.1 Forçage radiatif

0.1.1 Méthode de calcul

Le forçage radiatif est calculé en effectuant un ajustement radiatif dans la stratosphère et en utilisant l'hypothèse du FDH (Fixed Dynamical Heating). En pratique, ce calcul est effectué en mode offline en utilisant les champs climatiques mensuels stockés au cours d'une simulation de contrôle.

Pour se faire, on utilise un programme (*rforcing.F*) faisant appel à des routines du code physique du modèle atmosphérique de l'IPSL, notamment celles du calcul de transfert radiatif. Voici la liste de ces routines :

1. routine d'initialisation : *suph*, *newmicro*, *orbite*, *angle* et *ozonecm*
2. routines de transfert radiatif : *radlsw*, *sw*, *lw*, *swu*, *swls*, *sw2s*, *swclr*, *swr*, *swde*, *swtt*, *swtt1*, *lw*, *lwu*, *lwby*, *lwc*, *lwb*, *lwy*, *lwvb*, *lwvd*, *lwvn*, *lwtt* et *lwttm*

Dans un premier temps, on compile le code atmosphérique LMDZ de l'IPSL. La librairie physique (*libsxphylmd.a*) incluant les routines du code physique, ainsi compilées, sera utilisée par le programme "*rforcing.F*" pour le calcul du transfert radiatif.

Le programme "rforcing.F" a besoin en entrée :

- d'un fichier histmth.nc contenant les champs climatiques obtenus au cours de la simulation de contrôle :
 - tsol : température au sol.
 - paprs : pression aux inter-coches
 - pplay : pression au milieu de chaque couche
 - t : température
 - q : humidité spécifique
 - cldfra : fraction nuageuse
 - cldliq : fraction en eau liquide
- d'un fichier physique.def contenant les différentes constantes physiques de cette simulation, en particulier, les concentrations des gaz à effet de serre et la constante solaire.
- d'un fichier forcing.def contenant les nouvelles valeurs ("perturbées") des concentrations à effet de serre. Ces valeurs que l'on peut modifier concerne :
 1. la constante solaire
 2. la concentration de CO2
 3. la concentration de CH4
 4. la concentration de N2O
 5. la concentration de CFC11
 6. la concentration de CFC12

Le programme fonctionne ainsi comme suit :

- On lit les champs climatiques de la simulation de contrôle. On utilisera ici les fichiers contenant les moyennes saisonnières par période de 10 ans.
- Ces champs sont ensuite utilisés pour calculer les différents flux solaires nets "shortwave" et "long-wave" en faisant appel à la routine "radlsw.F". Dans ce calcul de "référence" on utilise les valeurs de référence des concentrations des gaz à effet de serre correspondant à la simulation de contrôle (physiq.def). Les flux solaires ainsi obtenus permettent de déduire les valeurs du forçage radiatif de référence à la surface et au sommet de l'atmosphère. Ce calcul est effectué dans les 2 cas du ciel clair et en présence des nuages.

- Par la suite, on calcule le forçage radiatif avec les nouvelles valeurs "perturbées" des concentrations des gaz (`forcing.def`) en appelant la routine "radlsw.F". On obtient ainsi le forçage radiatif initial "perturbé". On calcule également le forçage relatif à l'état de référence en soustrayant de la valeur de celui-ci, celle de référence.

Ensuite on appelle de façon itérative la routine de transfert radiatif pour calculer le forçage relatif à l'ajustement radiatif dans la stratosphère. On calcule également le forçage relatif à l'état de référence en soustrayant de la valeur obtenue celle de référence.

- Après chaque appel du calcul de transfert radiatif, on ajoute les tendances des rayonnement en utilisant l'hypothèse FHD (Fixed Dynamical Heating).

Les forçages calculés par ce code sont stockés sur des fichiers de "sortie" de format netcdf et ascii.

1. `tps_sw_ref.nc` (resp. `toa_sw_ref.nc`) contient les valeurs de référence du forçage radiatif shortwave à la tropopause (resp. à la stratosphère) sur tous les points de grille du modèle, compte tenu des nuages.

`tps_lw_ref.nc` (resp. `toa_lw_ref.nc`) contient les valeurs de référence du forçage radiatif longwave à la tropopause (resp. à la stratosphère) sur tous les points de grille du modèle, compte tenu des nuages.

`tps_sw_ref0.nc` (resp. `toa_sw_ref0.nc`) contient les valeurs de référence du forçage radiatif shortwave à la tropopause (resp. à la stratosphère) sur tous les points de grille du modèle, en ciel clair.

`tps_lw_ref0.nc` (resp. `toa_lw_ref0.nc`) contient les valeurs de référence du forçage radiatif longwave à la tropopause (resp. à la stratosphère) sur tous les points de grille du modèle, en ciel clair.

2. `d_toa_sw_adj.nc` (resp. `d_tps_sw_ref.nc`) contient la différences du forçage radiatif shortwave à la tropopause (resp. à la stratosphère), obtenu par l'ajustement de la stratosphère et celui de référence.

`d_toa_lw_adj.nc` (resp. `d_tps_lw_adj.nc`) contient la différence du forçage radiatif longwave à la tropopause (resp. à la stratosphère), obtenu par l'ajustement de la stratosphère et celui de référence.

3. `bilq_ref.nc` `bilq_ini.nc` `bilq_adj.nc` : contiennent les bilans radiatifs de référence, initial et relatif à l'ajustement de la stratosphère.

4. `ave_tps_ascii` et `ave_toa_ascii` `ave_toa_0_ascii` `ave_tps_0_ascii` contiennent les valeurs moyennes des forçages radiatifs à la tropopause et à la stratosphère en présence des nuages et en ciel clair.

5. `ave_prof_t.nc`, `ave_prof_h.nc` et `ave_prof_c.nc` contiennent les profils moyens de température de l'atmosphère, de chauffage solaire et de refroidissement infrarouge.

0.1.2 Résultats obtenus pour les scénarios IPCC

Pour illustrer la méthode de calcul décrite dans la section précédente, on montre ici des exemples dans le cadre des scénarios IPCC.

En pratique, les calculs sont effectués sur les machines de l'idris. Le modèle LMDZ est compilé sur la machine "rhodes"; ce qui permet de générer la librairie physique "libsxphylmd.a". Le code rforcing.F est ensuite compilé sur rhodes en faisant appel à cette librairie. Le code et le script de compilation utilisés sont disponibles sur "rhodes", dans le répertoire :

```
/home/rech/ces/rces855/RadForcing
```

Le code est exécuté sur uqbar. Un exemple de script utilisé est donné sur :

```
/u/rech/ces/rces855/RadForcing/SCRIPTS
```

On trouvera également dans ce répertoire le fichier "physiq.def" contenant les valeurs des constantes physiques de la simulation de contrôle.

Les fichiers "sortie" contenant les forçages radiatifs pour les différents scénarios sont stockés sur gaya dans le répertoire :

```
/cache1/rces855/RadForcing
```

Les figures 1 et 2 montrent les cartes du forçage radiatif avec l'ajustement de la stratosphère relativement au scénario de contrôle, obtenues pour les scénarios 1pc.to2x (pour la période 1860-1869) et SRESA2 (pour la période 2000-2009). Pour le scénario SRESA2, on montre l'exemple où l'on "perturbe" les valeurs des concentrations de tous les gaz à effet de serre.

Les tableaux ci-après montrent les valeurs des forçages radiatifs obtenus avec le modèle de l'IPSL comparativement avec le modèle BernCC dans le cadre des scénarios IPCC.

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
BernCC										
A2	1.49	1.76	2.13	2.50	2.93	3.37	3.82	4.29	4.80	5.34
A1B	1.49	1.78	2.18	2.54	2.96	3.37	3.78	4.12	4.45	4.74
B1	1.49	1.76	2.08	2.36	2.66	2.94	3.17	3.33	3.53	3.55
IPSL										
A2	1.40	1.69	2.04	2.40	2.81	3.23	3.67	4.14	4.65	5.19
A1B	1.40	1.73	2.08	2.43	2.83	3.22	3.59	3.91	4.22	4.48
B1	1.40	1.67	1.96	2.22	2.50	2.76	2.94	3.07	3.17	3.23

Table 1: Forçage radiatif relatif au gaz CO2 pour les scénarios SRESA2, SRESA1B et SRESB1 obtenues avec le code de l'IPSL et le code BernCC (Rapport IPCC, 2001).

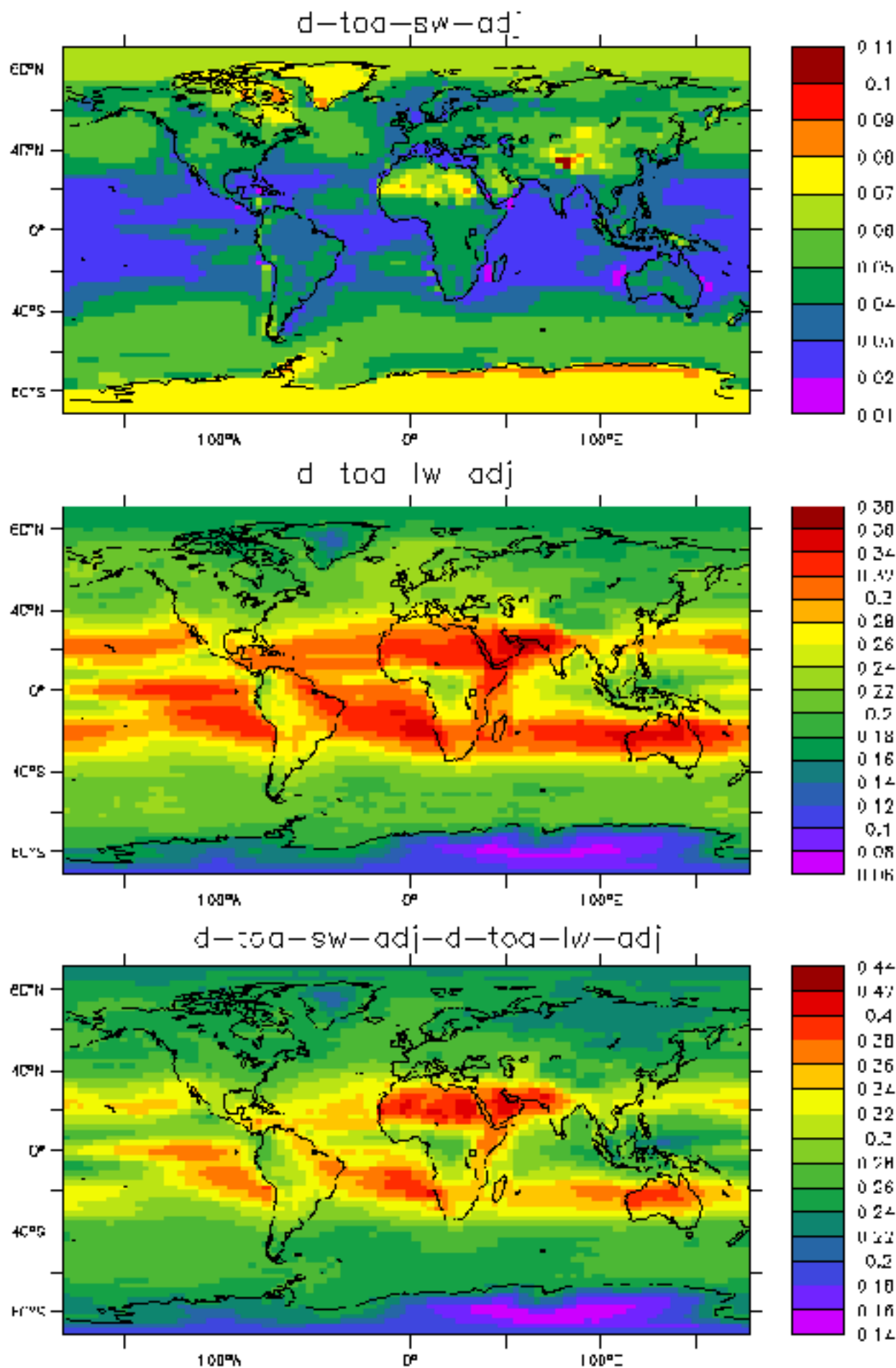


Figure 1: Cartes des forçages radiatifs shortwave et longwave et la somme des deux relativement à celui de référence, pour le scénario 1pc.to2x et pour la période 1860-1869

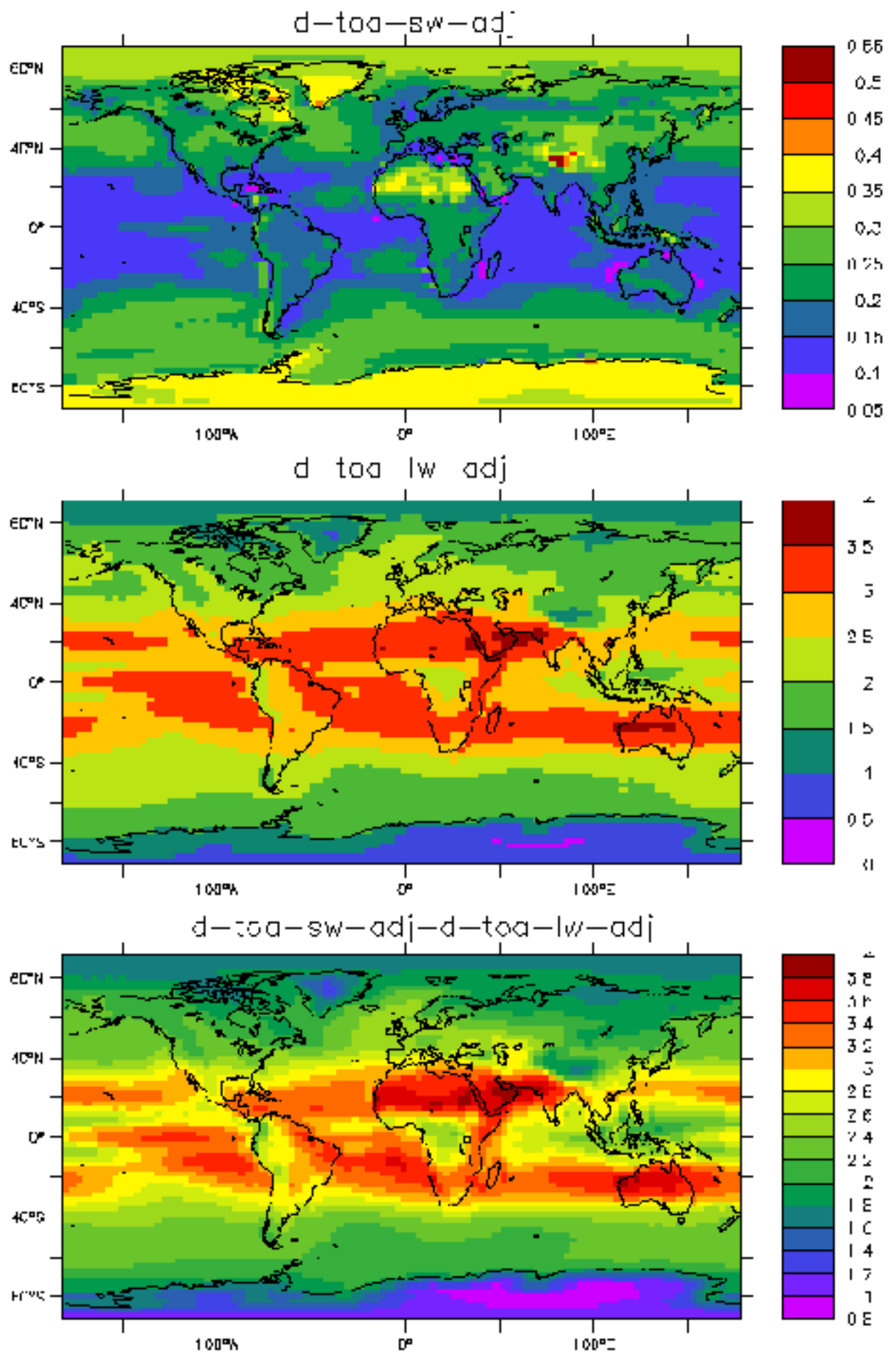


Figure 2: Cartes des forçages radiatifs shortwave et longwave et la somme des deux relativement à celui de référence, pour le scénario SRESA2 et pour la période 2000-2009.

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
BernCC										
A2	0.49	0.53	0.58	0.63	0.70	0.76	0.83	0.89	0.96	1.02
A1B	0.49	0.53	0.59	0.65	0.69	0.71	0.71	0.68	0.64	0.60
B1	0.49	0.51	0.54	0.55	0.55	0.53	0.52	0.50	0.48	0.45
IPSL										
A2	0.68	0.74	0.83	0.92	1.02	1.12	1.23	1.33	1.44	1.54
A1B	0.68	0.75	0.85	0.93	0.99	1.00	0.98	0.93	0.87	0.81
B1	0.67	0.71	0.74	0.75	0.74	0.71	0.69	0.67	0.63	0.58

Table 2: Forçage radiatif relatif au gaz CH4 pour les scénarios SRESA2, SRESA1B et SRESB1 obtenues avec le code de l'IPSL et le code BernCC (Rapport IPCC, 2001).

	2000	2010	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090
BernCC										
A2	0.15	0.18	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.41	0.45	0.49
A1B	0.15	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.29	0.30	0.31
B1	0.15	0.18	0.21	0.23	0.25	0.28	0.30	0.31	0.32	0.33
IPSL										
A2	0.20	0.24	0.28	0.33	0.38	0.42	0.47	0.53	0.58	0.63
A1B	0.20	0.23	0.26	0.28	0.31	0.33	0.35	0.36	0.38	0.39
B1	0.20	0.23	0.27	0.30	0.33	0.35	0.38	0.39	0.40	0.41

Table 3: Forçage radiatif relatif au gaz N2O pour les scénarios SRESA2, SRESA1B et SRESB1 obtenues avec le code de l'IPSL et le code BernCC (Rapport IPCC, 2001).

0.2 Sensibilité climatique

0.2.1 Méthode de calcul

On définit pour un scénario donné, la sensibilité climatique comme suite :

$$\lambda = \frac{(\delta\phi + \delta Q)}{\delta T_s} \quad (1)$$

où : ϕ désigne le flux net solaire au sommet de l'atmosphère, Q représente le forçage radiatif et T_s la température au sol. δ désigne la différence entre la valeur obtenue pour le scénario considéré et celle de référence (PIcntl).

$$Q = Q_{lw} + Q_{sw} \quad (2)$$

où : Q_{lw} (resp. Q_{sw}) désigne la différence du forçage radiatif longwave (resp. shortwave) obtenu pour le scénario considéré et celui de référence et calculé selon la méthode décrite précédemment.

$$\phi = (TOPL - TOPS) + (TOPSAD + TOPSAI) \quad (3)$$

TOPL et TOPS désignent les flux solaires nets longwave et shortwave au sommet de l'atmosphère.

TOPSAD et TOPSAI représentent les forçages radiatifs pour le rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère dus aux effets directe et indirecte des aérosol.

0.2.2 Résultats obtenus pour les scénarios IPCC

En pratique, le calcul de la sensibilité climatique s'effectue en deux étapes. Pour un scénario et pour une décennale considérés, on commence par regrouper les différents champs (Q_{lw} , Q_{sw} , TOPL, TOPS, TOPSAD, TOPSAI, T_s) dans un même fichier netcdf en utilisant les commandes "nc". Un exemple de script (lambda.1pc.to2x.job) est donné dans :

```
/home/rech/ces/rces855/RadForcing/SCRIPTS
```

Ces fichiers sont stockés sur "gaya" dans :

```
/cache1/rces855/PCMDLLAMBDA
```

Ensuite, on utilise le logiciel graphique "ferret" pour calculer chaque terme de l'équation 1 en moyennant sur tous les points de grille et sur tous les pas de temps. On obtient ainsi la valeur de λ pour ce scénario et pour cette décennale. Un exemple de script (calcul.lambda.job) utilisé pour cela est donné dans :

```
/home.b/rech/ces/rces855/RESULTATS
```

La figure ci-après représente l'évolution de la sensibilité climatique en fonction du temps pour les différents scénarios.

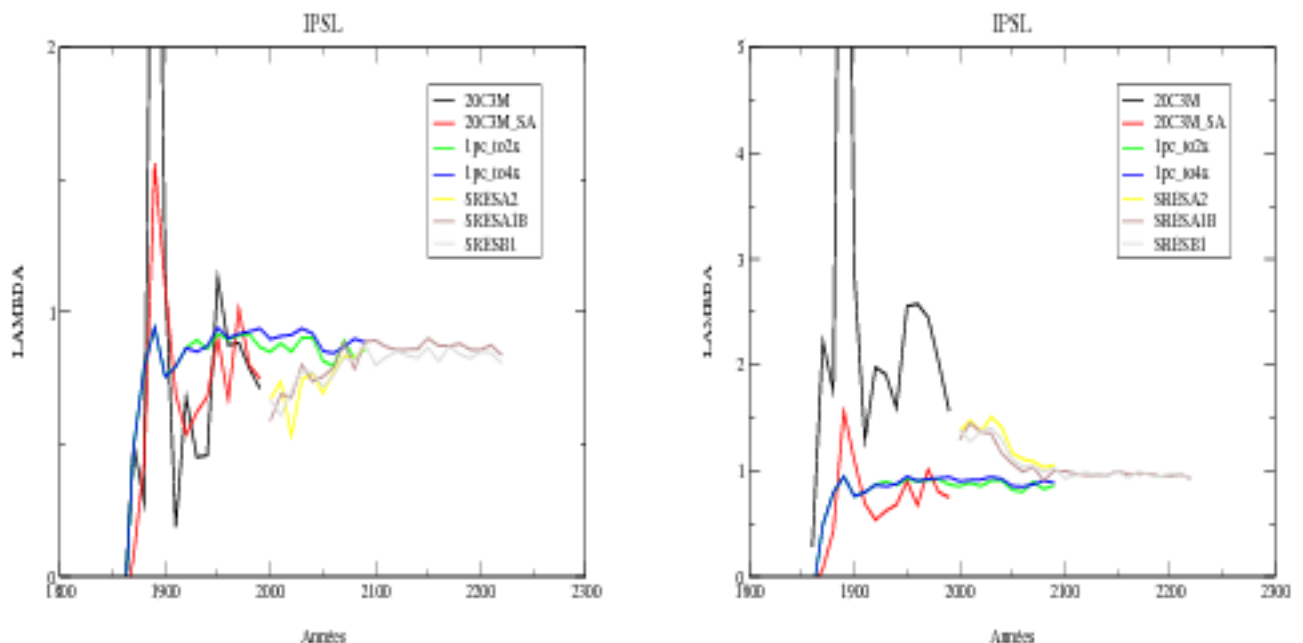


Figure 3: Sensibilité climatique en présence des nuage avec et sans prise en compte des effets directe et indirecte des aérosols

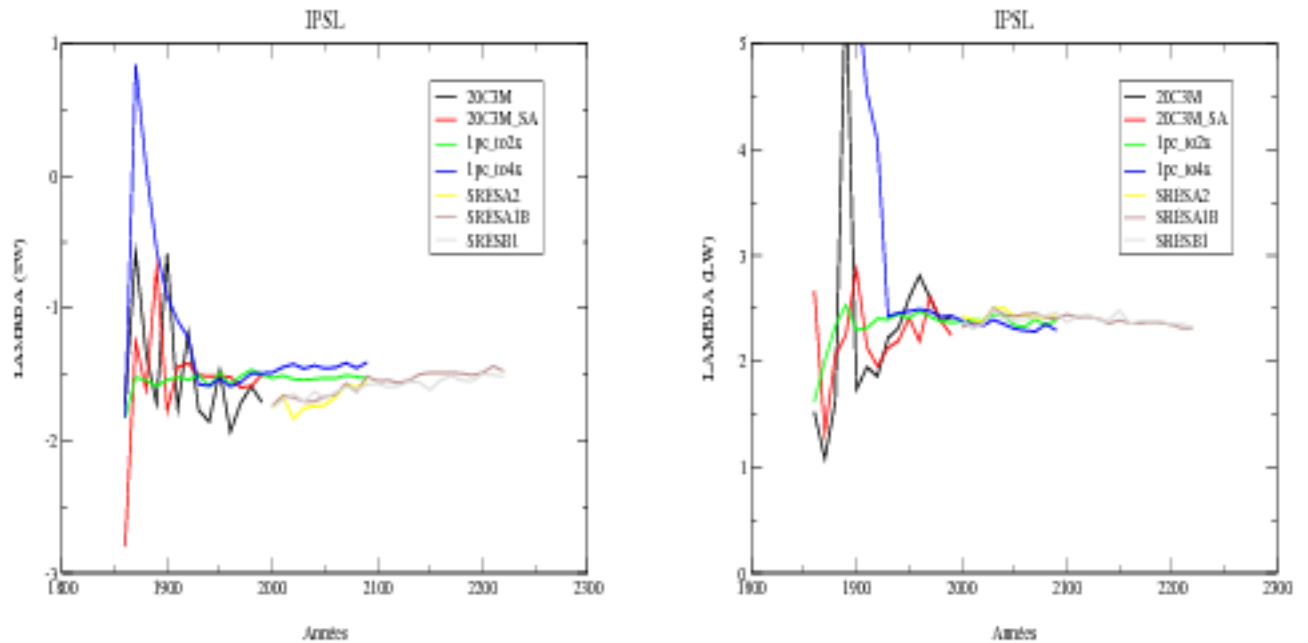


Figure 4: Sensibilité climatique (shortwave et longwave) en présence des nuage

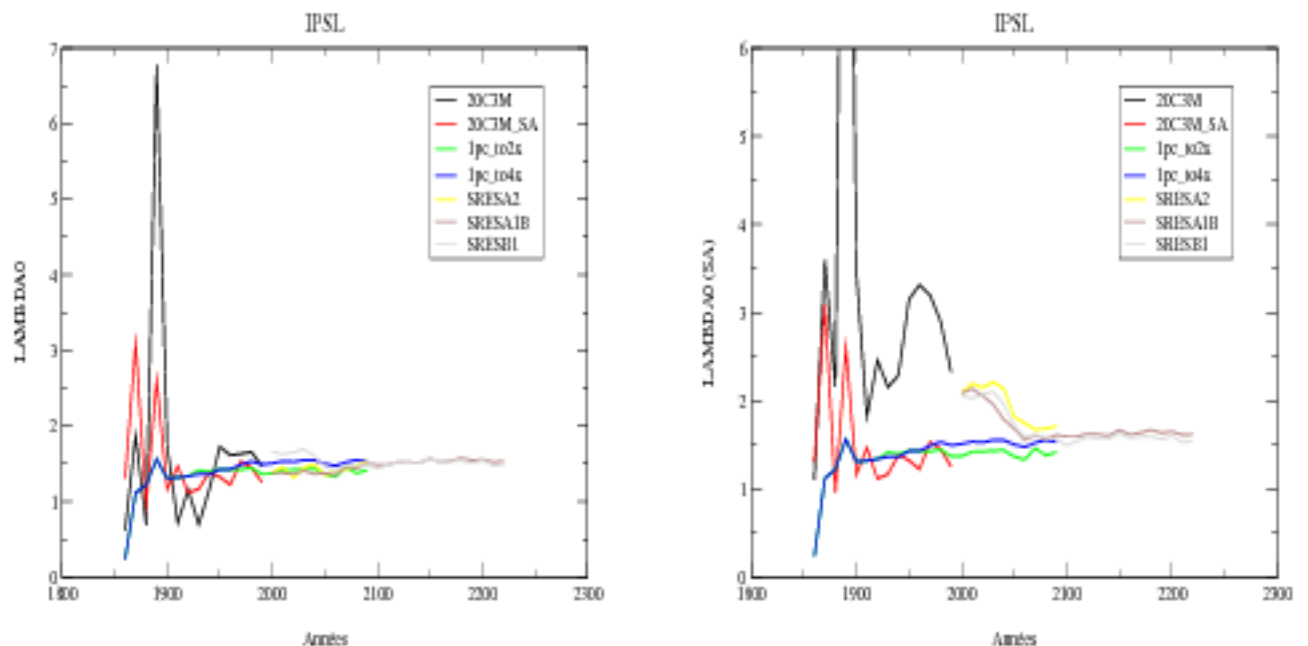


Figure 5: Sensibilité climatique en ciel claire avec et sans prise en compte des effets directe et indirecte des aérosols

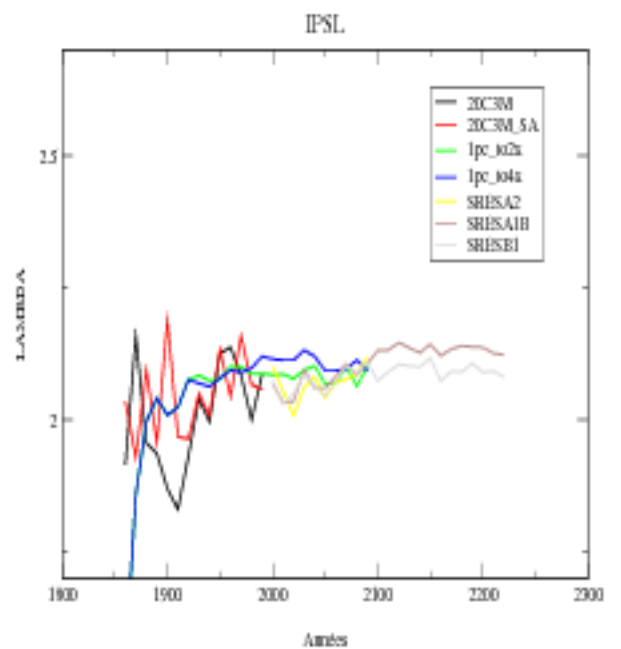
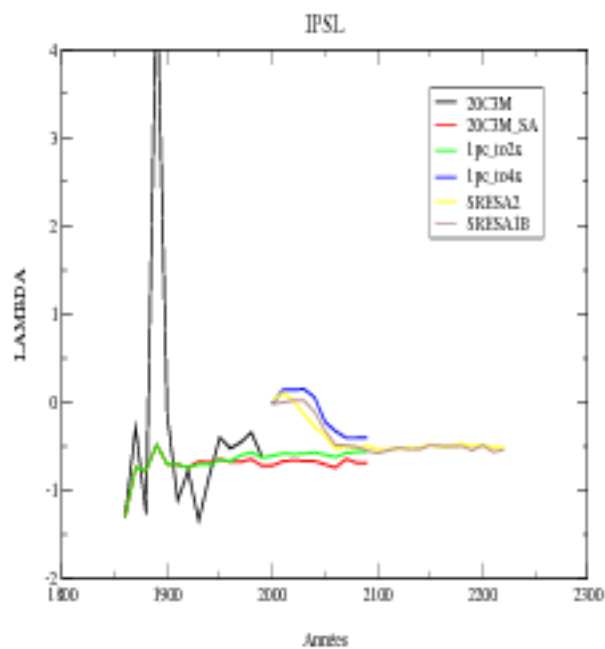


Figure 6: Sensibilité climatique shortwave et longwave en ciel clair