

# IMPACT DU DIOXYDE DE CARBONE DANS LE TRANSFERT RADIATIF

## III.1 LE DIOXYDE DE CARBONE - UN GAZ A EFFET DE SERRE

### III.1.1 Contribution du dioxyde de carbone

#### *1.1.1.1 Précurseurs du dioxyde du carbone*

Le Sénégal ne dispose pas de réserves fossiles économiquement exploitables. Pour assurer ses approvisionnements en ressources énergétiques, il est obligé de recourir à des importations d'hydrocarbures et à une exploitation intensive de son couvert végétal, déjà très dégradé.

La consommation finale d'énergie du Sénégal par produits en 2000 est de 1690 tep répartie comme suit (9):

- 943,6 tep (soit 55,83%) en produits pétroliers raffinés,
- 662,8 tep (soit 39,21%) en biomasse et
- 83,7 tep (soit 4,95%) en électricité. (9)

**Tableau 8 : Production ou approvisionnement en tonnes (source : Système d'Information Energétique-2006)**

| PRODUITS         | Production | Importation | Exportation |
|------------------|------------|-------------|-------------|
| Pétrole brut     |            | 890 688     |             |
| Gaz naturel      | 628 620    |             |             |
| Essence          | 145 254    |             | 47 194      |
| Jet kérosène     | 65 525     | 142 806     | 2 055       |
| Pétrole lampant  | 21 366     |             | 2 772       |
| Gasoil/diesel    | 390 296    | 149 598     | 65 444      |
| Fuel             | 236 509    | 126 909     | 33 484      |
| Gaz butane       | 9 070      | 91 885      | 3 130       |
| Naphta           | 16 568     |             |             |
| Lubrifiant       |            | 13 332,9    |             |
| bois de feu      | 1 089 132  |             |             |
| Charbon de bois  | 329 062    |             |             |
| Bagasse          | 302 383    |             |             |
| Coque d'arachide | 50 494     |             |             |

#### *III.1.1.2 Méthodologie d'inventaire*

La méthodologie utilisée pour faire l'inventaire des quantités de CO<sub>2</sub> émises dans l'atmosphère est celle développée par le Groupe Intergouvernemental d'Expert sur l'évolution du Climat - GIEC - (version révisée 1996) dont le principe est le suivant :

- Une estimation de la consommation apparente de combustible, exprimée en unité d'origine ;
- Une conversion en une unité énergétique commune ;
- Une multiplication par les facteurs d'émission pour calculer la teneur en carbone ;
- Un calcul du carbone stocké ;
- Une correction pour tenir compte de la combustion incomplète ;
- Une conversion du carbone oxydé en émission de CO<sub>2</sub>.
- les émissions dues aux produits pétroliers finis non importés sont comptabilisées au niveau des émissions dues au pétrole brut, compte tenu de la méthode d'estimation utilisée pour éviter une comptabilisation double.
- Les émissions dues aux produits pétroliers raffinés importés sont comptabilisées.

### **III.1.2 les émissions de dioxyde de carbone au Sénégal**

#### ***III.1.2.1 les origines de l'émission de CO<sub>2</sub>***

Les activités humaines engendrent des émissions de dioxyde de carbone, substance gazeuse à longue durée de vie dans l'atmosphère. La concentration atmosphérique mondiale de dioxyde de carbone est passée de 280 ppm environ à l'époque préindustrielle à 379 ppm en 2005. Le rythme d'accroissement annuel de la concentration de CO<sub>2</sub> a été plus rapide au cours des dernières années (1.9 ppm par an en moyenne entre 1995 et 2005). Le dioxyde de carbone provient essentiellement des produits pétroliers et de la biomasse. En 2000, ces secteurs ont comptabilisé une émission globale estimée à 7435 Gigagrammes (Gg) avec une légère différence au niveau des émissions pris individuellement (3876 Gg pour le secteur des produits pétroliers et 3559 Gg pour celui de la biomasse),

Pour le secteur des hydrocarbures, les émissions les plus importantes sont notées au niveau du pétrole brut importé (avec 2 630 Gg), suivi des produits raffinés importés que sont :

- le fuel oil résiduel (avec 649 Gg) ;
- le Jet Kérosène (avec 406 Gg) ; et,
- le gaz butane (avec 263 Gg).
- Par contre, au niveau de la biomasse (Gr. 8), les émissions en CO<sub>2</sub> s'élèvent à 3559 Gg en 2000 avec :
- le bois de chauffe qui émet le plus (avec 1989 Gg) de CO<sub>2</sub> suivi
- du charbon de bois (avec 1025 Gg) ; et,
- la bagasse (avec 544 Gg) utilisée dans les chaudières de la CSS (9)

Dans ce secteur, le bois de chauffe et le charbon de bois sont les principales sources d'émissions.

Nous présentons dans le tableau suivant les quantités de CO<sub>2</sub> émises au Sénégal en 2000.

**Tableau 9: émissions de CO<sub>2</sub> par secteur**

| <b>PRODUITS</b>     | <b>EMISSIONS DE CO<sub>2</sub> EN 2000 (Gg)</b> |
|---------------------|---|
| Produits pétroliers | 3 876,40  |
| Biomasse            | 3 558,66  |
| Emission totale     | 7435.06   |

Considérant que les émissions de CO<sub>2</sub> restent confinées entre la surface de la Terre et la tropopause dont la masse totale de gaz est approximativement de  $4,12 \cdot 10^{18}$  kg, on peut déterminer la contribution du Sénégal dans la modification de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### ***III.1.2.2 Concentration en ppm de CO<sub>2</sub> dans la région de Dakar***

Rappelons que  $1\text{ppm} = 10^{-4} \% = 10^{-6}$ . Si l'on tient compte du taux d'accroissement annuel de 1.9 ppm (8) (soit un pourcentage de  $1,9 \cdot 10^{-4}$  ou  $1,6 \cdot 10^{-6}$ ), on peut déterminer les proportions de CO<sub>2</sub> émises au Sénégal en 2012 car les quantités de produits pétroliers traités dans le pays n'ont presque pas variées.

Les quantités approximatives de CO<sub>2</sub> émises en 2012 sont déterminées suivant une progression géométrique par la relation suivante :

Ou est la quantité de CO<sub>2</sub> émise en l'an n ;

est la quantité de CO<sub>2</sub> émise en l'an 0 considéré comme l'année 2000.

Considérant l'année 2012, l'entier n prend la valeur , ainsi la quantité de CO<sub>2</sub> émise en 2012 serait . Puisque 1, on peut en première approximation écrire ; poser ensuite

Il peut être établi que : kg.

Ce calcul montre que dans une période de douze ans la quantité de CO<sub>2</sub> émise au Sénégal est quasi invariable et égale à \_\_\_\_\_ kg. Ce résultat serait lié au fait que les quantités de produits pétroliers, les hydrocarbures et les autres sources de CO<sub>2</sub> seraient quasiment constantes.

Dans le cas de notre étude nous allons considérer une échelle aérologique dans la troposphère qui s'étend sur 50km de longueur, 50km de largeur et 17km de hauteur couvrant l'espace aérien de la région de Dakar.

Cet espace occupe un volume

Tenant compte du volume de la troposphère \_\_\_\_\_, on peut évaluer la masse totale de gaz \_\_\_\_\_ dans l'espace environnant la région de Dakar comme suit :

Où  $4,12 \cdot 10^{18}$  kg représentent la masse totale de gaz dans la troposphère

Soit \_\_\_\_\_

La masse de dioxyde de carbone émise en moyenne

Ainsi la concentration en ppm de CO<sub>2</sub> est : \_\_\_\_\_

soit \_\_\_\_\_ 173,47ppm.

## III.2 ETUDE DU TRANSFERT RADIATIF

### III.2.1 Caractéristiques de l'échantillonnage

Dans l'espace aérien qui s'étend sur une altitude de 17 km et couvrant la région de Dakar on peut valablement considérer que la contribution moyenne en dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> dans cet espace est de l'ordre de 173,47 ppm.

Dans la suite on se propose d'évaluer la contribution énergétique correspondant à ces émissions dans le transfert radiatif. Ces émissions ont lieu dans un espace caractérisé par un certain nombre de paramètres météorologiques qui varient d'une saison à l'autre.

Le Sénégal possède deux saisons climatiques dont les durées dépendent quelque peu des régions géographiques :

- la saison sèche : Elle se situe entre le mois de Novembre et le mois Juin

-La saison des pluies : Elle se situe entre le mois de Juin ou Juillet au mois d'Octobre.

Nous allons maintenant étudier le transfert radiatif sur trois jours de l'année appartenant aux deux saisons et un troisième dans la période de transition entre ces deux saisons.

La région de Dakar, qui concentre les deux tiers de la population du pays, a les coordonnées géographiques suivantes :

- Latitude : 14,73°
- Longitude : - 17,5.

### **III.2.2 Relevés de données météorologiques de l'échantillonnage :**

Dans cette étude, nous avons utilisé les radiosondages du site de l'Université de Wyoming (USA) pour avoir les données météorologiques de Dakar-Yoff à douze heures (12h00 TU) des trois jours ci-dessous de l'année 20112.

#### ***Le 28 Janvier 2012***

- Vitesse du vent : 5 ,14 m/s
- Direction du vent : 20 ° soit un vent du nord-ouest
- Température au sol : 19°C
- Humidité relative : 87 %.

#### ***Le 28 Mai 2012***

- Vitesse du vent : 4 ,63 m/s
- Direction du vent : 320 ° soit un vent du nord-est
- Température au sol : 23,8 °C
- Humidité relative : 89 %

#### ***Le 28 Aout 2012***

- Vitesse du vent : 3 ,60 m/s
- Direction du vent : 180 ° soit un vent du sud
- Température au sol : 24°C
- Humidité relative : 94 %

### **III.2.3 Modèle atmosphérique (MODTRAN)**

Le modèle MODTRAN (MODerate resolution TRANsmission) a été développé durant ces 30 dernières années par le Centre "US Air Force Phillips Laboratory". Il succède à la famille de codes intitulée "LOWTRAN".

Le MODTRAN calcule, pour tout point de l'atmosphère, la transmittance de tout trajet dans l'atmosphère, ainsi que les luminances dues à l'émission atmosphérique, en tenant compte des diffusions. Il calcule l'absorption moléculaire "continue", la diffusion moléculaire, l'absorption et la diffusion des aérosols, ainsi que l'absorption moléculaire à partir d'une décomposition (densité et largeur moyenne des raies) du spectre (0 à 50000 cm<sup>-1</sup>, soit des longueurs d'onde > 0.2 m), pour chaque gaz.

### III.2.3.1 Bilan radiatif dans les courtes longueurs d'onde

L'éclairement solaire moyen TOA (haut de l'atmosphère) est environ de  $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Ce flux radiatif est réparti en quatre parties :

- 4% sont absorbés par la stratosphère soit  $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Il s'agit surtout du rayonnement UV qui interagit avec l'oxygène pour former l'ozone.
- Environ 20% soit  $67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  est réfléchi vers l'espace par les nuages
- 6% soit  $21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  est réfléchi par l'atmosphère.
- 20% E soit  $70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont absorbés par la basse atmosphère constituée principalement de gaz, de poussières et de nuages.

L'atmosphère transmet environ de 53% du flux solaire soit  $181 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La transmittance atmosphérique est donc de l'ordre de 53%. En fait, elle varie beaucoup avec la longueur d'onde.

### III.2.3.2 Description du rayonnement

Le flux d'énergie total  $\Phi$  émis par une source de rayonnement ou reçu par un objet est homogène à une puissance (énergie divisée par temps) et s'exprime en watts. En divisant par la surface de la source, on obtient l'émittance (pour une source) ou l'éclairement (pour un récepteur), qui s'expriment en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . On rencontre aussi les termes d'irradiance ou de densité de flux, qui s'utilise plutôt pour le flux traversant une surface virtuelle. L'énergie transférée ou émise cette fois dans une direction spécifique, par unité de surface perpendiculaire à cette direction et par unité de temps, est appelée la luminance énergétique ou radiance (figure 2). Ses unités sont le  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}$ , où le stéradian sr est l'unité d'angle solide.

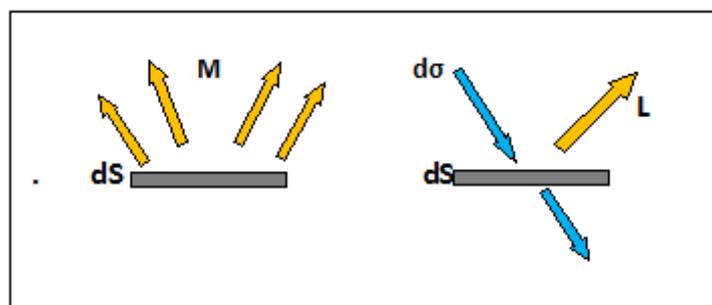


Figure 17 : Schéma des échanges énergétiques

Le schéma ci dessus montre l'émittance  $M$  et la luminance  $L$  d'un élément de surface d'une source.  $M$  est l'intégrale du flux dans toutes les directions  $M = \int \Phi / dS$ .  $L$  est le flux émis dans une certaine direction par unité de surface perpendiculaire  $L = \Phi / (dS \cdot \cos \theta)$ .

## III.3 ETUDE DE L'IMPACT du CO<sub>2</sub> SUR LE TRANSFERT RADIATIF

### III.3.1 Méthodologie d'étude

On étudie le flux solaire et la radiance ou diffusion énergétique dans la basse atmosphère de la région de Dakar suite à l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone due à l'utilisation des hydrocarbures.

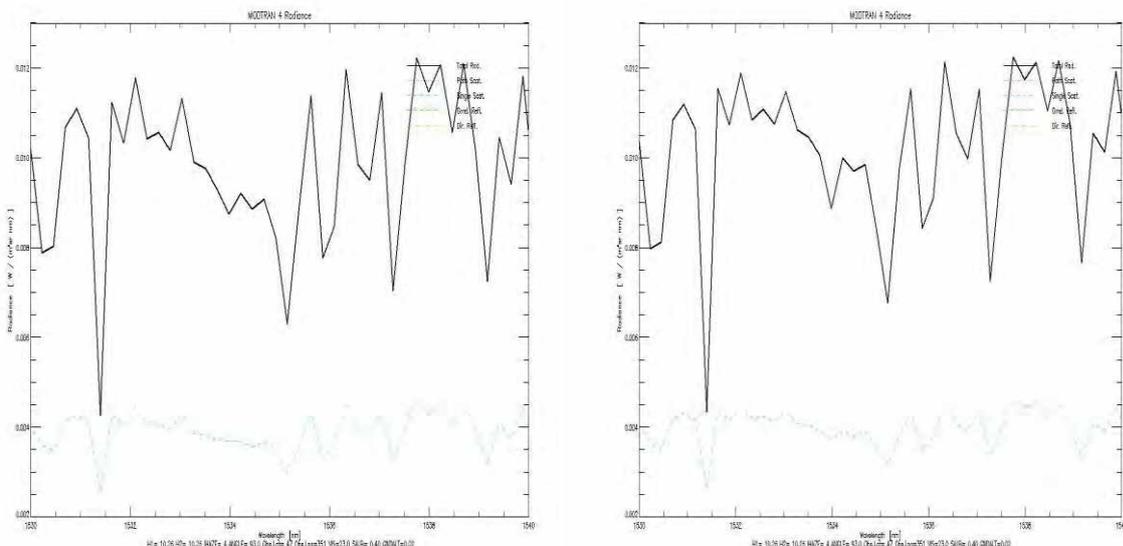
Nous partons des spectres du flux solaire et de la radiance pour une concentration en dioxyde de carbone standard de 365 ppm. Avec la concentration en CO<sub>2</sub> calculée à laquelle s'ajoute la valeur standard, on arrive à une concentration totale d'environ 538 ppm.

Le Modtran affichant la bande de longueur d'onde , nous avons choisi d'éclater cette bande en plusieurs intervalles pour mieux voir la contribution du dioxyde de carbone dans le transfert radiatif dans l'atmosphère.

### III.3.2 Résultats des observations

#### ❖ Analyse du 28 janvier 2012 à 12h

##### ➤ Etude de la radiance



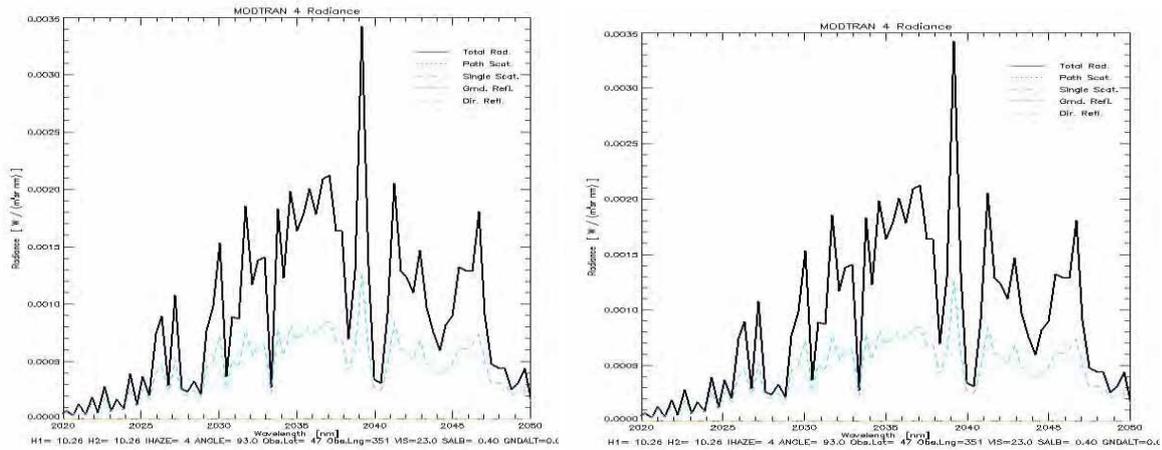
• Courbe standard

b) Courbe expérimentale

Figure 18 : Radiances du 28 janvier 2012 dans l'intervalle [1530 ; 1540nm]

**Observations :** On observe une modification entre 1530 nm et 1532 nm représentée par une diminution de la radiance, elle passe dans cet intervalle de longueurs d'onde de 0.008 à 0.0072 W/m<sup>3</sup>. Sr. nm. Dans l'ensemble des longueurs d'onde, les courbes standard et expérimentale gardent le même profil à l'exception de la partie située entre 1533,25nm et 1534nm. En outre entre deux 2 longueurs d'onde données, on constate que la variation de la radiance totale augmente de la courbe (a) à la courbe (b) car elle passe de 0,00625 W/ m<sup>3</sup>. Sr. nm pour le modèle standard à la valeur de

0,13 W/ m<sup>3</sup>. Sr. nm. Globalement, la courbe expérimentale semble atténuée avec une diminution de la valeur maximale par rapport à la courbe standard.



a) Courbe standard

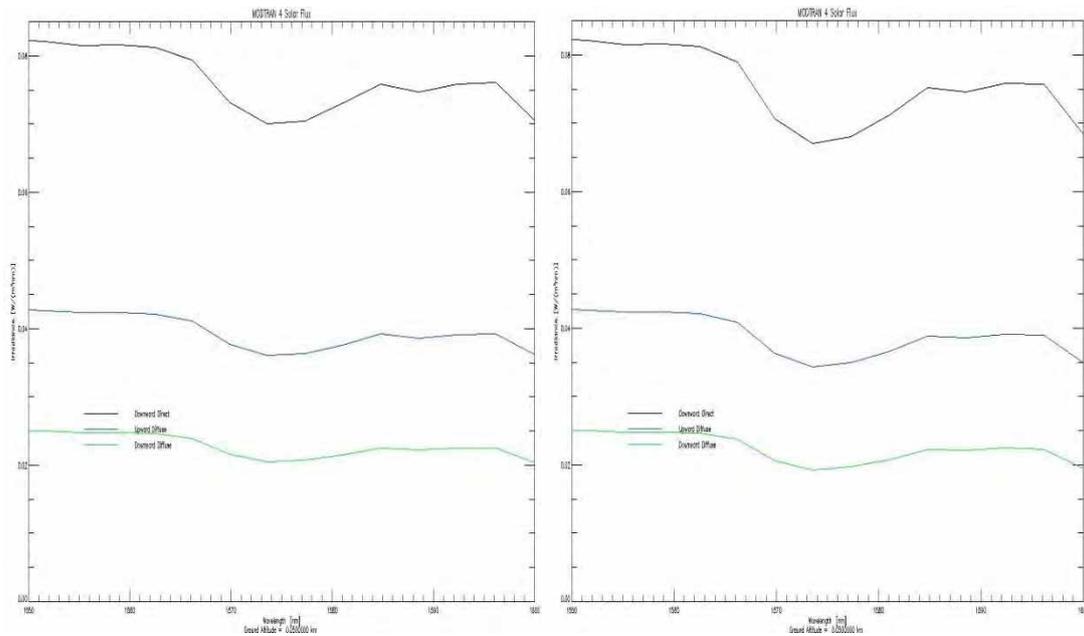
b) Courbe expérimentale

Figure 19 : Radiances du 28 janvier 2012 dans l'intervalle

**Observations :** Les deux courbes présentent le même profil. Aucune modification n'est observée sur le modèle expérimental ; la contribution en CO<sub>2</sub> ne modifie pas la radiance pour les longueurs d'onde de cet intervalle.

### ❖ Etude du flux solaire

Dans cette partie, l'étude portera sur l'irradiance pour les modèles standard et expérimental.

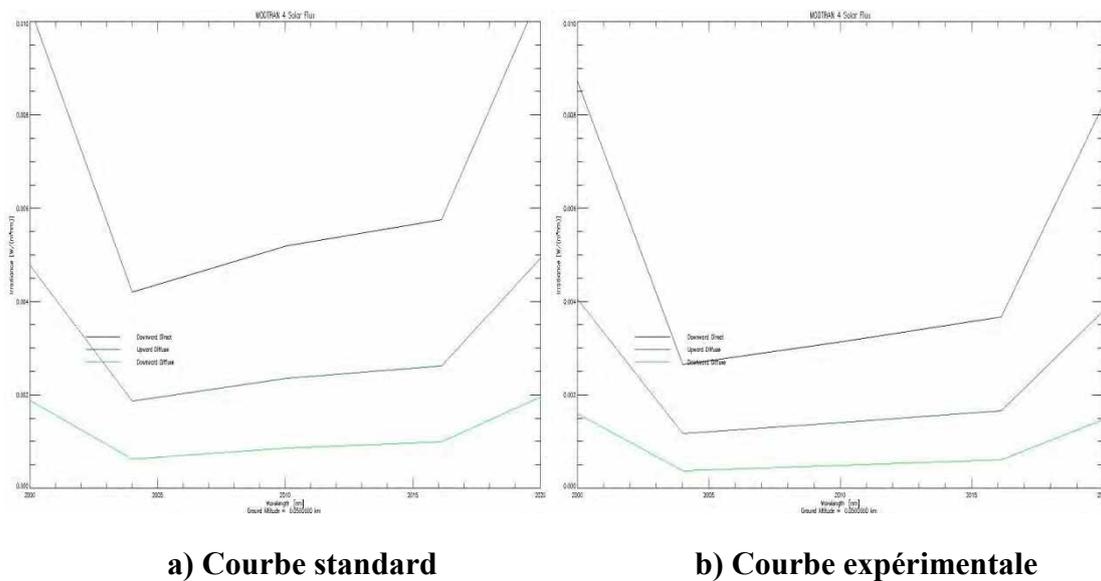


a) Courbe standard

b) courbe expérimentale

Figure 20: Irradiances du 28 Janvier 2012 dans l'intervalle

**Observations :** Entre 1550 et 1750nm les deux courbes ont les mêmes profils et les mêmes amplitudes ; il n'ya donc pas d'influence de l'augmentation du dioxyde de carbone dans cette gamme de longueur d'onde. Entre 1570 et 1580nm, la courbe expérimentale est plus creuse et correspond à une diminution de l'irradiance dont la valeur extrême passe environ de 0,069 à 0,063W/ m<sup>3</sup>.Sr. nm.

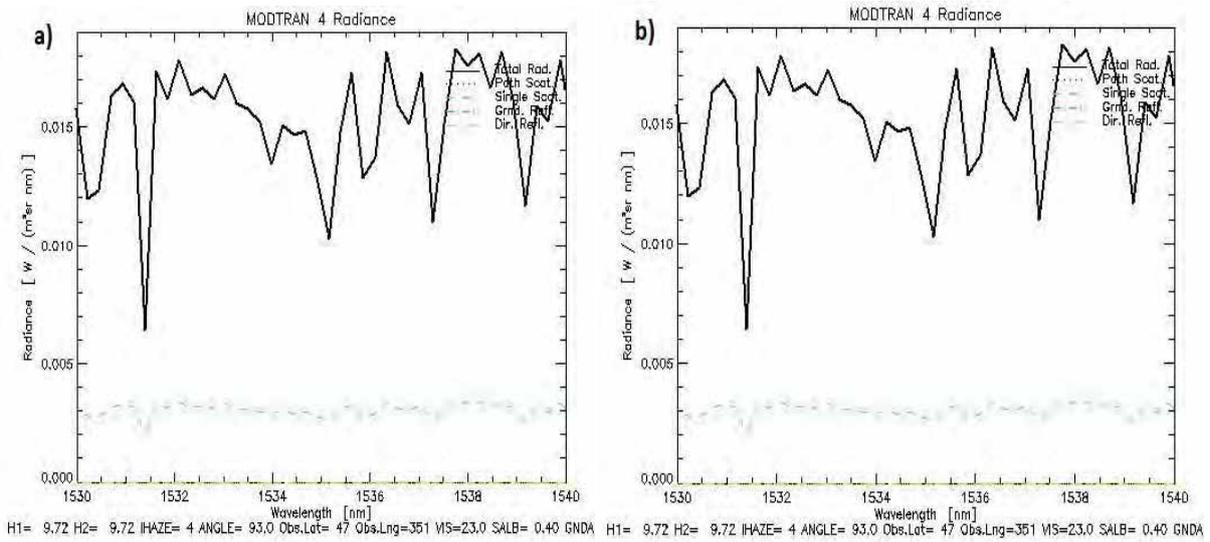


**Figure 21 : Irradiances du 28 Janvier 2012 dans l'intervalle**

**Observations :** Dans cet intervalle, les profils sont conservés pour toutes les longueurs d'onde à l'exception de la valeur de 2002nm où la petite excroissance sur la courbe standard disparaît lorsqu'on se réfère à la courbe expérimentale. On constate également que la courbe expérimentale est une sorte de glissement vers le bas de la courbe standard, représentant une diminution généralisée de l'irradiance pour toutes les longueurs d'onde de l'intervalle . En effet à 2000nm la valeur de l'irradiance passe, de la courbe (a) à la courbe (b), d'une valeur supérieure à 0,010W/ m<sup>3</sup>. Sr. nm à la valeur 0,004W/ m<sup>3</sup>. Sr. nm pour le flux direct.

❖ *Analyse du 28 Mai 2012 à 12 h*

➤ **Etude de la radiance**

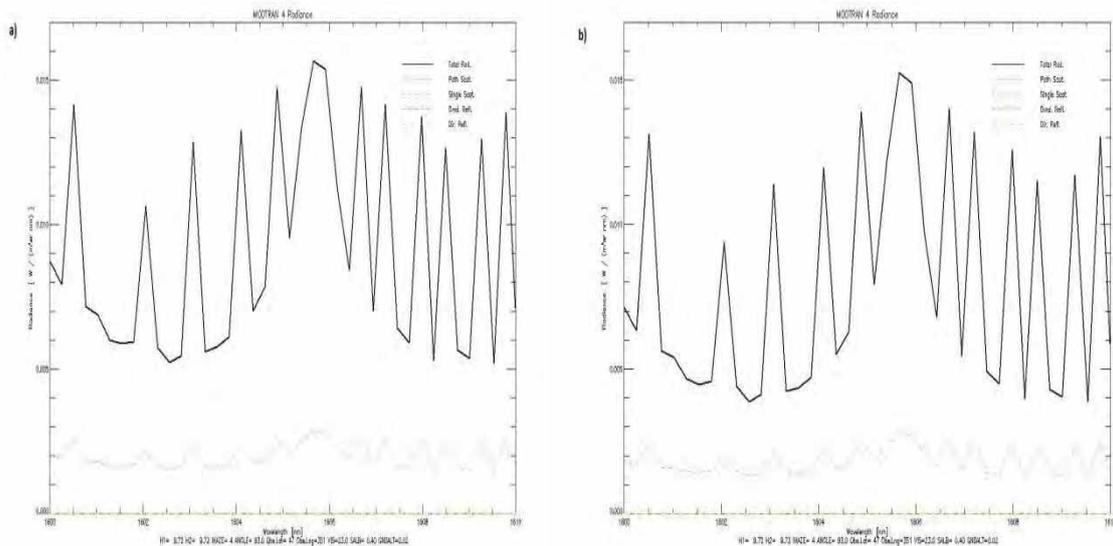


a) Courbe standard

b) Courbe expérimentale

Figure 22 : Radiances du 28 Mai 2012 dans l'intervalle [1530 ; 1540nm]

**Observations :** L'échelle considérée est de [1530 ; 1540] nm pour la longueur d'onde et de [0 ; 0,019]  $W / (m^3 \cdot Sr \cdot nm)$  pour la radiance. On observe une modification entre 1530 et 1532 nm représentée par une diminution de la radiance par exemple, elle passe de 0.008 à 0.0072  $m^3 \cdot Sr \cdot nm$ . Généralement, les courbes standard et expérimentale gardent le même profil. En outre entre deux 2 longueurs d'onde donnée, on constate que la variation de la radiance totale est plus grande sur la courbe expérimentale. Globalement, la courbe expérimentale est atténuée avec une diminution de la valeur maximale par rapport à la courbe standard.



a) Courbe standard

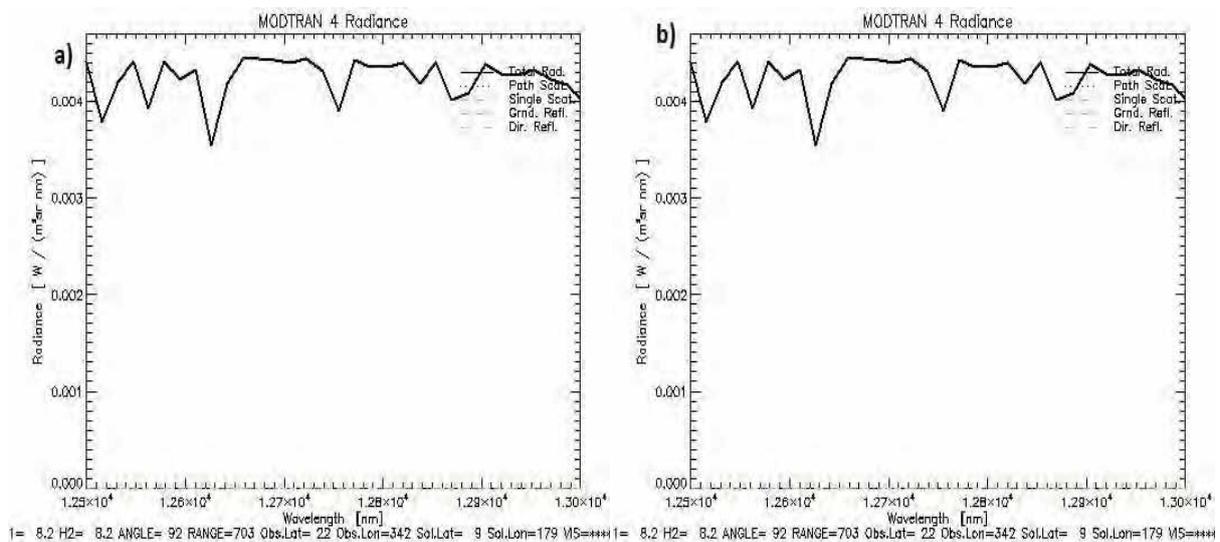
b) Courbe expérimentale

Figure 23 : Radiances du 28 Mai 2012, dans l'intervalle [1600 ; 1610nm]

**Observations :** L'échelle considérée est de [1600 ; 1610nm] pour la longueur d'onde et de [0 ; 0,017] W / [(m<sup>3</sup>. Sr. nm)] pour la radiance. On observe globalement la diminution de l'amplitude de la radiance ; La radiance observée pour le modèle standard à 1600 nm passe de 0,0087 à 0,0071 W / [(m<sup>3</sup>. Sr. nm)] pour le modèle calculé. De même qu'à la longueur d'onde 1610 nm, la radiance décroît en passant de 0,0071 à 0,0059 W / [(m<sup>3</sup>. Sr. nm)]. A la longueur d'onde 1605,6 nm un pic disparaît pour laisser une courbe quasi rectiligne. Un décalage de la courbe sur l'axe des longueurs d'onde n'est pas constaté.

❖ **Analyse du 28 Aout 2012 à 12 h**

➤ **Etude de la radiance**

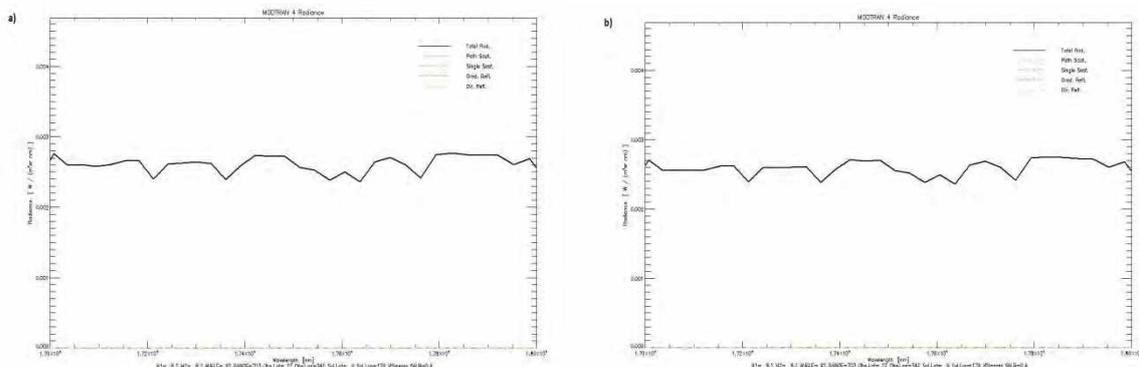


**a) Courbe standard**

**b) Courbe expérimentale**

**Figure 24 : Radiances du 28 Aout 2012 dans l'intervalle [12500 ; 13000 nm]**

**Observations :** L'échelle considérée est de [12500 ; 13000nm] pour la longueur d'onde et de [0 ; 0,0045] W / (m<sup>3</sup>.sr. nm)] pour la radiance. Globalement, la courbe expérimentale est atténuée avec une diminution de la valeur maximale par rapport à la courbe standard.



**a) Courbe standard**

**b) Courbe expérimentale**

**Figure 25 : Radiances du 28 Aout 2012 dans l'intervalle [17000 ; 18000 nm]**

**Observations :** L'échelle considérée est de [17000 ; 18000] nm pour la longueur d'onde et de [0 ; 0,0047] W / (m<sup>3</sup> .sr. nm) pour la radiance. On observe globalement une légère diminution de l'amplitude de la radiance ; La radiance observée pour le modèle standard à 17000 nm passe de 0,00268 à 0,00262 W / [(m<sup>3</sup> .sr. nm)] pour le modèle calculé.