



UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

Rapport de DEA LAMORA

ANALYSE DES MESURES DE L'INSTRUMENT SPATIAL SAGE III :
COMPARAISON AVEC LES MESURES DE L'INSTRUMENT POAM III.
CARACTERISATION DES AEROSOLS STRATOSPHERIQUES LORS
D'EPISODES D'INCENDIES DE FORÊT

Présenté par Cédric TETARD

Responsable de stage : Mme. C. BROGNIEZ

Rapporteurs : M. J.C. BURIEZ et M. LEFRANC

Année 2003-2004

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier ma responsable de stage Madame **Colette BROGNIEZ** qui m'a patiemment encadré et conseillé. Sans ses nombreuses compétences, je n'aurais pu mener à bien ce travail.

Je tiens également à remercier le directeur du laboratoire d'optique atmosphérique, Monsieur **Didier TANRE** pour son accueil.

Un grand merci aussi à Messieurs **Bernard BONNEL** et **Jean-Luc DEUZE** ainsi qu'à Madame **Isabelle JANKOWIAK** pour avoir répondu avec beaucoup de gentillesse et de compétence à mes sollicitations.

Merci également à Madame **Christine DEROO** et à Monsieur **Louis GONZALES** pour leur soutien informatique.

Et enfin merci à mes collègues du bureau 322 et tout particulièrement **Mustapha BELKESSAM** et **Sébastien SZAFFARCZYK**.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	Page 4
1) QUELQUES ELEMENTS DE THEORIE	Page 5
1.1) Les aérosols	Page 5
1.1.1) <i>Définition et origines</i>	Page 5
1.1.2) <i>Caractéristiques physiques</i>	Page 5
1.1.3) <i>Effets climatiques des aérosols stratosphériques</i>	Page 6
1.2) Notions d'optique atmosphérique	Page 7
1.2.1) <i>Le transfert du rayonnement</i>	Page 7
1.2.2) <i>Coefficient d'extinction – section efficace</i>	Page 7
2) PRESENTATION DE L'EXPERIENCE SAGE III	Page 8
2.1) Un peu d'histoire	Page 8
2.2) Description du spectromètre SAGE III	Page 9
2.2.1) <i>Présentation des canaux de mesure</i>	Page 9
2.2.2) <i>Caractéristiques techniques</i>	Page 10
2.3) Principes d'observation et de mesure	Page 11
3) TRAVAIL EFFECTUE	Page 12
3.1) Comparaison avec les données de POAM III	Page 12
3.1.1) <i>Profils verticaux de la concentration de l'ozone</i>	Page 12
3.1.2) <i>Profils verticaux de la concentration du dioxyde d'azote</i>	Page 14
3.1.3) <i>Profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols</i>	Page 15
3.2) Caractérisation des aérosols au-dessus du Canada en août 2003	Page 18
3.2.1) <i>Analyse des données SAGE III</i>	Page 18
3.2.2) <i>Modèle d'aérosols sulfatés</i>	Page 21
3.2.3) <i>Modèle d'aérosols de biomasse</i>	Page 22
3.2.4) <i>Modèle d'aérosols de suie</i>	Page 23
3.2.5) <i>Résultats issus des mesures SAGE III</i>	Page 24
CONCLUSION	Page 26
ANNEXE	Page 27
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	Page 35

INTRODUCTION

A ce jour, l'étude des aérosols est d'une grande importance dans le problème du réchauffement climatique. De nombreuses études ont été réalisées ou sont en cours dans le but de réduire les incertitudes sur l'estimation du forçage radiatif des aérosols. Ces études passent par une meilleure caractérisation des aérosols (propriétés physiques et chimiques). Un effort tout particulier est aujourd'hui entrepris à propos de ceux issus de feux de biomasse. Bien que les aérosols stratosphériques soient moins abondants, leur influence climatique n'est pas négligeable. De plus, il est aujourd'hui admis qu'ils interviennent dans le cycle de destruction de l'ozone [Seinfeld and Pandis, 1998].

Le satellite russe METEOR-3M avec à son bord le spectromètre SAGE III (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment) fut lancé en décembre 2001 sur une orbite polaire. Depuis mai 2002, ce spectromètre développé par la NASA fournit des informations essentielles à l'étude de la stratosphère terrestre (de 10 km à 45 km). Utilisant la technique d'occultation solaire, SAGE III mesure des spectres de transmissions sur une bande allant de 290 nm à 1021 nm à l'aide d'une barrette CCD et à 1545 nm avec une photodiode infrarouge. L'analyse des spectres de transmission permet d'aboutir aux profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols et aux profils verticaux de concentration des espèces présentes dans la stratosphère. SAGE III s'intéresse tout particulièrement à l'ozone, au dioxyde d'azote, à l'eau, au dioxyde de chlore... Des mesures par occultation lunaire permettent également la caractérisation d'espèces nocturnes (NO₃, trioxyde d'azote notamment).

Lors de ce stage, nous nous sommes intéressés à la caractérisation d'aérosols stratosphériques au dessus des régions canadiennes de l'Alberta et de Colombie Britannique en août 2003. En effet, l'instrument MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) à bord de Terra (satellite de la NASA) y détecte alors d'importants incendies de forêt [<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>]. L'idée de départ était donc de voir si les données SAGE III reflétaient bien ces incendies, c'est-à-dire, si on pouvait constater des singularités dans les profils verticaux d'extinction des aérosols en août 2003 au-dessus de ces régions. Puis, à l'aide de comparaisons avec des modèles théoriques de tenter de déterminer le type d'aérosols responsables de ces singularités : aérosols de feux de biomasse ou aérosols stratosphériques classiques (composés d'acide sulfurique).

Faute de ne pouvoir obtenir des transmissions correctement normalisées par la NASA (pour l'instant), nous n'avons pu inverser nous-même les mesures. Par conséquent, les données d'extinction et de concentration des espèces minoritaires utilisées par le LOA sont celles fournies directement par l'inversion mise en place aux Etats-Unis. Au préalable, nous avons comparé ces données à celles obtenues par d'autres instruments (tel POAM III – Polar Ozone and Aerosol Measurement) afin de pouvoir appréhender le degré de confiance à accorder aux résultats issus des données SAGE III.

Après avoir présenté dans une première partie quelques éléments de théorie nécessaires à la bonne compréhension des notions utilisées, le deuxième chapitre se consacrera à la présentation de l'expérience satellitaire SAGE III. Enfin, le troisième chapitre abordera les comparaisons avec POAM III et interprétera les résultats obtenus pour la caractérisation de ces « aérosols canadiens ».

1) QUELQUES ELEMENTS DE THEORIE.

1.1) Les aérosols

1.1.1) Définition et origines

Les aérosols sont de fines particules en phase liquide ou solide en suspension dans l'atmosphère. Il s'agit le plus souvent de particules sulfatées, minérales ou carbonées.

On distinguera les aérosols d'origine naturelle (embruns marins, sable désertique, poussières volcaniques, incendie de forêt...) des aérosols d'origine anthropique (combustion du charbon, du pétrole, du bois...). On compte environ 2200 millions de tonnes par an d'aérosols naturels pour 'seulement' 92 millions de tonnes d'aérosols anthropiques [Deuzé, 2004].

Les aérosols stratosphériques (ceux qui intéressent l'expérience SAGE III) sont pour la plupart issus de la conversion gaz-à-particules. Les gaz précurseurs sont présents naturellement, il s'agit notamment de COS (sulfure de carbonyle) photodissocié puis oxydé en SO₂ (dioxyde de soufre) et SO₂ lui-même. Ensuite, le dioxyde de soufre s'oxyde, formant ainsi des aérosols sulfatés composés d'acide sulfurique et d'eau. Le dioxyde de soufre vient des éruptions volcaniques telles le Mont Pinatubo en 1991 où El Chichón en 1982. Il provient également de l'activité humaine : la combustion des énergies fossiles. Le temps de résidence moyen de ces aérosols est de l'ordre de quelques années. La stratosphère terrestre est ainsi sous l'influence constante de ces particules dont l'impact radiatif n'est pas négligeable [Seinfeld and Pandis, 1998].

1.1.2) Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques des aérosols sont leur taille et leur indice de réfraction. Elles dépendent de leur nature chimique (sulfatées, carbonées...). Elles sont très variables suivant :

- La zone géographique: beaucoup d'aérosols industriels dans la vallée du Gange et moins au milieu du pacifique par exemple,
- L'altitude,
- Les saisons.

Dans le domaine visible, la partie réelle de l'indice de réfraction des aérosols peut varier de 1,33 (pour l'eau pure) à 1,75 (pour les suies) et la partie imaginaire de 10⁻³ pour la silice à 0,5 pour les suies [Shettle, 1979]. La taille des aérosols est également très variable : de 10⁻³ µm pour les ions à plusieurs micromètres pour les plus grosses (aérosols d'origine désertiques) [Deuzé, 2004].

Pour caractériser les propriétés physiques des aérosols, les scientifiques ont recours à la granulométrie. Il s'agit d'une fonction analytique permettant de représenter la répartition en taille des aérosols. Plusieurs fonctions ont été proposées mais, celle qui est le plus couramment utilisée est la distribution log-normal (LND) [Russell et al., 1996] :

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} = \frac{N_0}{r \ln \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\ln^2(r/r_m)}{2 \ln^2 \sigma_g} \right]$$

Dans cette expression, n(r) représente le nombre de particules par unité de volume dont le rayon est compris entre r et r + dr, N₀ est la concentration totale des particules, σ_g est la déviation standard géométrique de la distribution (largeur de la distribution) et r_m est le rayon médian.

D'un point de vue radiatif, une particule sphérique diffuse la lumière proportionnellement à sa section πr². Par conséquent, on a attribué deux grandeurs effectives à chaque type de granulométrie pour représenter l'impact radiatif d'une population d'aérosols [Hansen et Hovenier, 1974] :

Le rayon effectif r_{eff} :

$$r_{eff} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r \pi r^2 n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 n(r) dr} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) dr}$$

et la variance effective V_{eff} :

$$V_{eff} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} (r - r_{eff})^2 \pi r^2 n(r) dr}{r_{eff}^2 \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 n(r) dr} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} (r - r_{eff})^2 r^2 n(r) dr}{r_{eff}^2 \int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) dr}$$

r_1 et r_2 sont respectivement le rayon minimum et le rayon maximum de la distribution.

Avec une granulométrie LND, cela donne :

$$r_{eff} = r_m \exp(2,5 \ln^2 \sigma_g)$$

$$V_{eff} = \exp(\ln^2 \sigma_g) - 1$$

Les propriétés radiatives d'une granulométrie sont plus proches de celle d'une particule moyenne de rayon r_{eff} que de celle d'une particule de rayon r_1 , r_2 ou r_m . Ce sont donc ces grandeurs qui interviendront dans notre étude.

1.1.3) Effets climatiques des aérosols stratosphériques

Les effets des aérosols stratosphériques sur le climat ne sont pas négligeables. En effet, leur temps de résidence peut aller jusqu'à quelques années ce qui leur laisse le temps de recouvrir uniformément le globe. Ce temps de résidence est d'autant plus marqué après une éruption volcanique de grande ampleur telle celle du Mont Pinatubo en 1991 ou celle de El Chichón en 1982. Ces effets sont de deux ordres :

L'effet direct des aérosols stratosphériques correspond à l'extinction (diffusion et éventuellement absorption) du rayonnement solaire, qui aura le plus souvent tendance à augmenter la température de la stratosphère (+ 3,5 K après le Pinatubo et 4 K après El Chichon d'après *Labitzke and Mc Cormick, 1992* et *Labitzke et al., 1983*) et à diminuer celle au niveau du sol (-0,7 K après le Pinatubo et - 0,5 K après El Chichon selon *Chazette et al., 1995*)

L'effet indirect des aérosols est dû à leur caractère hydrophile (pour les aérosols sulfatés notamment). En deçà d'une certaine température, les aérosols entraînent la formation de nuages stratosphériques polaires (les PSC Polar Stratospheric Clouds). Ces derniers interviennent comme catalyseurs dans le cycle de destruction de l'ozone stratosphérique, molécule indispensable puisqu'elle absorbe le rayonnement ultraviolet protégeant ainsi la biosphère de ce rayonnement très énergétique et néfaste (notamment pour la santé de l'homme). La diminution de l'ozone n'est pas limitée aux régions de hautes latitudes et les aérosols stratosphériques en seraient partiellement responsables [Seinfeld and Pandis, 1998].

1.2) Notions d'optique atmosphérique

1.2.1) Le transfert du rayonnement

L'équation de transfert du rayonnement décrit la propagation dans la direction \vec{s} d'un rayonnement électromagnétique de luminance monochromatique $L_\lambda(\vec{s})$ à travers l'atmosphère. La luminance représente l'énergie radiative transportée par l'onde électromagnétique. Elle s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des pertes énergétiques (par diffusion et par absorption) et des gains d'énergie (par diffusion et par émission). La conservation de l'énergie permet donc d'écrire l'équation de transfert radiatif :

$$\frac{dL_\lambda(\vec{s})}{ds} = -\sigma_{ext}^\lambda [L_\lambda(\vec{s}) - J_\lambda(\vec{s})]$$

Dans cette équation, le terme à gauche de l'égalité désigne la variation de la luminance le long de l'intervalle ds , le premier terme à droite représente les pertes d'énergie et le deuxième les gains sous la forme de la fonction source $J_\lambda(\vec{s})$. σ_{ext}^λ est le coefficient d'extinction qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement. Il s'exprime en m^{-1} .

Si on ne considère que l'atténuation du rayonnement, c'est-à-dire si $J_\lambda(\vec{s}) = 0$, on obtient la loi de Beer-Lambert : $dL_\lambda(\vec{s}) = -\sigma_{ext}^\lambda L_\lambda(\vec{s}) ds$

Cette équation est à la base du principe des mesures de l'expérience SAGE3.

En intégrant l'équation de Beer-Lambert sur un intervalle de largeur x avec $L_\lambda(0)$ comme condition limite (en $x = 0$) et en considérant le coefficient d'extinction comme constant, on obtient la loi exponentielle de Beer : $L_\lambda(x) = L_\lambda(0) \exp[-\sigma_{ext}^\lambda \cdot x]$

On définit alors la transmission monochromatique $T_\lambda = L_\lambda(x) / L_\lambda(0) = \exp[-\sigma_{ext}^\lambda \cdot x]$

ainsi que l'épaisseur optique notée $\tau^\lambda = \sigma_{ext}^\lambda \cdot x$

L'épaisseur optique, tout comme la transmission monochromatique seront des grandeurs qui interviendront de façon essentielle dans l'étude menée par la suite. A noter qu'elles sont sans dimension.

1.2.2) coefficient d'extinction – section efficace

Nous avons vu qu'un rayonnement électromagnétique qui traverse l'atmosphère peut être absorbé ou diffusé dans une direction autre que celle du rayonnement.

Pour chaque constituant, le coefficient d'extinction à la longueur d'onde du rayonnement, peut donc s'écrire comme la somme d'un terme lié à l'absorption et un autre lié à la diffusion :

$$\sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{dif}$$

Les coefficients σ_{dif} et σ_{abs} s'expriment, comme σ_{ext} , en m^{-1} . Ils sont proportionnels à la densité n des molécules absorbantes ou diffusantes. Pour la diffusion par exemple : $\sigma_{dif} = n \Sigma_{dif}$ où Σ_{dif} est la section efficace de diffusion moléculaire ou particulaire, exprimée en m^2 .

Dans l'atmosphère, σ_{ext} est la somme des extinctions de chaque espèce en présence, soit :

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \sigma_{diff}^{Ray}(\lambda) + \sigma_{ext}^{aero}(\lambda) + \sum_k \sigma_{abs}^{gazk}(\lambda)$$

Ainsi, dans l'atmosphère, l'extinction du rayonnement électromagnétique est due à l'absorption des gaz, l'extinction des aérosols et la diffusion Rayleigh, du nom du célèbre physicien anglais. La

diffusion Rayleigh est celle des atomes et des molécules de dimensions bien inférieurs à la longueur d'onde du rayonnement incident. Le calcul du coefficient de diffusion Rayleigh aboutit à [Deuzé, 2004]:

$$\sigma_{diff}^{ray} \propto \frac{P}{T} \frac{1}{\lambda^4}$$

qui est calculable à partir des données météorologiques. Au vu de la dépendance en λ^{-4} , la diffusion moléculaire disparaît très vite quand la longueur d'onde du rayonnement augmente. Entre le coefficient d'extinction de la diffusion Rayleigh à 600 nm et à 1000 nm, il y a un facteur 10.

Le coefficient d'extinction des aérosols se détermine à partir de la granulométrie $n(r)$, il s'exprime ainsi :

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi \cdot r^2 Q_{ext}(r, \lambda, m) n(r) dr$$

où Q_{ext} le facteur d'extinction de Mie, dépend de l'indice de réfraction des aérosols considérés.

2) PRESENTATION DE L'EXPERIENCE SAGE3

2.1) Un peu d'histoire

SAGE III est un spectromètre utilisant la technique d'occultation solaire que je décrirai plus loin. Il a pu bénéficier de l'héritage de tous ses prédécesseurs également développés par la NASA.

En premier lieu, SAM (Stratospheric Aerosol Measurements), opérationnel dès 1975, est un photomètre portatif à canal unique (830 nm) qui fut utilisé par les astronautes de la mission Apollo-Soyouz.

En 1978, SAM II est embarqué à bord du satellite Nimbus7. Il est équipé d'un canal centré sur 1000 nm lui permettant une restitution des profils verticaux d'extinction des aérosols (l'extinction moléculaire est négligeable à cette longueur d'onde). SAM II n'est plus opérationnel depuis 1994.

Le premier spectromètre SAGE fonctionna de 1979 à 1981 avec 4 canaux à 385 nm, 450 nm, 600 nm et 1000 nm.

SAGE II, lancé en octobre 1984 et toujours en fonction aujourd'hui utilise trois canaux supplémentaires par rapport à son prédécesseur : 448 nm, 520 nm et 940 nm. Il permet d'accéder aux profils verticaux d'extinction des aérosols et aux profils verticaux des concentrations en O_3 , NO_2 et en vapeur d'eau.

Et enfin, SAGE III, opérationnel depuis 2002, possède 12 canaux décrits dans le paragraphe suivant.

Il est à noter également que chaque nouvelle mission fut établie pour étendre également la couverture spatiale de la mission précédente. Résumons tout cela dans un tableau :

Nom de l'instrument	SAM II	SAGE	SAGE II	SAGE III
Altitude (km)	955	600	610	1020
Inclinaison	99,3°	55°	57°	99,53°
Couverture géographique	64 - 80°N / 64 - 80°S	79°N - 79°S	80°N - 80°S	50 - 80°N / 30 - 50°S
Nombre de canaux	1	4	7	12

Table 2.1 : Caractéristiques des instruments à occultation solaire [ATBD, 2004]

D'autres instruments utilisant également le principe d'occultation solaire sont venus en complément :

- HALOE : Halogen Occultation Experiment fournit depuis 1991 les profils verticaux de plusieurs espèces, de la température et des coefficients d'extinction des aérosols à 4 longueurs d'onde : 2,45 μm , 3,40 μm , 3,46 μm , 5,26 μm . [d'après <http://haloedata.larc.nasa.gov/home.html>]
- POAM II et III : Polar Ozone and Aerosol Measurement II et III sont des spectromètres développés par le NRL (Naval Research Laboratory) pour mesurer les distributions verticales d'ozone, d'eau, de dioxyde d'azote, d'extinctions des aérosols et de température. POAM II mesure l'atténuation du rayonnement solaire sur 9 canaux centrés sur les longueurs d'onde suivantes : 352, 441, 448, 600, 760, 780, 920, 936 et 1020 nm. Après la défection de POAM II en 1996, POAM III fut lancé en 1998. Il possède les mêmes caractéristiques spectrales, excepté le dernier canal à 1020 au lieu de 1060 nm. [D'après le site <http://wvms.nrl.navy.mil/POAM/poam.html>]

2.2) Description du spectromètre SAGE III

2.2.1) Présentation des canaux de mesure

Le spectromètre SAGE III a été conçu de façon à pouvoir prendre des mesures de jour comme de nuit. De plus, ses concepteurs ont opté pour des mesures visant à caractériser, non seulement les profils verticaux de concentration des constituants mineurs de la stratosphère (O_3 , NO_2 , O_2 , H_2O et autres constituants), mais aussi les profils des coefficients d'extinction des aérosols à plusieurs longueurs d'onde.

Pour réaliser de telles mesures, il est nécessaire de disposer de détecteurs susceptibles de travailler à de multiples longueurs d'onde. Ainsi, SAGE III possède une étendue spectrale allant de 280 nm à 1545 nm, soit 12 canaux. Chaque canal est destiné à fournir les données concernant une espèce cible bien définie. Par exemple, à 601,5 nm, c'est l'ozone qui absorbe le plus (c'est la bande de Chappuis), mais, à cette longueur d'onde interviennent également les aérosols, le NO_2 .

Résumons toutes ces espèces cibles et interférentes dans ce tableau :

CANAUX	LONGUEUR D'ONDE CENTRALE (NM)	ESPECES CIBLES	ESPECES INTERFERENTES
S1	290,3	O ₃ mésosphérique	
S2	384,5	Aérosols	NO ₂ , O ₃
S3	441,7	NO ₂ , Aérosols	O ₃
S4	520,5	Aérosols	O ₃ , NO ₂
S5	601,5	O ₃ , Aérosols	NO ₂
S6	675,8	Aérosols	O ₃
S7	755,6	Aérosols	O ₃
S8	764,2	Bande A - oxygène	
S9	869,6	Aérosols	O ₃ , H ₂ O
S10	946,4	Vapeur d'eau, aérosols, O ₃	
S11	1021,6	Aérosols	O ₃
S12	1545	Aérosols	CO ₂ , H ₂ O

Table 2.2 : Canaux de SAGE III pour l'occultation solaire [Data Products User's Guide - march 2004]

Notons que chaque canal présente une certaine largeur spectrale.

Bien sûr, les longueurs d'onde centrales ont été choisies selon les spectres d'absorption des constituants gazeux. Sur la figure suivante, on voit par exemple, que le canal S5 (601,5 nm) est situé au niveau d'un maximum d'absorption de l'ozone (bande de Chappuis).

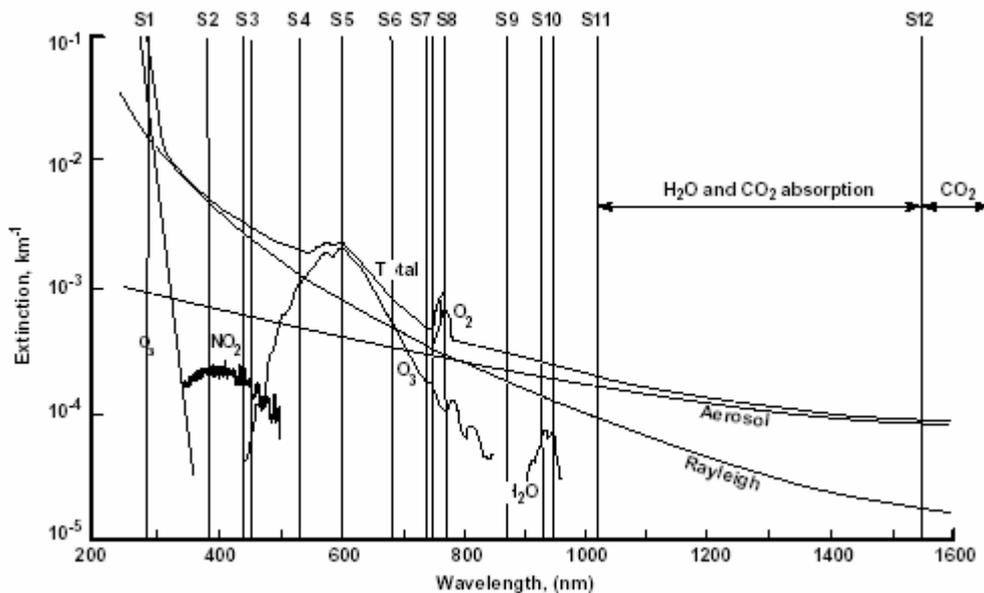


Figure 2.1 : Principales contributions à l'extinction de différentes espèces à 18km. Les traits verticaux représentent les longueurs d'onde centrales d'occultation solaire de SAGE III [DPUG, 2004]

On s'aperçoit qu'à toutes les longueurs d'onde, il faudra prendre en compte la contribution des aérosols et de la diffusion Rayleigh. Cette dernière n'est pas gênante car elle est calculable à partir des données météorologiques.

A noter que certains canaux sont également utilisés pour les mesures de nuit par occultation lunaire.

2.2.2) Caractéristiques techniques

Le spectromètre SAGE III est constitué de trois sous-ensembles principaux : le système de visée, le système optique et le système de détection.

Le système de visée est constitué d'un miroir pivotant permettant le balayage vertical du soleil (ou de la lune). Un atténuateur solaire mobile a été rajouté permettant une diminution de l'intensité du rayonnement d'un facteur 100. Il est enlevé lors de la mesure de l'atténuation à travers l'atmosphère du rayonnement réfléchi par la lune.

Le système optique est un télescope composé de miroirs qui reconstitue l'image observée dans le plan focal image où elle sera traitée par le système de détection.

Le système de détection est composé d'une barrette de CCD (Charged Coupled Device ou diode à transfert de charge en français) permettant une couverture spectrale allant de 287,5nm jusque 1024,2 nm. Une photodiode infrarouge InGaAs est rajoutée pour mesurer l'extinction des aérosols à la longueur d'onde de 1545 nm. La barrette CCD est composée de 10*809 pixels offrant une très bonne résolution spectrale (0,9 nm).

2.3) Principes d'observation et de mesure

Le spectromètre SAGE III mesure l'atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère. C'est un mode d'observation au limbe : SAGE III effectue une visée rasante du bord du disque terrestre permettant de n'observer que l'atmosphère. Cette technique s'appelle la télédétection par occultation solaire :

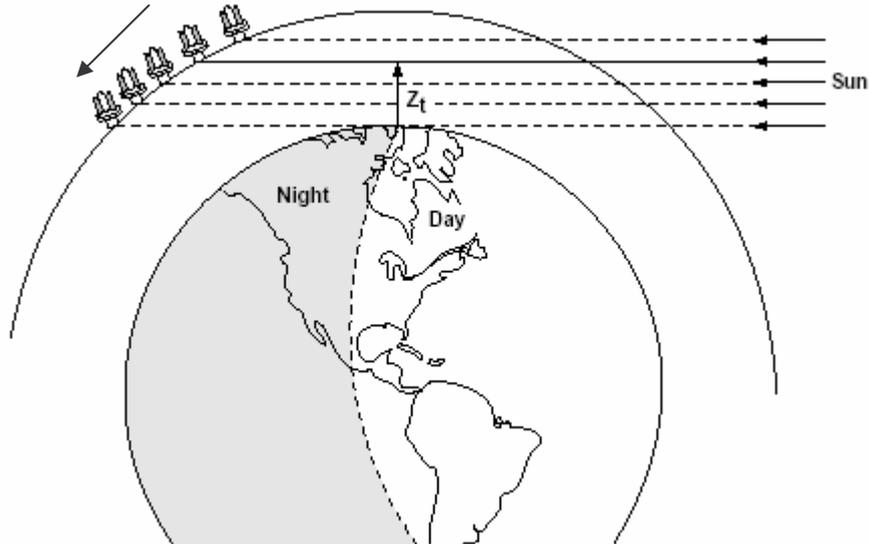


Figure 2.2 : Géométrie de la mesure par occultation solaire. L'altitude tangente est notée Z_t . Nous n'avons pas représenté la réfraction du rayonnement à l'entrée des couches atmosphériques. La flèche indique le sens de déplacement du satellite.

Le satellite se déplaçant dans le sens de la flèche, SAGE III observe sur ce schéma un coucher de soleil. Puis il rentre dans le cône d'ombre de la Terre où il ne prend plus de mesure. En sortant de cette ombre (non représenté sur le schéma), il observe un lever de soleil.

Dans cette géométrie, les couches d'atmosphères observées deviennent rapidement très épaisses quand on s'approche du bord du disque terrestre, c'est-à-dire quand l'altitude tangente Z_t est faible. On a également de plus en plus de chance de rencontrer un nuage. Cette technique d'observation est donc particulièrement bien adaptée à l'observation de la stratosphère.

L'occultation lunaire suit le même principe en utilisant comme source, le rayonnement solaire réfléchi par la lune. Cette méthode permet la détection d'espèces nocturnes telles le trioxyde d'azote et le dioxyde de chlore.

Au coucher du soleil, les premières mesures sont faites hors atmosphère (au-delà de 100 km) et permettent un étalonnage de l'instrument. On obtient l'éclairement solaire E_0 . La deuxième mesure, à l'altitude tangente Z_{t1} , donne E_1 . Nous avons donc, pour la première mesure, l'expression suivante :

$$E_1 = \text{Tr}(Z_{t1}) E_0$$

Où $\text{Tr}(Z_{t1})$ est la transmission atmosphérique à l'altitude Z_{t1} , ceci à chaque longueur d'onde. On peut ainsi calculer les épaisseurs optiques tangentes puis, par inversion accéder aux données d'extinctions et de concentrations [Bazureau, 2001].

3) TRAVAIL EFFECTUE

A défaut de pouvoir, pour l'instant, inverser les mesures de transmission de SAGE III, le LOA travaille sur des données inversées par la NASA. La caractérisation physique des aérosols stratosphériques est donc possible à l'aide de SAGE III: nous sommes en mesure de tracer des profils verticaux issus de ces données. Il nous a paru intéressant d'effectuer des comparaisons avec d'autres données satellitaires telles les données de POAM III décrit dans la deuxième partie. Ensuite, nous nous attarderons à la caractérisation d'une certaine population d'aérosols.

3.1) Comparaison avec les données de POAM3

Dans cette partie, les séries de données de POAM III que nous avons utilisées sont issues de l'algorithme d'inversion mis en place par le NRL (Naval Research Laboratory).

Nous comparerons dans un premier temps les profils verticaux de concentration en ozone, puis en dioxyde d'azote. Enfin, nous comparerons les profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols à 3 longueurs d'onde : 448, 600 et 1020 nm.

Au préalable, il fut nécessaire de sélectionner les événements en coïncidence spatio-temporelle. D'un point de vue spatial, le critère de coïncidence est le suivant : une différence de 1000 km maximum est acceptée entre les deux scènes observées par SAGE III et par POAM III.

D'un point de vue temporel, une différence de 2h est acceptée. Nous nous limitons aux événements allant du 7 mai 2002 au 24 septembre 2003.

Ainsi, une liste informatique est générée recensant les références des événements POAM III et celles des événements SAGE III en coïncidence spatio-temporelle.

Les événements sélectionnés ici se situent le 5 août 2003 (bien que la distance soit très importante, il a été choisi car il est localisé au Canada, voir paragraphe 3.2) et le 21 août 2003 (cas exceptionnel de très bonne coïncidence). Résumons les caractéristiques de ces enregistrements dans un tableau :

DATE	INSTRUMENT	HEURE (TU)	LATITUDE	LONGITUDE	Δ km
05/08/2003	SAGE3	3h45	55°N	118°W	837
05/08/2003	POAM3	3h10	58°N	106°W	
21/08/2003	SAGE3	21h37	62°N	30°W	57,5
21/08/2003	POAM3	21h39	62°N	30°W	

Table 3.1 : Description d'événements POAM III et SAGE III en coïncidence spatio-temporelle.

A noter que, par souci de synthèse, seules deux coïncidences seront présentées mais qu'une dizaine d'autres ont été étudiées avec des résultats similaires. D'ailleurs, en annexe 1 sont présentées d'autres coïncidences.

3.1.1) Profils verticaux de la concentration de l'ozone

Les figures suivantes représentent les comparaisons des profils verticaux de la concentration de l'ozone à partir des mesures obtenues par SAGE III (en rouge) et par POAM III (en bleu) ainsi que les différences relatives correspondantes. Elles sont calculées comme suit (avec S = mesure de SAGE III et P = POAM III et $(SP)_m$ = moyenne de S et P)

$$\text{Rel dif} = \frac{S - P}{(SP)_m} * 100$$

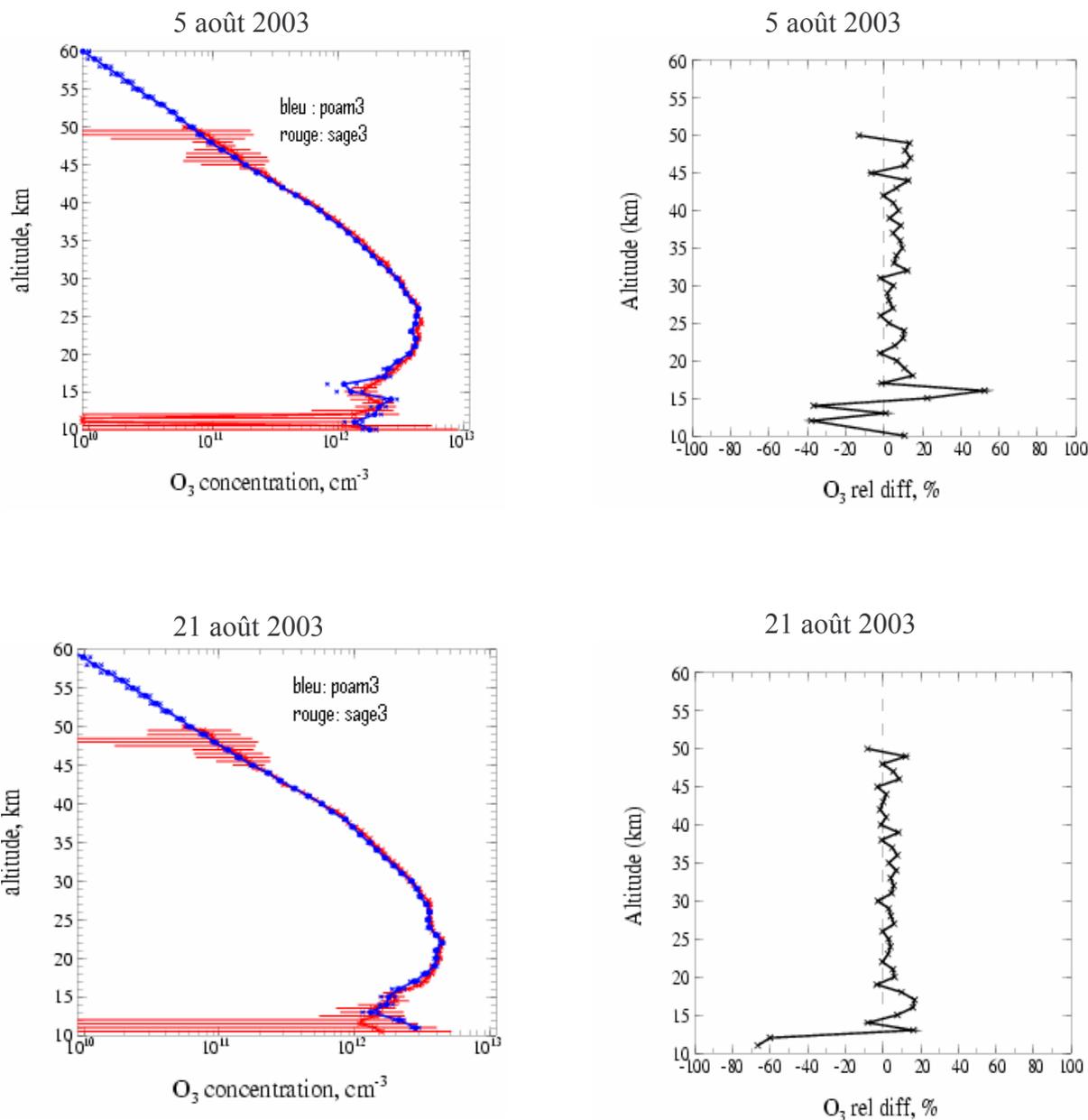


Figure 3.1 : Profils verticaux de la concentration en ozone (à gauche) mesurée par POAM III en bleu et par SAGE III en rouge pour les coïncidences du 5 août 2003 et du 21 août 2003. A droite, les différences relatives entre les deux profils. Les barres rouges correspondent aux incertitudes des mesures SAGE III ; les incertitudes sur les mesures de POAM III sont délimitées par deux croix bleues.

L'extinction du rayonnement solaire due à la présence de l'ozone est mesurée dans les canaux de la bande de Chappuis (centrée sur 600 nm) pour les deux instruments. A cette longueur d'onde, le coefficient d'absorption de l'ozone est maximum vers 15 – 20 km d'altitude. En dessous, la contribution de l'ozone est généralement dominée par la contribution de la diffusion moléculaire et de l'extinction des aérosols.

On constate un très bon accord entre les deux instruments pour ces deux coïncidences spatio-temporelles. Entre 15 et 25 km, la concentration de l'ozone est maximale, c'est la couche d'ozone.

Entre 20 et 50 km, la différence relative ne dépasse que rarement les 10 % en valeur absolue.

En ce qui concerne POAM III, les barres d'erreurs sont très faibles sur toute la gamme d'altitude (entre 10 et 60 km). Pour SAGE III, celles-ci le sont également mais, en dessous de 15 km et au-dessus de 45 km, les barres d'erreur deviennent importantes. Ces incertitudes sur la restitution du profil vertical de concentration sont liées aux erreurs sur :

- le calcul de la diffusion Rayleigh, de l'épaisseur optique et de l'altitude tangente Z_t ,
- le calcul de la contribution des espèces interférentes dans le canal considéré (cf. tableau 2.2).

3.1.2) Profils verticaux de la concentration du dioxyde d'azote

Les courbes ci-après représentent donc les profils verticaux de concentration en dioxyde d'azote issus des données de SAGE III (en rouge) et de POAM III (en bleu).

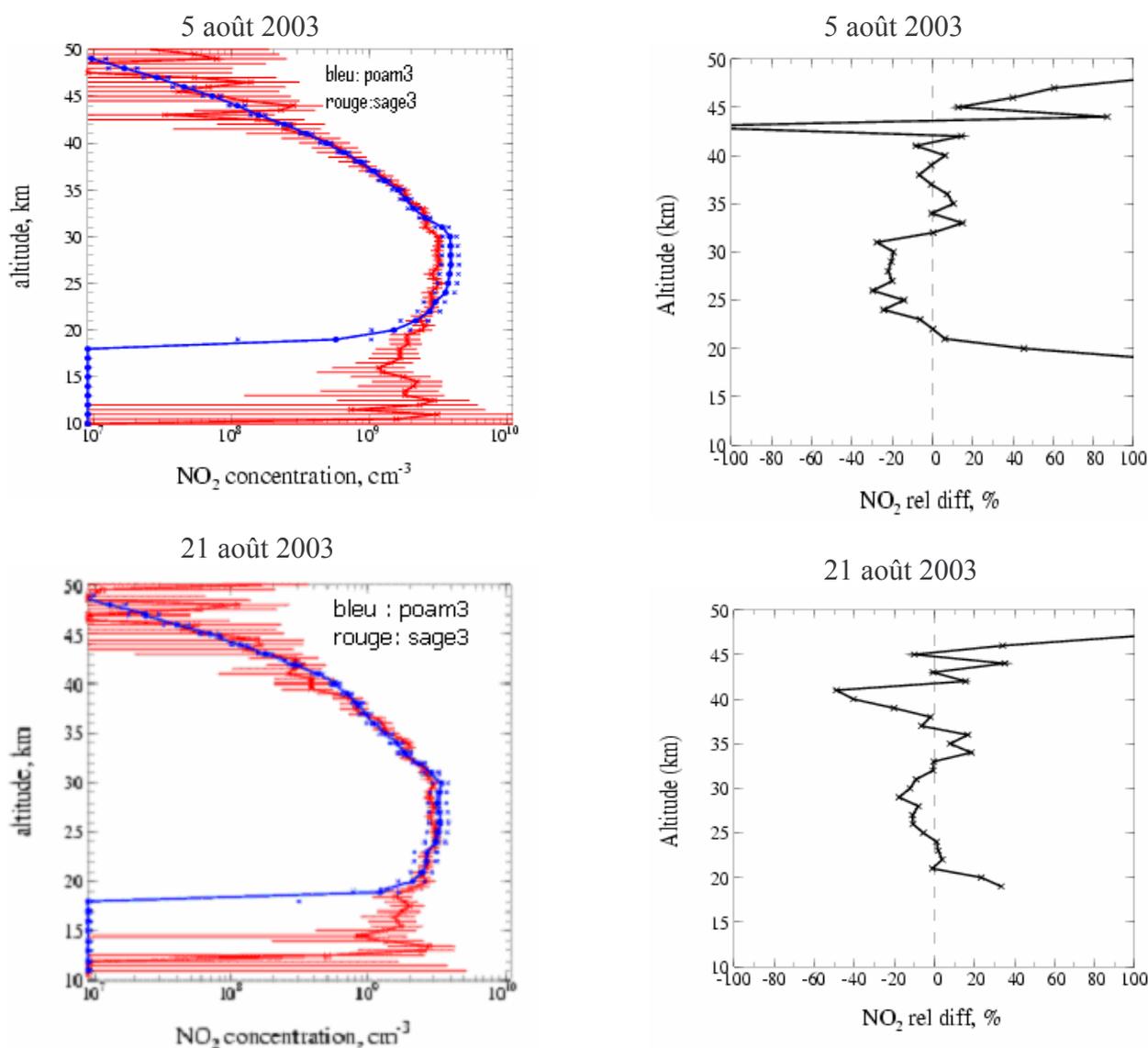


Figure 3.2 : Identique à la figure 3.1 mais pour le dioxyde d'azote.

Les mesures sont faites dans la bande d'absorption du dioxyde d'azote (de 350 à 500 nm). Nous trouvons là de moins bonnes similitudes entre les deux courbes. POAM III semble rencontrer des problèmes en dessous de 18 km. En effet, les concentrations de NO_2 déduites des données de

POAM III sont nulles en dessous de cette altitude. Nous pouvons aussi constater cette particularité dans les courbes de l'annexe 1. Seules les concentrations en dioxyde d'azote entre 20 et 35 km d'altitude semblent être en plus ou moins bon accord pour les deux instruments. La différence relative en valeur absolue y est de 15 % en moyenne pour le 21 août et de 20 % pour le 5 août. En deçà de 20 km et au-delà de 40 km, les concentrations en dioxyde d'azote issues de SAGE III sont entachées d'importantes incertitudes. Par contre, les incertitudes concernant POAM III sont très faibles.

3.1.3) Profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols

POAM III et SAGE III restituent les profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols à diverses longueurs d'onde et notamment autour de 440 nm, 602 et 1020 nm.

- A 448 nm (pour POAM III) et 442 (pour SAGE III)

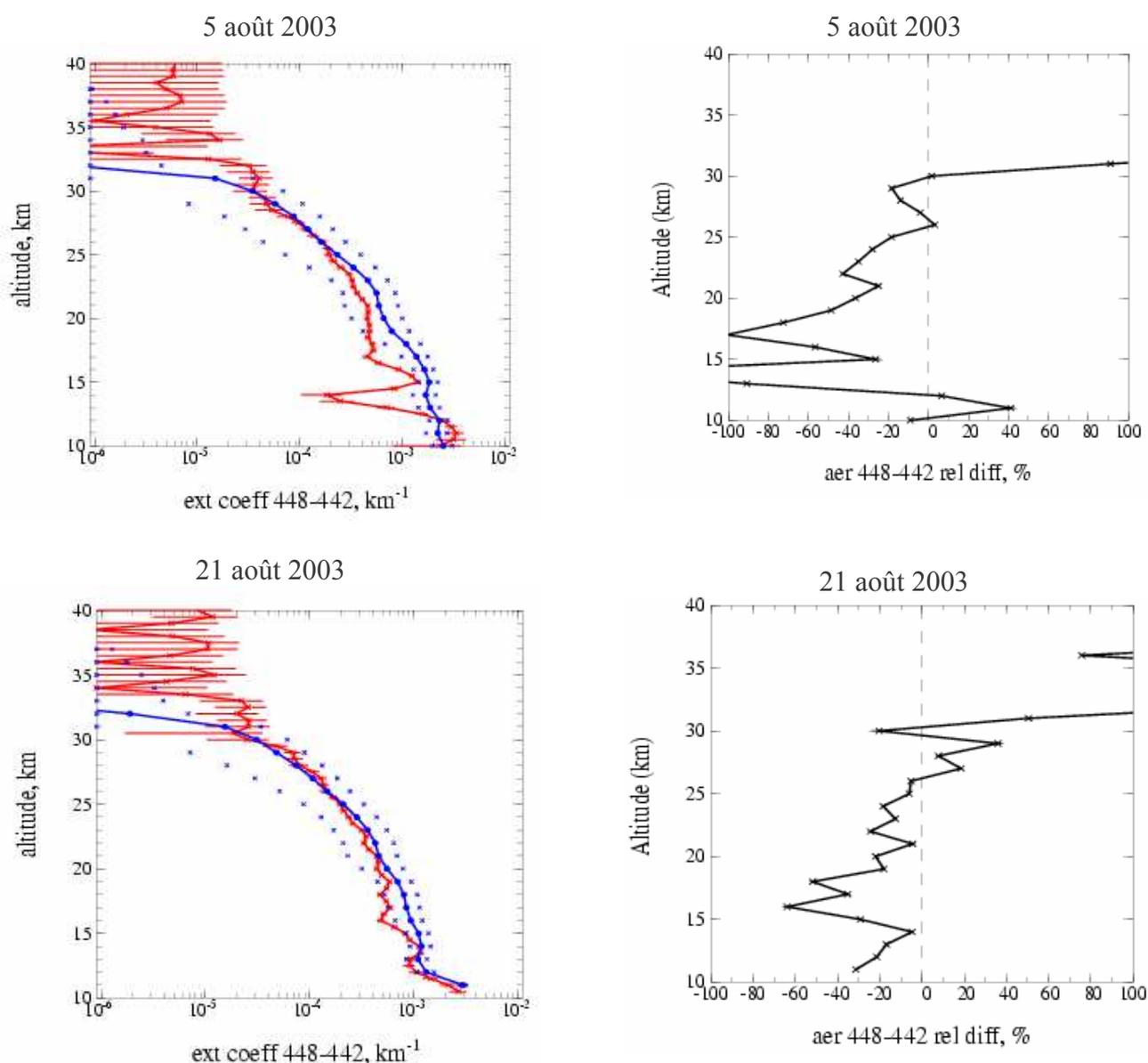


Figure 3.3 : A gauche, profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols à 442 nm pour SAGE III (en rouge) et à 448 nm pour POAM III (en bleu) pour les coïncidences du 5 et du 21 août 2003. Les barres rouges sont les incertitudes sur les mesures SAGE, celles de POAM sont délimitées par deux croix bleues. A droite, les différences relatives entre les deux mesures.

Pour la journée du 21 août, les courbes issues des données des deux spectromètres présentent à peu près la même allure même si les différences relatives entre elles sont parfois élevées (près de 70 % à 16 km). Au-delà de 32 km, POAM III ne propose plus de mesure à cette longueur d'onde et SAGE III présente d'importantes erreurs.

Pour le 5 août, nous avons grossièrement la même allure avec certaines disparités apparaissant entre 14 et 17 km : SAGE III mesure une singularité à 15 km que POAM III perçoit peu. Là encore, au-delà de 32 km POAM III retourne une valeur nulle et les mesures de SAGE III présentent de fortes incertitudes. Les différences relatives sont importantes (parfois plus de 100 %).

- A 600 nm, nous obtenons les résultats suivants :

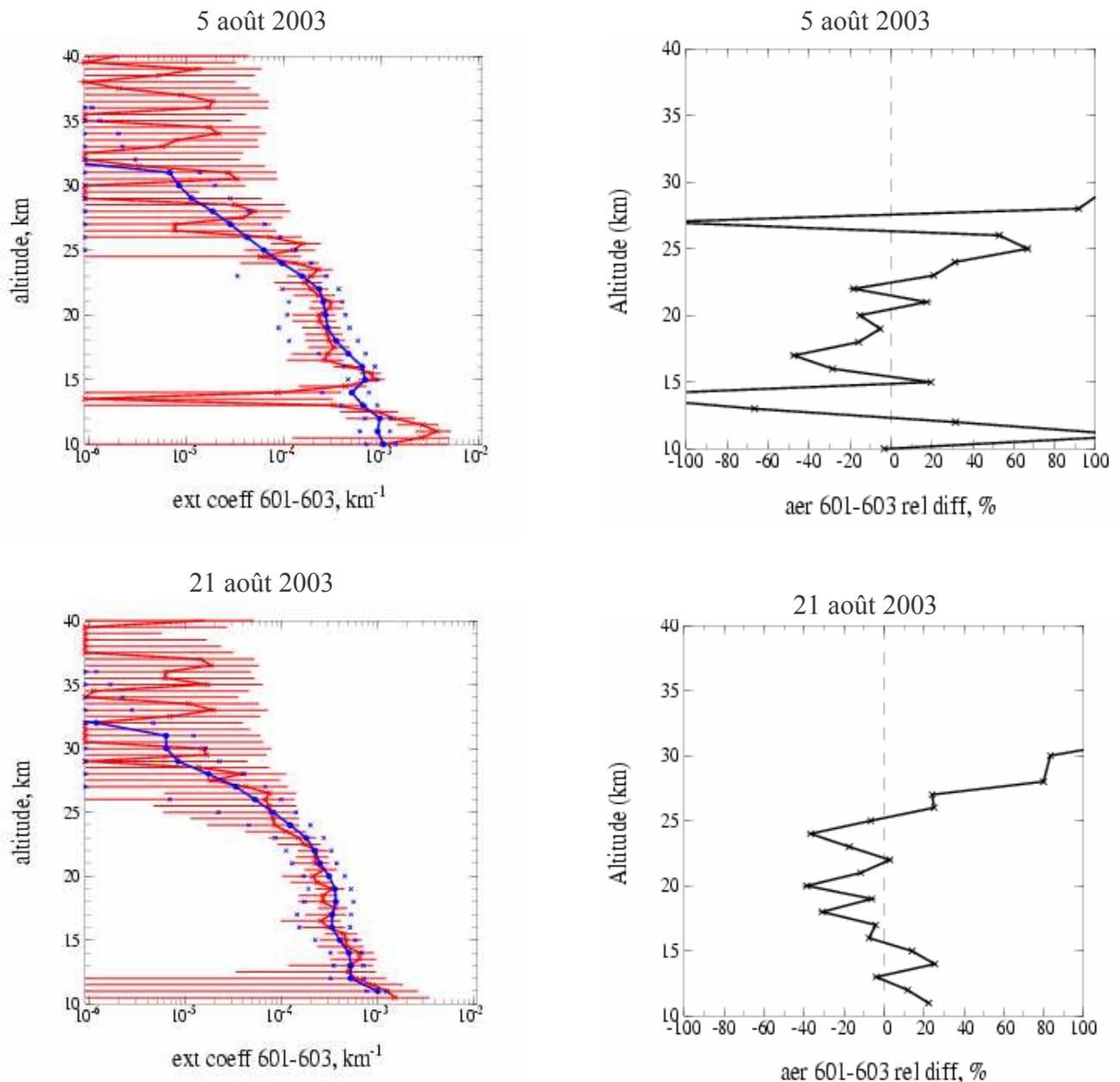


Figure 3.4 : Identique à la figure 3.3 mais la longueur d'onde est de 600 nm

Notons dans un premier temps que les erreurs affectant le canal SAGE III centré sur 600 nm sont très importantes quels que soient l'altitude et le jour considéré, sauf entre 14 et 23 km où elles sont acceptables.

Pour le 5 août, SAGE III et POAM III présentent des profils verticaux ayant la même allure générale. Ils observent tout les deux une singularité vers 15 km. Cependant, les écarts relatifs sont importants. Dans cette gamme d'altitude, ils varient en valeurs absolues de 20 % à 50 %.

Pour le 21 août, les allures générales des deux restitutions sont également assez proches. Les écarts relatifs calculés varient de 5 à 40 %.

- Enfin, à 1020 nm, nous avons les comparaisons suivantes :

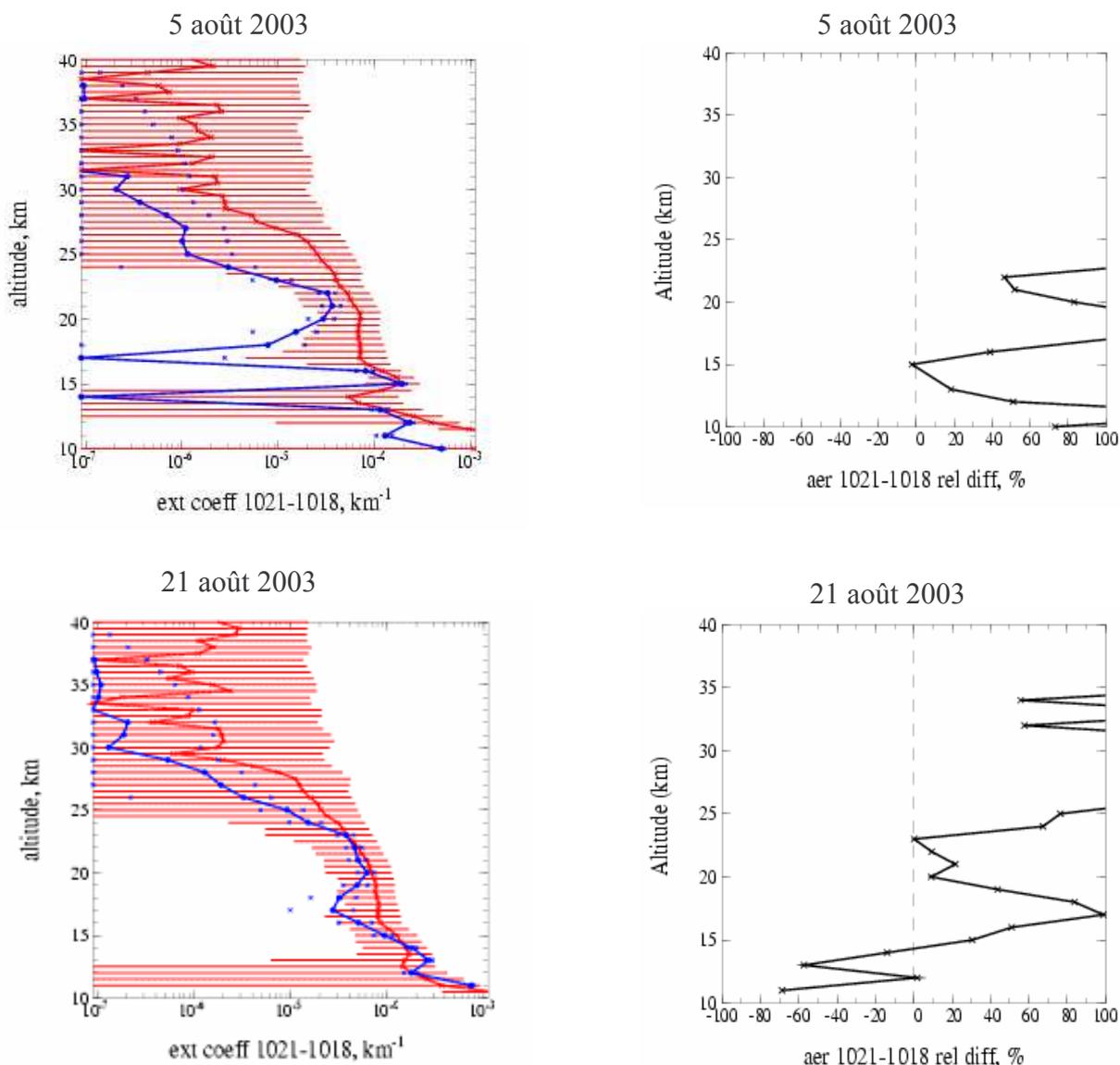


Figure 3.5 : Identique à la figure 3.3 mais à la longueur d'onde de 1021 nm pour SAGE III et 1018 nm pour POAM III.

De 10 à 40 km, le profil des coefficients d'extinction des aérosols de SAGE III s'accompagne d'importantes barres d'erreur. Les restitutions de POAM III présentent quant à elles des incertitudes plus faibles.

Les différences relatives sont importantes (atteignant parfois plus de 100 %). Il est difficile, pour ce canal, de pouvoir trouver certaines similitudes entre les deux événements même dans les allures générales des deux profils.

Ainsi, la comparaison entre les deux spectromètres est mitigée :

- bonne adéquation des profils verticaux de concentration en ozone (différence relative généralement inférieure à 10 %),
- les profils verticaux de concentration en dioxyde d'azote sont corrects (moins de 30 % d'écart)
- les restitutions des profils verticaux du coefficient d'extinction des aérosols présentent souvent la même allure mais avec des différences relatives importantes (de 20 à plus de 100 %)

Toutes ces comparaisons ont été effectuées avec la version 2 des données SAGE III et la version 3 des données POAM III. Depuis peu (un mois), de nouvelles versions des données de SAGE III et de POAM III sont accessibles au laboratoire. Il serait alors intéressant de comparer ces nouvelles versions entre elles et avec les versions précédentes. De plus, afin d'affiner nos comparaisons, nous pourrions étudier le comportement de la moyenne annuelle des différences relatives mesurées par les deux instruments afin de pouvoir intervalider ces mesures.

Après ces comparaisons, mettons l'accent sur la caractérisation d'une population d'aérosols peut être issue d'un feu de biomasse.

3.2) Caractérisation des aérosols au-dessus du Canada en août 2003

L'été 2003 fut, pour le Canada, désastreux. En effet, d'importants incendies dévastèrent plusieurs hectares de forêt. 'Temps fort' de ces incendies, le mois d'août où l'ouest canadien fut particulièrement touché. Les régions de Colombie Britannique et d'Alberta sont alors en proie aux flammes : plus de 300 feux de forêts sont répertoriés couvrant une superficie de près de 33 000 hectares ! Les autorités canadiennes parlent des pires feux que le Canada ait connus depuis plus de cinquante années. [D'après le site internet <http://www.flamexpert.com>].

Le spectroradiomètre MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) est en mesure d'observer les divers incendies à la surface du globe terrestre. Le site internet <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/gallery> répertorie les incendies que MODIS a observé. Les intenses feux de forêt de l'ouest canadien en août 2003 y figurent.

Vu l'intensité de ces incendies, il est alors intéressant de voir si certaines des plus fines particules issues de ces feux ont pu être injectées dans la stratosphère, située à 11 km d'altitude à ces latitudes (environ 55°N). Il s'agirait alors d'aérosols issues de la combustion des arbres. Il faut donc analyser les données du spectromètre SAGE III pour rendre compte de possibles aérosols stratosphériques issus de ces feux. Si l'analyse des données révèle une anomalie dans les profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols, on peut alors tenter de savoir si les incendies de forêt en sont la cause.

3.2.1) Analyse des données SAGE III

Comme nous l'avons vu, le spectromètre SAGE III restitue les profils verticaux des coefficients d'extinction à diverses longueurs d'onde. Nous avons donc sélectionné des événements SAGE III situés au-dessus de ces deux régions canadiennes en août 2003. Les latitudes délimitant ces régions sont 50°N et 60°N. En longitude, de 110 à 130° ouest. Les journées retenues sont le 2, le 5, le 8 et le 11 août 2003 au dessus de l'Alberta. Ci-après sont représentés les profils verticaux des coefficients d'extinction mesurés à 756 nm (canal S7) par SAGE III. Notons que d'autres profils déduits de mesures à d'autres longueurs d'onde (1545 nm et 520nm) sont présentés en annexe 2.

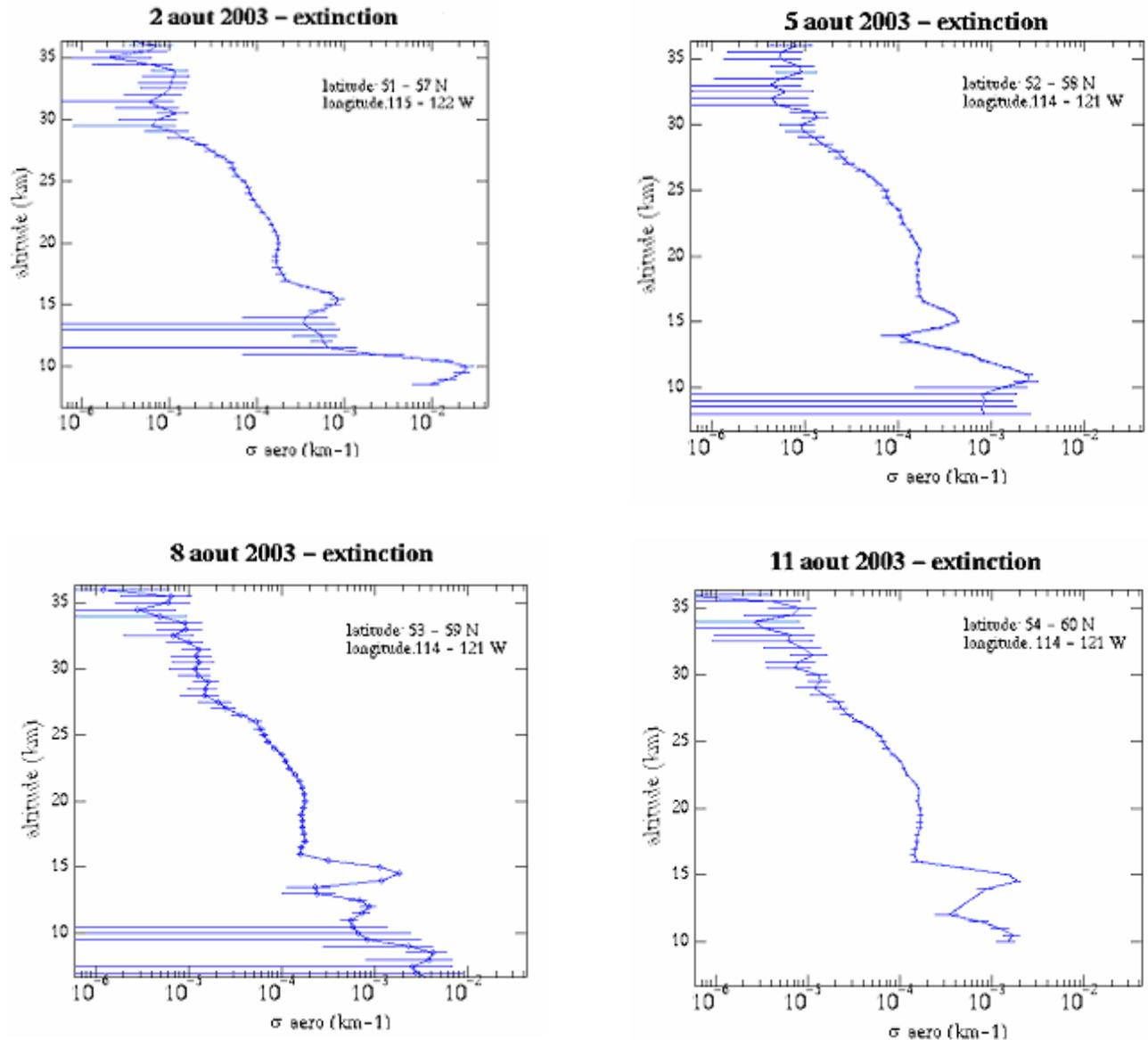


Figure 3.6 : Profils verticaux d’extinction des aérosols mesurés à 756 nm au-dessus de la région d’Alberta (Canada) pour les journées du 2, du 5, du 8 et du 11 août 2003.

Dans un premier temps, on observe que les barres d’incertitudes restituées sur ces quatre profils sont acceptables entre 11 et 29 km. En dessous de 11 km (altitude de la tropopause d’après les données SAGE III), nous sommes dans la troposphère, il est possible d’y rencontrer des nuages.

Les latitudes et longitudes indiquées pour chaque courbe sont sensiblement identiques. Elles correspondent aux latitudes et longitudes de début et de fin d’occultation.

Nous pouvons constater sur les quatre profils un pic vers 15 km d’altitude. Le coefficient d’extinction devient bien plus important aux alentours de cette altitude.

Il y aurait donc une anomalie. Pour s’en convaincre, superposons le profil d’extinction des aérosols mesurés à 756 nm le 2 août 2003 et le profil du 1^{er} juin 2003 dans la même zone géographique. A cette dernière date, nous pouvons considérer que seuls les aérosols de fond

interviennent (composés de H_2SO_4 et de H_2O). En effet, aucun événement sortant de l'ordinaire (incendies, éruption volcanique...) n'a été observé à cette période.

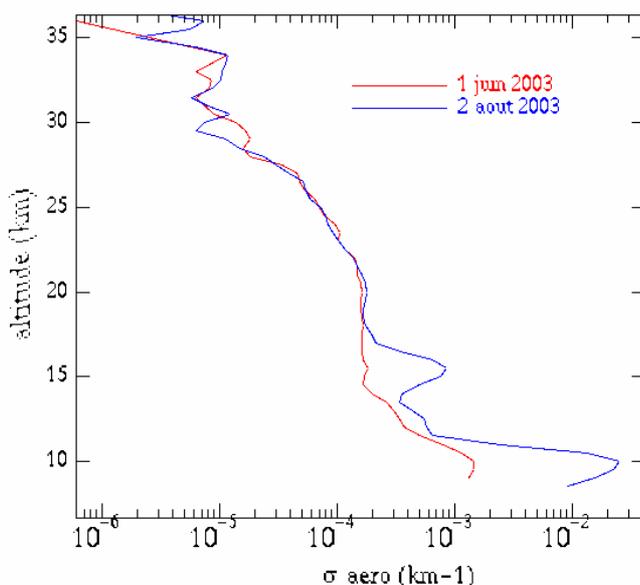


Figure 3.7 : Comparaison entre les profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols à 756 nm le 1^{er} juin 2003 et le 2 août 2003 au dessus de la région d'Alberta. Les barres d'erreur ne sont volontairement pas représentées par souci de clarté.

Nous constatons une évidente anomalie pour le 2 août 2003 aux alentours de 15 km alors que pour le 1^{er} juin, cette « bosse » n'apparaît pas. A 10 km, on observe également une augmentation du coefficient d'extinction que l'on peut attribuer à un nuage. Notons bien que pour bien d'autres dates du mois d'août et dans la même région, on constate également cette singularité.

En résumé, pour l'instant nous avons :

- des incendies spectaculaires dans l'ouest canadien,
- MODIS les aperçoit,
- SAGE III détecte une anomalie au-dessus (vers 15 km) des régions incendiées : le rayonnement solaire est plus atténué que d'ordinaire.

Nous pourrions en conclure que le responsable de cette extinction supérieure à la normale serait l'incendie de forêt. Et par conséquent, l'extinction serait causée par des aérosols de feux de biomasse. Mais cette conclusion serait pour le moins hâtive et très peu scientifique !

Puisqu'il est indéniable qu'au courant du mois d'août 2003, SAGE III décèle dans ces profils verticaux de coefficients d'extinction une irrégularité marquée à 15 km d'altitude, nous devons tenter de trouver de quelques types d'aérosols il s'agit : aérosols sulfatés, de feu de biomasse ou aérosols suies ?

La démarche que nous avons adoptée pour cela est la suivante : nous allons étudier les variations spectrales du coefficient d'extinction afin de déterminer le rayon effectif et la variance effective de la répartition de particules, puis nous allons comparer nos résultats à des modèles que nous aurons mis en place au préalable : un pour les aérosols sulfatés (souvent composés de 75% de H_2SO_4 et de 25% de H_2O en masse), un pour les aérosols de feu de biomasse et un pour les suies (très absorbant).

3.2.2) Modèle d'aérosols sulfatés

Nous allons donc simuler ici la variation spectrale du coefficient d'extinction d'une population d'aérosols sulfatés.

Nous avons donc besoin dans un premier temps, de la variation spectrale de l'indice de réfraction m d'une telle composition : $m(\lambda) = n - ik$.

λ (μm)	n	k
0,384	1,470	$1 \cdot 10^{-8}$
0,448	1,455	$1 \cdot 10^{-8}$
0,52	1,454	$1 \cdot 10^{-8}$
0,675	1,452	$1 \cdot 10^{-8}$
0,755	1,449	$2 \cdot 10^{-8}$
0,869	1,447	$6 \cdot 10^{-8}$
1,021	1,443	$1,41 \cdot 10^{-6}$
1,545	1,430	$1,5 \cdot 10^{-4}$

Table 3.2 : Variation spectrale de l'indice de réfraction d'aérosols sulfatés [d'après Palmer and Williams, 1975].

Dans un second temps, il nous faut une granulométrie. Nous utiliserons celle décrite dans le premier chapitre, à savoir la LND (Log Normal Distribution).

Nous prendrons par souci de simplification $N_0 = 1$. La déviation standard géométrique σ_g variera de 1,1 à 2 (avec un pas de 0,1 soit 10 valeurs) et le rayon médian r_m de 0,05 à 1 μm (avec un pas variable, soit 37 valeurs) [Steele and Turco, 1997].

Dès lors, nous pouvons procéder au calcul des variations spectrales du coefficient d'extinction simulé $\sigma_{ext}(\lambda)$ pour les 370 granulométries différentes sur 8 longueurs d'onde.

A partir de là, nous avons analysé les paramètres d'une régression polynomiale du coefficient d'extinction simulé en fonction de la longueur d'onde. La méthode employée est une estimation par les moindres carrés. L'expression analytique choisie est la suivante :

$$\ln \sigma_{ext}(\lambda) = \ln \sigma_{ext}(1.545) - a \ln\left(\frac{\lambda}{1.545}\right) - b \left[\ln\left(\frac{\lambda}{1.545}\right) \right]^2$$

A chaque granulométrie, nous avons donc attribué un couple (a,b) issu de la régression ci-dessus. Sur la courbe qui suit, nous voyons un exemple de la variation spectrale du coefficient d'extinction d'aérosols sulfatés avec une granulométrie LND où la déviation standard géométrique σ_g vaut 2 et où le rayon médian r_m vaut 0,2 μm :

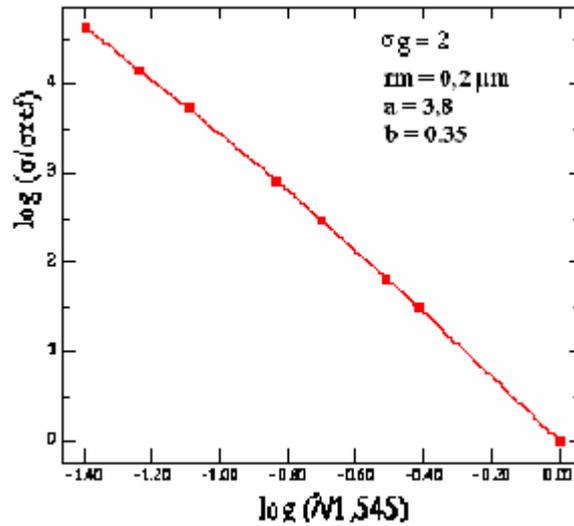


Figure 3.8 : Variation spectrale du coefficient d'extinction d'aérosols sulfatés. Détermination de a et b.

3.2.3) Modèle d'aérosols de biomasse

Ce même travail a été mené pour des aérosols issus de feux de biomasse.

Il est important de noter que beaucoup d'études (telle la mission internationale SAFARI 2000 - Southern African Regional science Initiative) concernent aujourd'hui les aérosols de biomasse. Leur mode de transport dans la stratosphère et leur composition sont mal connus. Toutefois, Haywood et al. [2003 - a] suggèrent la composition suivante : 70% de matière organique, 25% de matière inorganique et 5% de suies avec les indices de réfraction de Dubovik and King [2000] reportés dans le tableau suivant :

λ (μm)	n	k
0,384	1,50	0,02
0,448	1,51	0,02
0,52	1,52	0,019
0,675	1,54	0,016
0,755	1,55	0,016
0,869	1,56	0,016
1,021	1,58	0,016
1,545	1,59	0,016

Table 3.3 : Variation spectrale de l'indice de réfraction d'aérosols de feux de biomasse [d'après Dubovik and King, 2000]

Nous utilisons les mêmes répartitions en taille que précédemment. Nous obtenons là aussi, des couples (a,b). Nous pouvons voir sur la courbe qui suit, les variations spectrales du coefficient d'extinction d'aérosols issus de feux de biomasse avec $\sigma_g = 2$ et $r_m = 0,2 \mu m$.

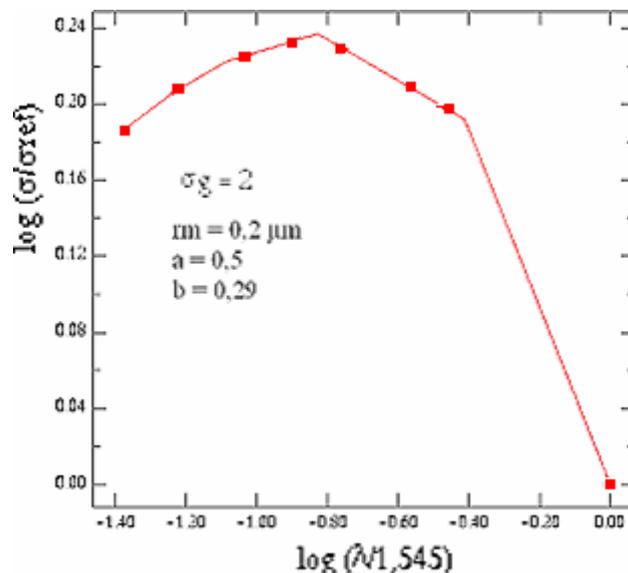


Figure 3.9 : Identique à la figure 3.8 mais pour des aérosols de feu de biomasse.

3.2.4) modèle d'aérosols de suie

Nous avons tout de même testé un autre modèle, les suies, bien qu'il soit peu probable qu'il représente correctement nos aérosols canadiens. En effet, les aérosols de feux de biomasse comporteraient peu de suie (5 % selon Haywood et al. [2003]).

Nous utilisons encore une fois ici, la même méthode que précédemment. Les suies proviennent de combustion incomplète, elles se constituent notamment de carbone, très absorbant. La partie réelle de l'indice de réfraction va de 1,75 (à 384 nm) à 1,77 (à 1.545 nm) ; la partie imaginaire de 0,462 à 0,460 [WCP, 1986].

La variation spectrale du coefficient d'extinction est représentée sur la courbe suivante :

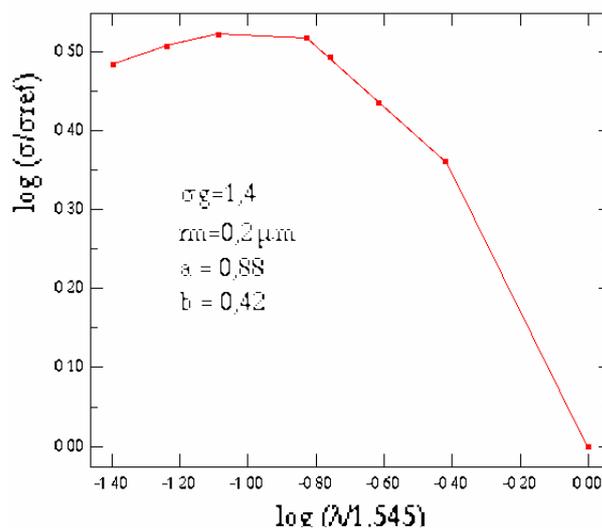


Figure 3.10 : Identique à la figure 3.8 mais pour des suies.

Nous avons donc mis en place trois modèles d'aérosols susceptibles d'être responsables de « l'anomalie canadienne du mois d'août » et nous en avons extrait les variations spectrales du coefficient d'extinction.

3.2.5) Résultats issus des mesures de SAGE III

La restitution des profils verticaux du coefficient d'extinction des aérosols issus des mesures SAGE III nous a permis d'en déduire sa dépendance spectrale. En comparant cette variation spectrale à celles obtenues à l'aide des modèles du paragraphe précédent, nous pourrions peut-être en déduire la composition des aérosols responsables de cette 'bosse'.

Les résultats obtenus semblent être en bon accord tant avec le modèle de H₂SO₄ qu'avec celui des feux de biomasse. En effet, la différence relative moyennée sur toutes les longueurs d'onde, entre le coefficient d'extinction simulé d'aérosols sulfatés et celui déduit des mesures SAGE III varie entre 3 % et 32 % entre 14 et 28 km d'altitude. De même, la comparaison entre les coefficients d'extinction des aérosols de SAGE III et ceux simulés pour des aérosols de feu de biomasse entraîne des différences allant de 2 % à 27 %

Par contre, les coefficients d'extinction déduits des mesures SAGE III sont très éloignés de ceux obtenus avec le modèle d'aérosols de suie, la différence relative atteint 68 % au minimum.

La bosse sur les profils d'extinction déduits de SAGE III se situe aux alentours de 15 km. Là, la comparaison avec le modèle d'aérosols sulfatés donne une différence de 6 % et avec le modèle d'aérosols de biomasse, elle est de 7 %.

Nous pouvons donc juste affirmer que les aérosols à la base de « l'anomalie canadienne du mois d'août » ne sont pas des suies, l'écart entre le modèle et les mesures est trop important. Par contre, les écarts entre les mesures de SAGE III et les modèles sulfaté et de biomasse sont tout deux faibles. Nous ne pouvons donc pas conclure sur le caractère sulfaté ou de 'feu de biomasse' des aérosols étudiés. Ainsi, l'étude des variations spectrales de ces aérosols n'apporte pas de lumière quant à la composition des aérosols stratosphériques.

Cela dit, nous pouvons tracer le profil vertical du rayon effectif des aérosols obtenu à partir des profils de leurs coefficients d'extinction pour les deux indices de réfraction : celui des aérosols sulfatés et celui des aérosols de feu de biomasse. Sur les courbes qui suivent, nous avons superposé les rayons effectifs obtenus avec ces indices de réfraction pour les événements au-dessus des régions d'Alberta.

Nous ne constatons que très peu de différences entre les deux types d'aérosols. Entre 15 et 27 km, le rayon effectif moyen est autour de 0,15 – 0,2 µm, ce qui correspond à la taille typique des aérosols de fond. D'autres méthodes de restitution des rayons effectifs ont été mises en place au laboratoire et fournissent les mêmes résultats. Le pic correspond donc vraisemblablement à un plus grand nombre de particules alors injectées dans la stratosphère à cause des incendies. Pour le vérifier, il faut restituer le nombre d'aérosols ; ce qui est beaucoup plus délicat à mettre en place.

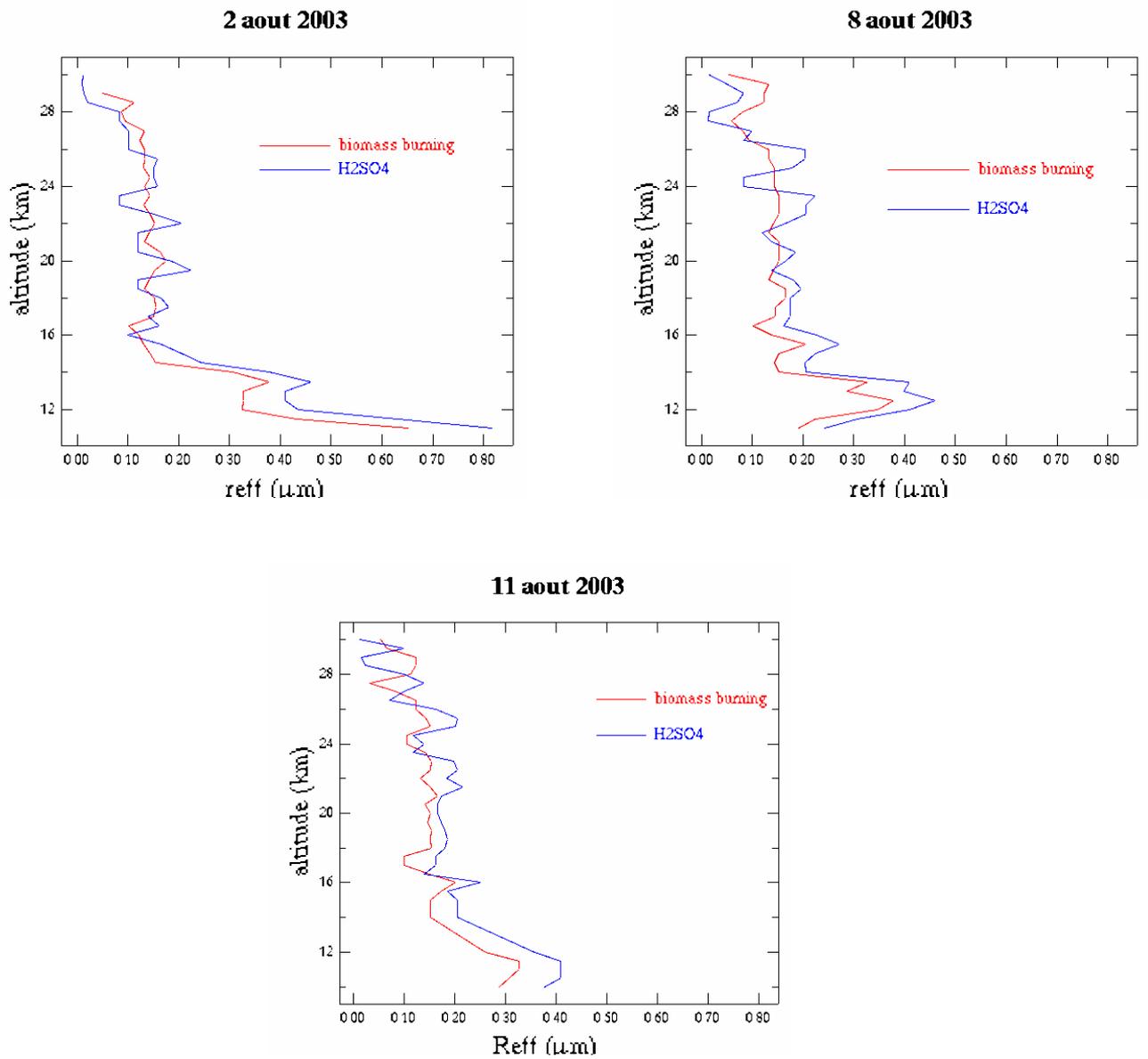


Figure 3.11 : Rayon effectif des aérosols déduits des mesures d'extinction de SAGE III avec les indices de réfraction d'aérosols sulfatés (en bleu) et ceux de feux de biomasse (en rouge).

CONCLUSION

Ce stage m'a permis de me familiariser avec la méthode de mesure par occultation et de m'initier au principe d'inversion des mesures et autres techniques de traitements de données.

SAGE III permet l'obtention de profils verticaux de concentration de l'ozone, du dioxyde d'azote et des coefficients d'extinction des aérosols. Il est alors intéressant de comparer ces profils à ceux obtenus avec d'autres instruments. Durant cette année, nous avons étudié les comparaisons entre les restitutions de la version 2 des données de SAGE III et celles d'un autre spectromètre POAM III (version 3) pour plusieurs événements en coïncidence spatio-temporelle. Les résultats concernant le profil de concentration en ozone sont en très bon accord avec des différences relatives inférieures à 10 % entre 20 et 50 km. Pour le dioxyde d'azote, les résultats des comparaisons sont moins bons : nous atteignons parfois 30 % de différences relatives. Les profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols sont encore moins similaires : les écarts s'étalent de 20 % à parfois plus de 100 % !

Un autre instrument satellitaire, MODIS, a observé durant l'été 2003 d'importants incendies au dessus du Canada. Nous avons voulu savoir si SAGE III était, lui aussi sensible à ces incendies, c'est-à-dire si certaines particules avaient pénétré la stratosphère. Effectivement, les profils d'extinction des aérosols du mois d'août présentent une singularité aux alentours des 15 km. Dès lors, une étude a été menée pour tenter de déterminer la nature des aérosols responsables de cette irrégularité : aérosols sulfatés, de feu de biomasse ou des suies ? Nous avons donc mis en place trois modèles d'aérosols mettant en exergue les variations spectrales des coefficients d'extinction. Puis nous les avons comparées à celles déduites des mesures de SAGE III. Il s'avère qu'il ne peut s'agir de suies (trop grandes différences) et que les modèles d'aérosols sulfatés et de biomasse sont aussi proche l'un que l'autre des mesures. Par conséquent, nous n'avons pas pu conclure sur la composition de ces aérosols. Aussi, les rayons effectifs déduits de ces mesures à l'aide des indices d'aérosols sulfatés et de biomasse sont identiques : environ 0,15 μm entre 15 et 27 km ce qui correspond aux rayons habituellement rencontrés.

A la suite de ce travail plusieurs perspectives apparaissent.

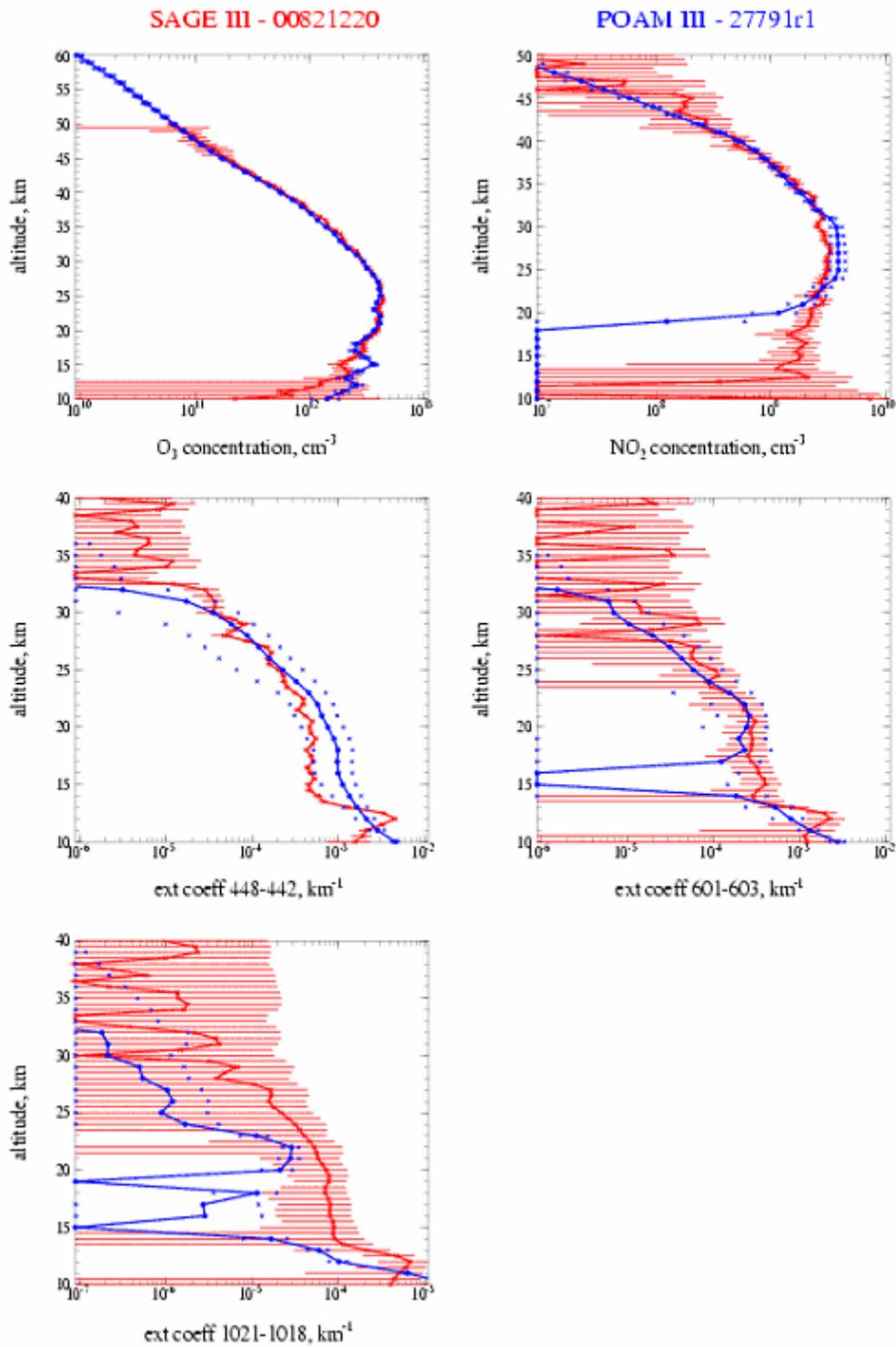
Il faudrait, avant de conclure sur un éventuel mauvais fonctionnement d'un des canaux de mesure, effectuer de nouvelles comparaisons. Les nouvelles versions de données de chacun de ces deux spectromètres sont désormais accessibles. On pourra donc effectuer de nouvelles comparaisons : entre les nouvelles versions, entre l'ancienne de SAGE III et la nouvelle de POAM III... De plus, on pourra comparer les profils de SAGE III avec d'autres instruments comme SAGE II par exemple. Et enfin, afin de valider les données SAGE III, nous pourrions étudier le comportement de la moyenne annuelle des différences relatives mesurées entre toutes ces séries de comparaisons.

Afin de déterminer la composition de tels aérosols, d'autres méthodes devront être mises en place. Aussi faudra-t-il s'attacher à dénombrer le nombre de particules responsable de l'anomalie canadienne.

De plus, les données de transmission étant aujourd'hui accessibles, nous pourrions utiliser l'algorithme d'inversion mise en place au laboratoire [Bazureau, 2003] et entamer une campagne d'intercomparaison entre les résultats issus de l'algorithme du LOA et ceux de la NASA.

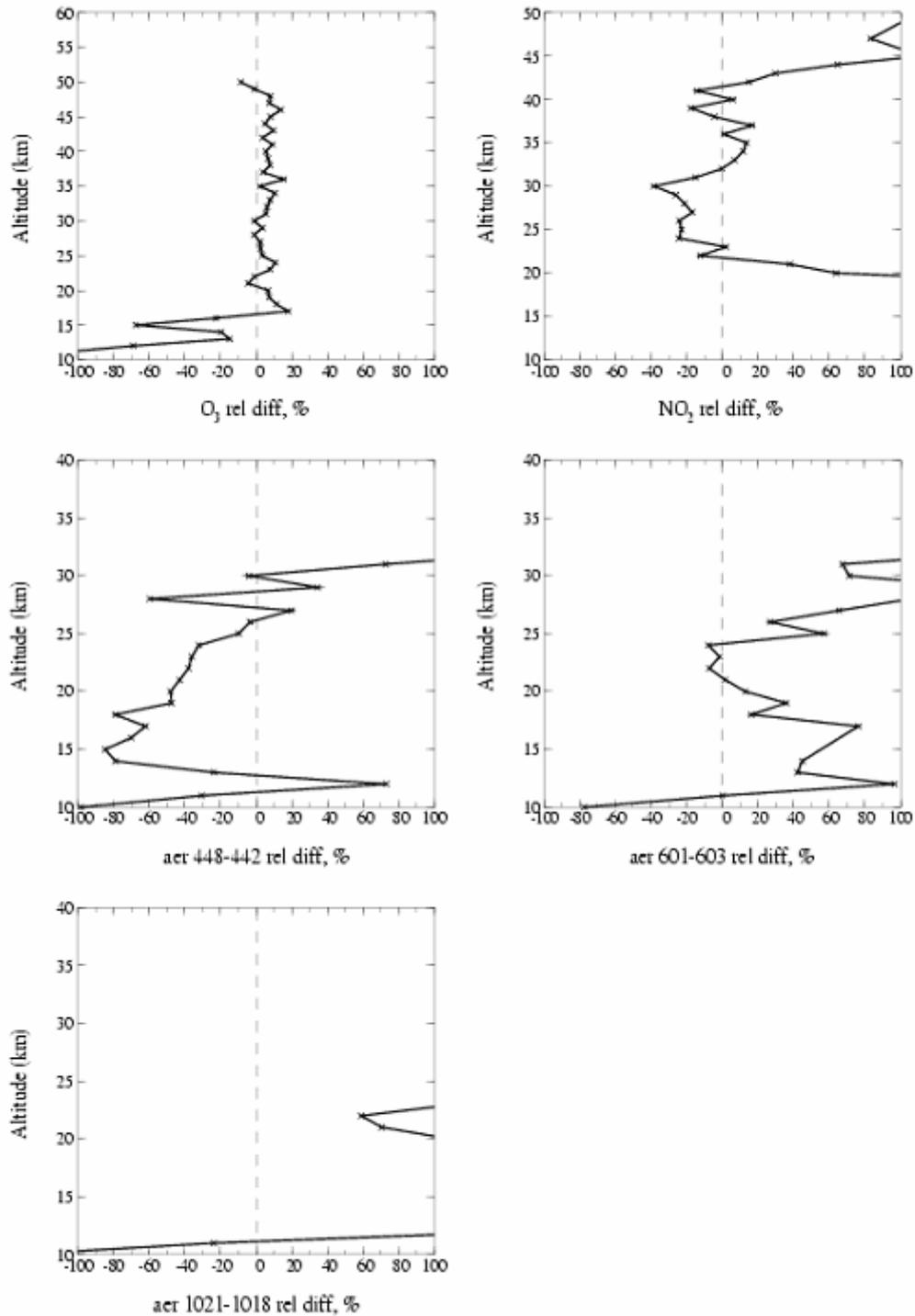
ANNEXE 1

**Comparaison des profils verticaux de concentration de l'ozone, du dioxyde d'azote et des coefficients d'extinction des aérosols déduits des données SAGE III et POAM III en coïncidence spatio-temporelle.
Différences relatives correspondantes**

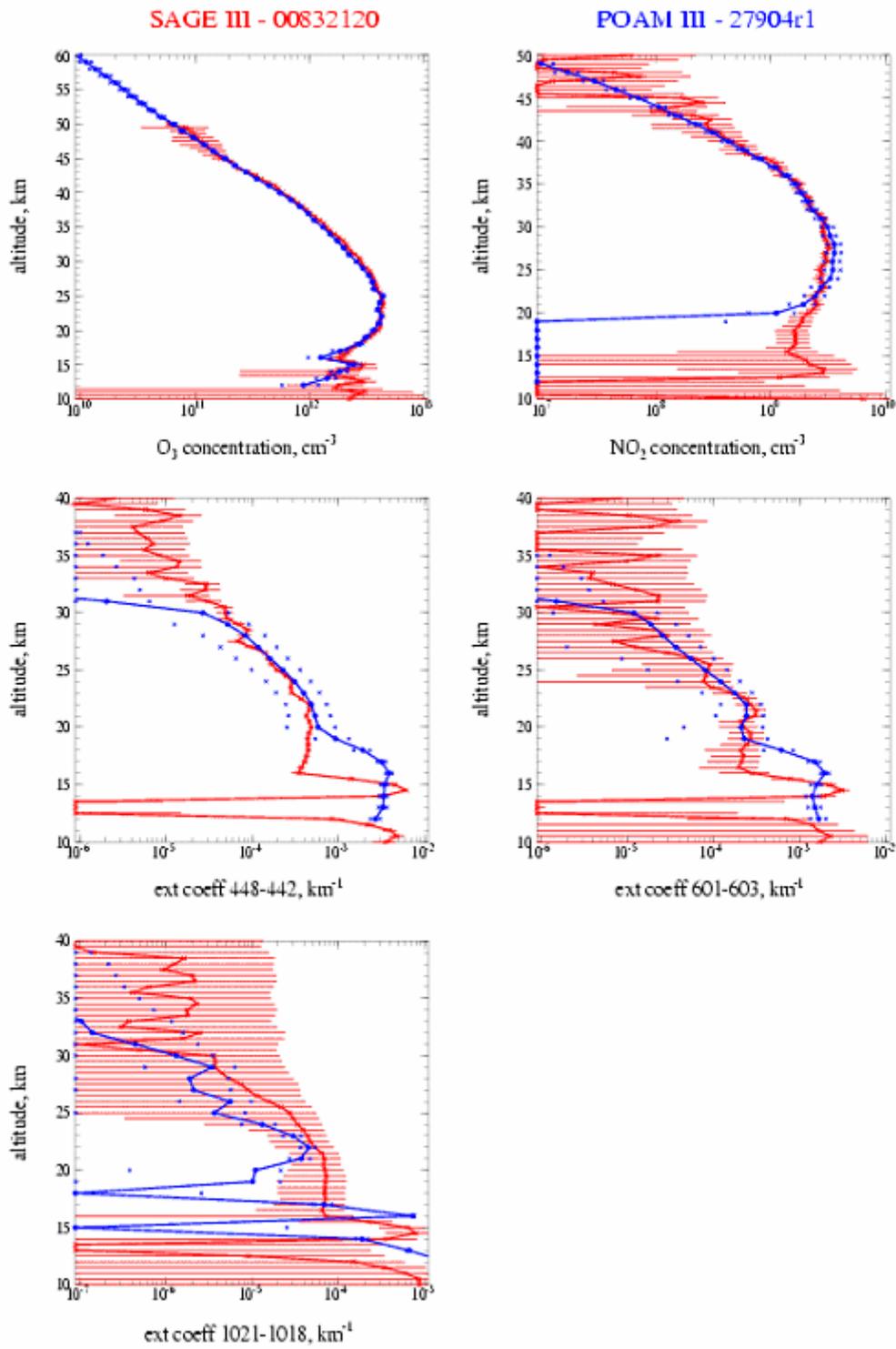


A.1.1 : Comparaison des profils issus des données de SAGE III en rouge et de POAM III en bleu. Les barres d'erreurs pour SAGE III sont en traits pleins rouges et les incertitudes sur les données POAM III sont délimitées par deux points bleus. Ces profils correspondent à la journée du 3 août 2003 en Colombie Britannique.

SAGE III 00821220 - POAM III 27791r1

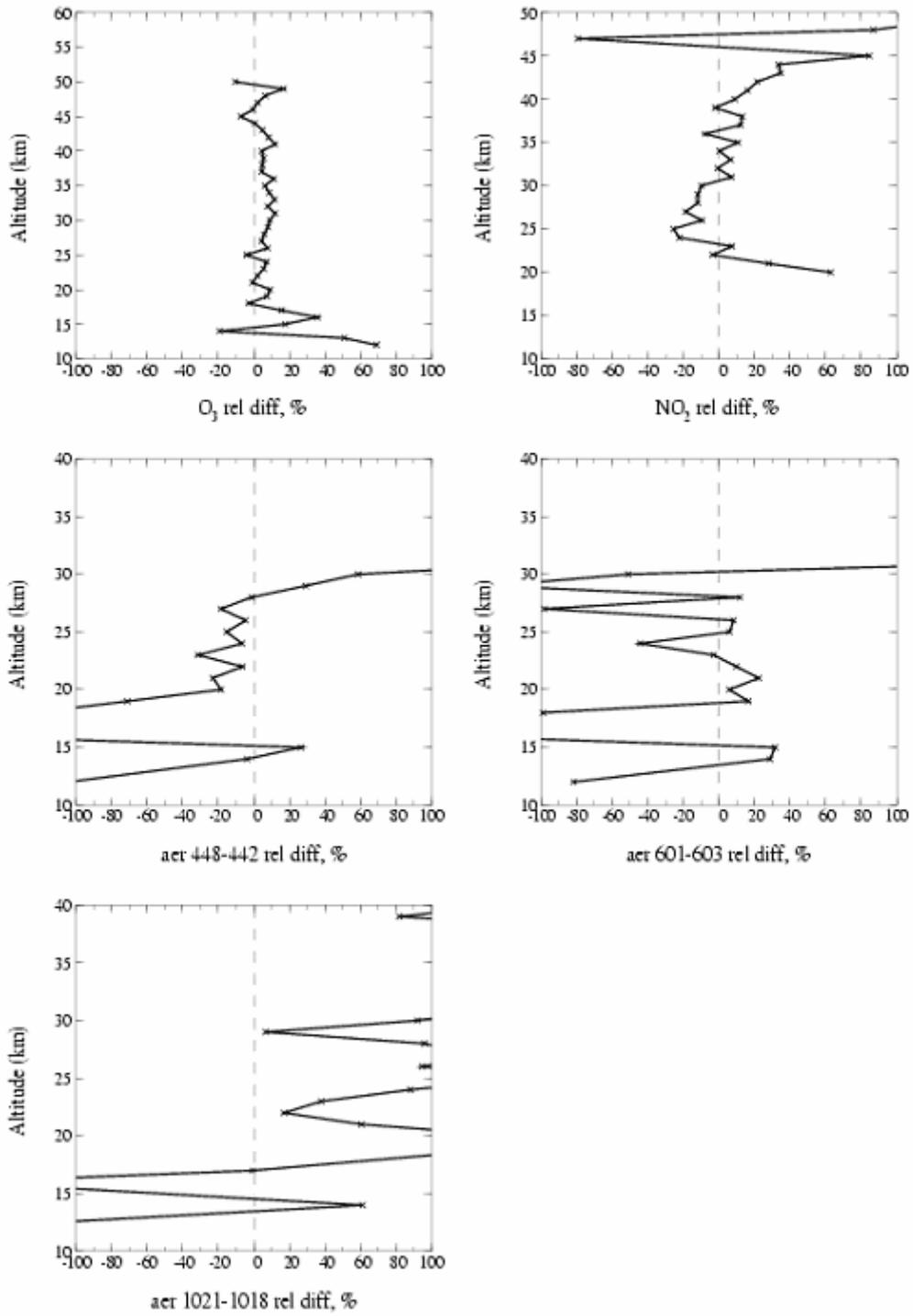


A.1.2 : Différences relatives entre les restitutions des profils de la page précédente



A.1.3 : Identique à A.1.1 mais pour la journée du 11 août 2003 au dessus de l'Alberta

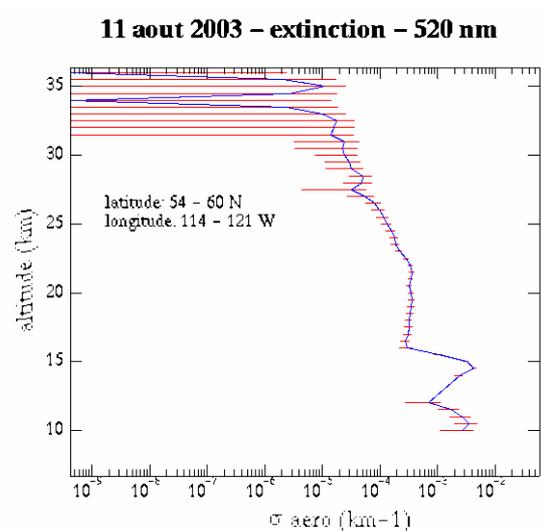
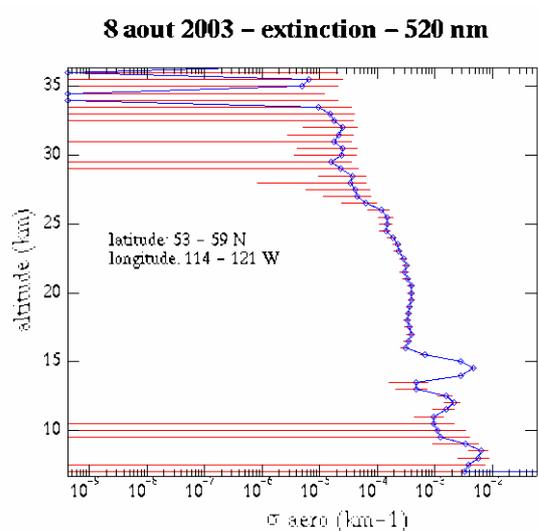
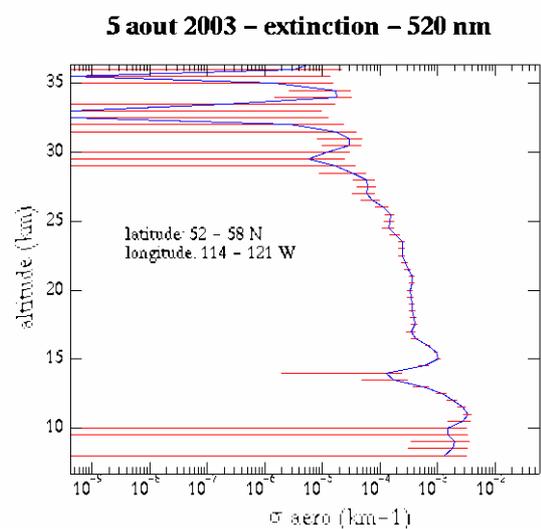
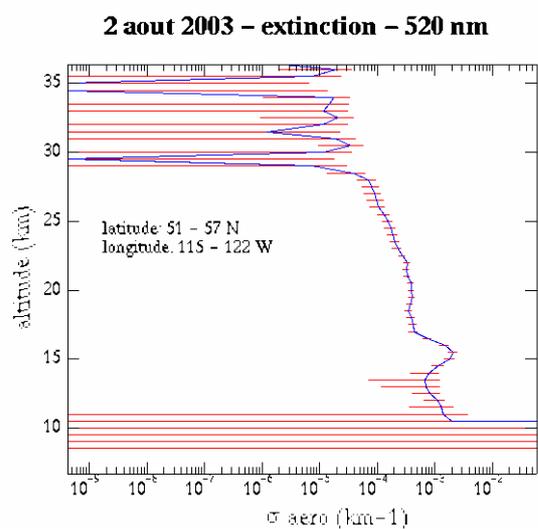
SAGE III 00832120 - POAM III 27904r1



A.1.4 : Différences relatives entre les restitutions des profils de la page précédente

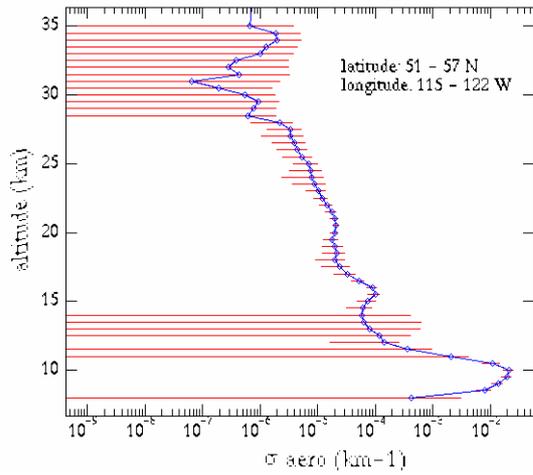
ANNEXE 2

Profils verticaux des coefficients d'extinction des aérosols au dessus de la région d'Alberta (Canada) au mois d'août 2003

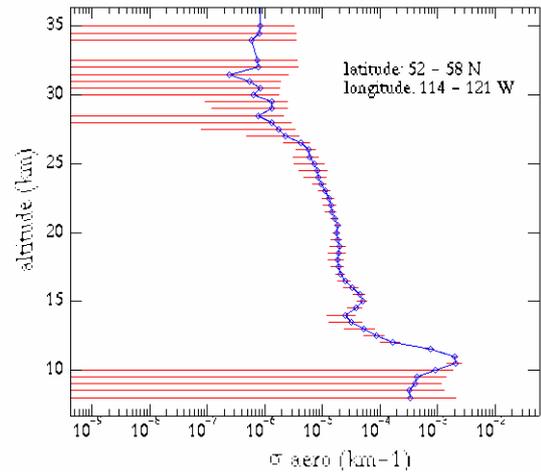


A.2.1 : Profils verticaux d'extinction des aérosols mesurés à 520 nm au-dessus de la région d'Alberta (Canada) pour les journées du 2, du 5, du 8 et du 11 août 2003. Les barres rouges sont les incertitudes.

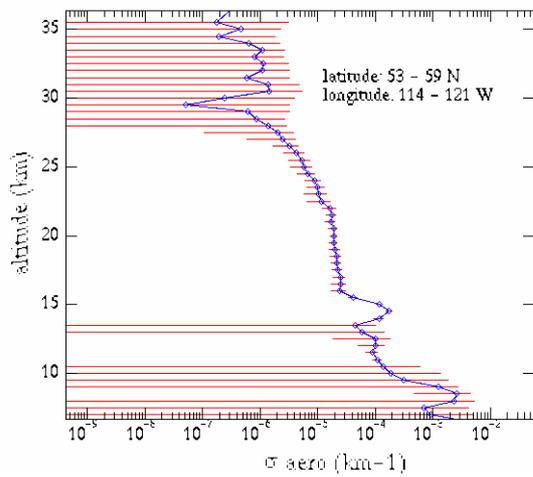
2 aout 2003 – extinction – 1.5 μ m



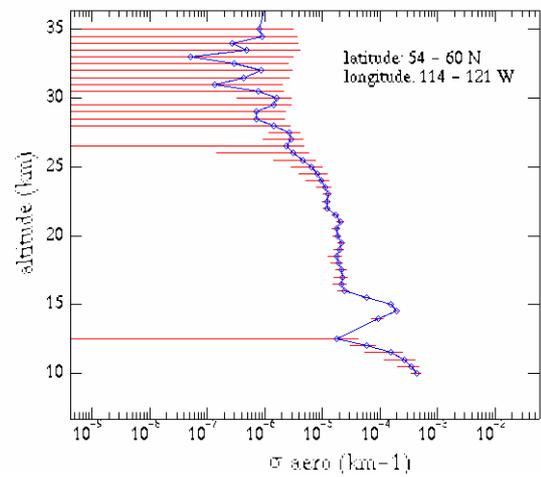
5 aout 2003 – extinction – 1.5 μ m



8 aout 2003 – extinction – 1.5 μ m



11 aout 2003 – extinction – 1.5 μ m



A.2.2 : Identique à A.2.1 mais à 1545 nm.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A. Bazureau, *Préparation de l'inversion des mesures de transmission de l'expérience spatiale SAGE III : mise en place et étude des algorithmes d'inversion. Application aux mesures des expériences ballon AMON et SALOMON*, Ph.D. thesis, Université de Lille 1, 2001.
- A. Bazureau, C. Brogniez, J. Lenoble, *An overview of LOA SAGE III inversion algorithm*, *Geophys. Res. Lett.*, 27, n° 15, p2225-2228, 2000
- A. Bazureau, C. Brogniez, *Inference of nitrogen trioxide and chlorine dioxide profile from simulated SAGE III transmission measurements*, presented in International Symposium on Spectral Sensing Research, Systems and Sensors for the new millennium, Las Vegas, Nevada, 31 octobre – 4 novembre 1999.
- C. Brogniez, A. Bazureau, J. Lenoble, W.P. Chu, *SAGE III measurements: a study on the retrieval of ozone, nitrogen dioxide and aerosol extinction coefficients*, *J. Geophys. Res.*, vol. 107, NO. D24, 4758, 2003.
- C. Brogniez, J. Lenoble, *Size distribution of stratospheric aerosols from SAGE II multiwavelength extinctions*, *Aerosols and Climate*, Hobbs and Mc Cormick (Eds.), A. Deepak Publishing, 1988, pp. 305 – 311.
- P. Chazette, C. David, J. Lefrère, S. Godin, J. Pelon, and G. Mégie, *Comparative lidar study of the optical, geometrical and dynamical properties of stratospheric post-volcanic aerosol, following the eruptions of El Chichón and Mount Pinatubo*, *J. Geophys. Res.*, vol. 100, NO D11, p 23195 – 23207, 1995.
- J.L. Deuzé, cours de transfert radiatif du DEA laser, atomes, molécules et rayonnement atmosphérique. Université de Lille1. 2003
- L. Cazier, *Préparation de l'analyse des mesures aérosols de l'expérience satellitaire future SAGE III. Application aux données SAGE II : établissement d'une climatologie des caractéristiques des aérosols*. Ph.D. thesis, Université de Lille 1, 1998
- O. Dubovik, B. Holben, T.F. Eck, A. Smirnov, Y.J. Kaufman, M.M. King, D. Tanré, I Slutsker, *Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide location*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 59, p 590 – 608. 2002.
- O. Dubovik, M. King, *A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 105, p. 20673 – 20696, 2000
- J. Haywood, P. Francis, O. Dubovik, M. Glew, B. Holben, *Comparison of aerosol size distributions, radiative properties and optical depths determined by aircraft observations and sun photometers during SAFARI 2000*, *J. Geophys. Res.*, vol. 108, NO. D13, 8471, 2003. a
- J. Haywood, S.R. Osborne, P. Francis, A. Keil, P. Formenti, M.O. Andreae, P.H. Kaye, *The mean physical and optical properties of regional haze dominated by biomass burning aerosol measured from the C-130 aircraft during SAFARI 2000*, *J. Geophys. Res.*, vol. 108, NO. D13, 8473, 2003. b

- K. Labitzke and M.P. McCormick, *Stratospheric temperature increases due to Pinatubo aerosols*, Geophys. Res. Lett., vol. 19, NO 2, p207 – 210, 1992.
- K. Labitzke, B. Naujokat, and M. Sato, *Temperature effects on the stratosphere of the april 4, 1982 eruption of El Chichón, Mexico*, Geophys. Res. Lett., vol 10, p 24 – 26, 1983.
- J. Lenoble, C. Brogniez, *A comparative review of radiation aerosol models*, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, vol. 57, No. 1, Février 1984.
- K.F. Palmer, D. Williams, *Optical constants of sulfuric acid; application of the clouds of venus*, Appl. Optics, vol. 14, No. 1, janvier 1975.
- R. Ramanaherisoa, *Analyse des mesures de l'expérience satellitaire POAM II. Algorithme d'inversion et intervalidation avec les mesures de SAGE II*, Ph.D. thesis, Université de Lille 1, 1998.
- P. B. Russel et al. *Global to microscale evolution of the Pinatubo volcanic aerosol derived from diverse measurement and analyses*, J. Geophys. Res., vol. 101, NO. D13, p 18745 – 18763, 1996.
- SAGE III *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): Solar and lunar algorithm*, LaRC version 2.1, 2004.
- SAGE III *Data Products User's Guide, (DPUG)*, LaRC 475-03-060, mars 2004.
- J.H. Seinfeld, S.N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air to climate change*, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- E.P. Shettle and R.W. Fenn, *Models for the aerosols of the low atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties*, AFGL (Air Force Geophysics Laboratory) environmental research papers, NO 676– TR – 79 – 0214, 1979.
- H.M. Steele and R.P. Turco, *Separation of aerosol and gas components in the Halogen Occultation Experiment and the Stratospheric Aerosol and Gas Experiment (SAGE) II extinction measurements: Implications for SAGE II ozone concentrations and trends*, J. Geophys. Res., Vol. 102, NO D16, p19665 – 19681, 1997.
- L.W. Thomason, G. Taha, *SAGE III aerosol extinction measurements: initial results*, Geophys. Res. Lett., vol. 30, NO. 12, 1631, 2003.
- W.C.P. World Climate Programme, *A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation*, WCP – 112 WMO/TD-NO. 24, mars 1986.