

---

# **Application Impacts direct et semi-direct sur les bilans énergétiques en zone sahélienne (AMMA)**

## **6.1 Principe**

---

Les études de fermeture mises en place lors des stratégies expérimentales développées dans les campagnes ESQUIF et LISAIR ont permis de répondre à des problématiques de pollution atmosphérique à l'échelle de la rue ou de la région. Ces études ont participé à l'amélioration de notre compréhension de l'évolution des propriétés physico-chimiques et optiques des aérosols, en particulier de leur indice complexe de réfraction et leur albédo de simple diffusion. Elles doivent également nous aider à mieux comprendre les interactions de ces particules avec les nuages, le rayonnement et le climat. Les modèles actuels tenant compte des aérosols dans le système climatique ne disposent pas en effet d'une connaissance assez précise des propriétés physico-chimiques et optiques des aérosols. Les interactions aérosols – rayonnement, qui sont à l'origine des effets direct et semi-direct, sont gouvernées par les propriétés optiques des aérosols et leur évolution dynamique et physico-chimique. Les processus d'interaction aérosols - nuages, qui conditionnent l'effet indirect, dépendent des propriétés chimiques (composition, fraction soluble, taille) et physiques (optiques) des aérosols, et de leur état de mélange qui modifie ces mêmes propriétés.

Certaines études stipulent que le forçage de l'ensemble des aérosols est significatif et comparable à celui des gaz à effet de serre mais de signe opposé (Penner et al., 1994). Dans l'état actuel des connaissances, ce raisonnement donne une vision simpliste voire inexacte de l'impact climatique des aérosols. En effet, la distribution hétérogène des aérosols sur le globe implique que le forçage de ceux-ci n'équilibre pas aussi simplement celui des gaz à effet de serre (Penner et al., 2001 ; Ramaswamy et al., 2001). De plus, selon le type des aérosols, leurs impacts radiatifs peuvent être positifs ou négatifs contrairement aux gaz à effet de serre qui apportent tous un forçage positif (IPCC, 2007). Leurs propriétés diffèrent avec leur nature et peuvent donner des résultats opposés selon qu'ils diffusent (refroidissement) ou absorbent (réchauffement). C'est pourquoi il est difficile encore aujourd'hui de quantifier avec confiance les impacts radiatifs des aérosols naturels et anthropiques, leurs rétroactions aux échelles régionales et globales sur la dynamique atmosphérique et sur le cycle de l'eau (formation nuageuse et précipitations).

Dans ce chapitre, nous cherchons à approfondir la connaissance des processus des interactions aérosols – rayonnement en particulier lorsque l'on est en présence de structures multicouches de particules possédant des propriétés variables avec l'altitude. Les études présentées au

Chapitre 5 ont démontré qu'il était envisageable de caractériser l'aérosol par ses propriétés optiques et microphysiques résolues en altitude. Nous cherchons à étendre cette méthodologie à l'étude de l'impact radiatif direct des particules observées durant la campagne AMMA et de ses rétroactions potentielles. Cette campagne, réalisée en Afrique et décrite dans la suite, permet de mettre en évidence diverses couches chargées en particules qui possèdent des sources d'émission, des caractéristiques de transport et de dépôt, des distributions verticales, des états de mélange et de vieillissement très différentes. Afin de pouvoir profiter de toutes les spécificités des différents types de mesures et d'optimiser au maximum les informations résultantes, la stratégie de synergie expérimentale a été privilégiée pendant la campagne AMMA.

## 6.2 La campagne AMMA

---

### 6.2.1 Le cadre général de la campagne AMMA

Le projet AMMA (Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine) est un projet international dont l'objectif est d'améliorer notre connaissance et notre compréhension de la mousson de l'Afrique de l'Ouest (MAO), ainsi que d'étudier sa variabilité de l'échelle journalière à l'échelle interannuelle et, au-delà, aux échelles décennales. Il s'agit de travailler depuis l'échelle des processus élémentaires contrôlant la mousson jusqu'aux échelles auxquelles la MOA influence, au-delà de l'Afrique de l'Ouest, la dynamique et la composition de l'atmosphère (Redelsperger et al., 2006). L'objectif sociétal consiste à produire les connaissances nécessaires pour relier la variabilité du climat aux problèmes de santé, de ressources en eau et de sécurité alimentaire de l'Afrique de l'Ouest, et à définir des stratégies de surveillance appropriées. La mousson africaine a des impacts sur le climat de l'ensemble du système Terre. La circulation atmosphérique planétaire est affectée par l'énergie de chaleur latente libérée par la convection profonde au-dessus de l'Afrique (Redelsperger et al., 2006). Le lien entre mousson africaine et climat planétaire vaut aussi pour la chimie atmosphérique.

### 6.2.2 Importance des aérosols en Afrique de l'Ouest

L'Afrique représente une source importante d'émissions naturelles et anthropiques de composés gazeux et particulaires. L'Afrique est en effet la source principale d'aérosols atmosphériques dans le monde. Le Sahara en Afrique de l'Ouest est le plus vaste désert et se comporte comme la source la plus importante de particules minérales au monde. Les conditions météorologiques à grande échelle impliquent que la plupart des événements intenses de poussières désertiques en région saharienne et sahélienne sont fréquemment générés au printemps (Marticorena et al., 1997). La production de poussières désertiques est cependant significative tout au long de l'année Fig. 6.1.

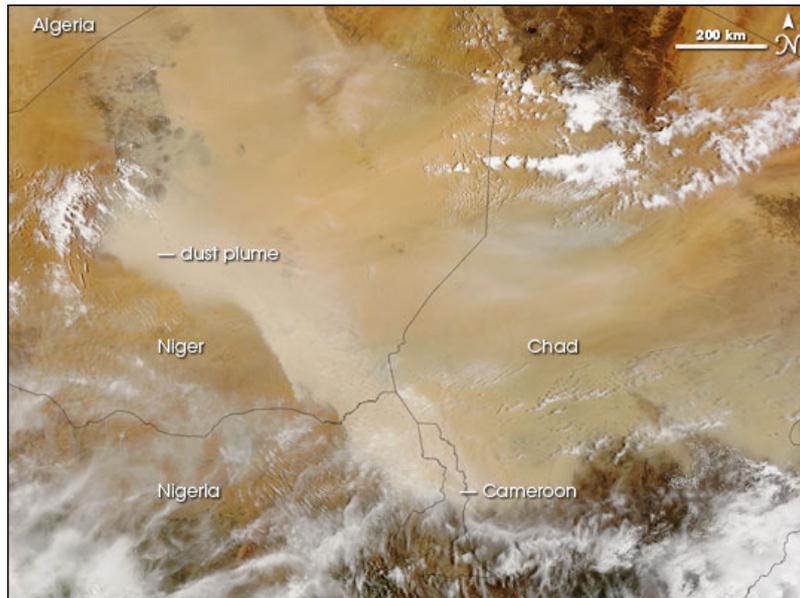


Fig. 6.1 : Image réalisée par l'instrument MODIS sur TERRA le 10 mai 2006 permettant l'identification d'un panache de poussières désertiques du Sahara se déplaçant vers l'Ouest à travers le Niger, le Nigeria, le Cameroun et le Tchad.

De plus, le brûlis de résidus agricoles en région sahélienne pendant la saison sèche signifie que l'Afrique de l'Ouest est une source importante d'aérosols de fumée de feux de biomasse. Les fluctuations des émissions d'aérosols de feux de biomasse pendant l'écobuage des terres en Afrique suivent un cycle saisonnier bien déterminé en raison des précipitations associées aux variations saisonnières de la zone de convergence intertropicale (ITCZ), comme indiqué par Swap et al. (2002). Par conséquent, le maximum d'émissions d'aérosols anthropiques provenant de la combustion de biomasse des régions sub-sahéliennes dans le Nord de l'Afrique est observé durant les mois de décembre à février. En revanche, très peu de brûlis de biomasse ne sont pratiqués entre août et novembre. Une carte de l'activité des feux détectés par MODIS en 2006 au-dessus du continent africain est représentée sur la Fig. 6.2.

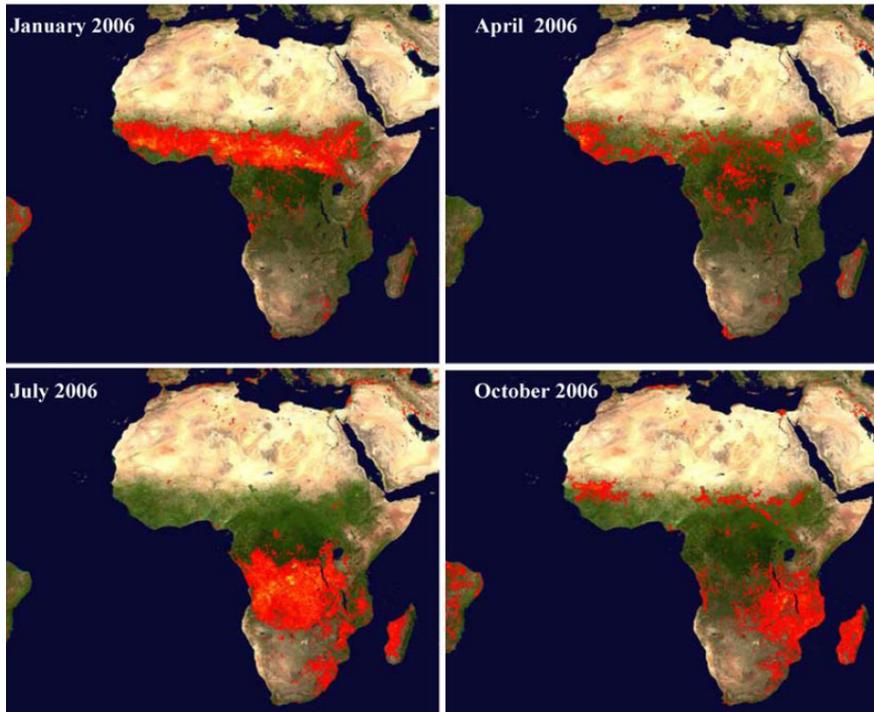


Fig. 6.2 : Détection des feux par MODIS représentant la saisonnalité des épisodes de combustion de biomasse au-dessus du continent africain en 2006. Les quatre images présentent dans chacun des cas des moyennes sur dix jours effectuées en milieu du mois correspondant. D'après Haywood et al. (2008).

Les poussières minérales sont émises à partir de l'Afrique du Nord toute l'année : l'interaction entre les particules d'origine désertique et celles issues des feux de biomasse est donc maximale entre les mois de décembre et de février (Fig. 6.3).

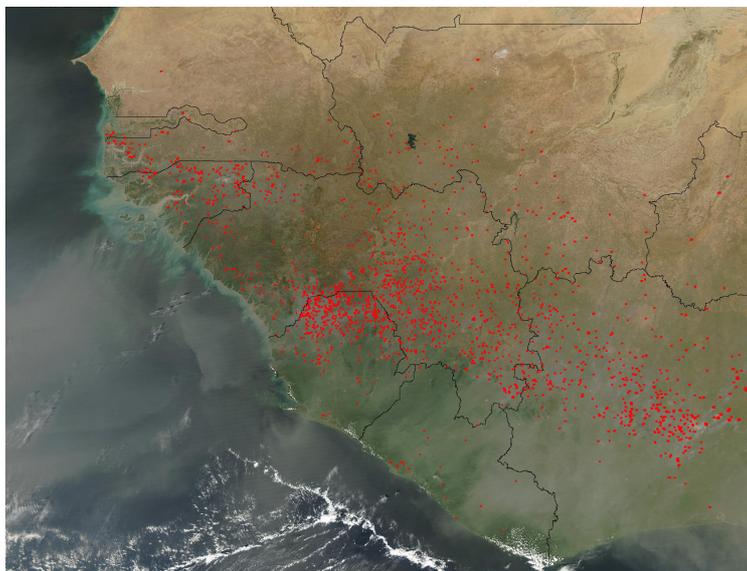


Fig. 6.3 : Image réalisée par l'instrument MODIS sur AQUA le 28 janvier 2003 mettant en évidence la détection simultanée de feux et d'épisodes de poussières désertiques sur l'Afrique de l'Ouest pendant la saison sèche.

Les aérosols provenant de la combustion de biomasse ont une influence significative sur le budget radiatif du système Terre-Atmosphère en diffusant et en absorbant le rayonnement

solaire (Haywood and Boucher, 2001 ; Haywood et al., 2003c ; Myhre et al., 2003a). Les émissions anthropiques en constituent la source majeure. De même, les poussières minérales ont une influence importante sur le budget radiatif solaire et tellurique (Tanre et al., 2003 ; Haywood et al., 2003b ; Highwood et al., 2003b ; Myhre et al., 2003b) ; les émissions naturelles en sont la principale source. Qu'elles soient produites par l'érosion éolienne ou les feux de biomasse, ces particules ont donc un impact important sur le forçage radiatif, du domaine UV à l'IR, et sur la microphysique des nuages. Elles constituent ainsi une composante importante du système de mousson africain qui doit être étudiée en vue d'une meilleure compréhension de l'évaluation du climat.

### 6.2.3 Les périodes d'observations spéciales (SOP) durant AMMA

Dans le but de conduire les études d'impacts et les applications socio-économiques initiées dans le cadre d'AMMA, il est nécessaire de documenter de manière géophysique la MAO à différentes échelles spatio-temporelles. Cela conduit à définir une stratégie de campagne reposant sur l'imbrication des domaines et des périodes d'observations, et sur l'utilisation des différentes plateformes instrumentées complémentaires (bateaux, sites au sol, ballons, moyens aéroportés, capteurs spatiaux). Le cœur du dispositif expérimental AMMA est constitué par les SOP de 2006. Elles ont pour objectif principal l'acquisition de jeux de données permettant d'étudier de façon détaillée une saison de mousson en termes de processus, et plus particulièrement les systèmes météorologiques lors des différentes phases de la mousson :

- La saison sèche précédant la mousson (janvier-février),
- L'établissement de la mousson (juin),
- La mousson au stade mature (juillet-août),
- La fin de la mousson (septembre).

Au sein de ces différentes phases, des moyens aéroportés et au sol sont déployés de façon coordonnée et selon une stratégie d'intégration des échelles et des disciplines incluant les données spatiales et la modélisation numérique.

### 6.2.4 La SOP-0

Des campagnes de mesure internationales ont permis par le passé d'étudier les propriétés physiques et radiatives des aérosols issus de la combustion de biomasse ou d'origine minérale. La composante issue de la combustion de biomasse sur le continent africain a ainsi été étudiée en détail lors de la campagne SAFARI (Southern AFricAn Regional science Initiative) en 2000 (Haywood et al., 2003c). De manière similaire, la composante minérale émise en Afrique a été étudiée en détail pendant la campagne SHADE (SaHArAn Dust Experiment) en 2000 (Haywood et al., 2003b) au large de la côte Ouest du Sahara. Ces campagnes ont été consacrées à l'étude de l'aérosol provenant des feux de biomasse ou d'origine minérale, séparément et dans des régions différentes du continent africain.

Bien que les régions sources de particules de feux de biomasse et de poussières désertiques puissent être identifiées par des mesures radiométriques satellitaires, une des difficultés majeures consiste à déterminer précisément les processus de transport, de modification et d'interaction agissant sur ces particules en Afrique de l'Ouest. La description de ces processus est nécessaire pour une meilleure évaluation de l'impact radiatif de l'aérosol à l'échelle régionale. Jusqu'à présent, aucune campagne internationale n'a été spécifiquement dédiée à

## 6. Application au transfert radiatif

l'étude des rôles des poussières minérales et des aérosols de combustion de biomasse en Afrique de l'Ouest, et leur influence sur le bilan radiatif du système Terre-Atmosphère. Un des objectifs de la SOP-0 est d'étudier les poussières désertiques et les particules de feux de biomasse au sein d'une région et à une saison où ils peuvent coexister et interagir au niveau microphysique. La saison sèche précédant la mousson présente les meilleures opportunités pour étudier des mélanges de poussières sahariennes et des aérosols provenant des feux de biomasse. La SOP-0 réalisée en janvier et février 2006 a un intérêt tout particulier pour les mesures d'aérosols et de rayonnement. Elle a impliqué plusieurs sites instrumentés au sol en Afrique de l'Ouest (M'Bour (14°25' N, 16°58' O) au Sénégal, Banizoumbou (13°31' N, 2°34' E) et Niamey (13°30' N, 2°10' E) au Niger, Djougou (9.70° N, 1.68° O) au Bénin). Ils ont été complétés par des mesures aéroportées réalisées à bord de l'avion BAe-146 FAMM (Facility for Airborne Atmospheric Measurements), d'un ULM (Fig. 6.4) et d'efforts de modélisation dédiés à cette étude.

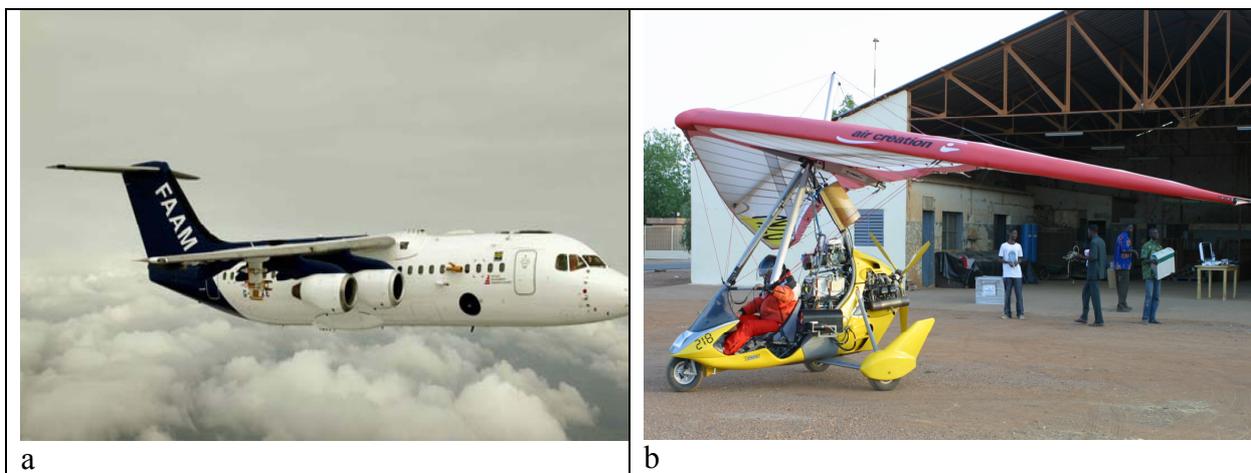


Fig. 6.4 : Moyens aéroportés déployés au-dessus de la région de Niamey en janvier et février 2006 lors de la SOP-0 d'AMMA : (a) : Avion de recherche du MetOffice anglais FAMM, (b) : ULM Tanarg français.

Les observations effectuées ont permis de constituer un jeu complet de mesures physico-chimiques et optiques, incluant un ensemble d'analyses chimiques et minéralogiques, les distributions en taille, les coefficients de diffusion et d'absorption en fonction de la longueur d'onde, les profils verticaux d'aérosols, le contenu en particules et leurs propriétés intégrés sur la colonne, ainsi que les flux radiatifs spectraux et à bande spectrale large. L'ensemble de ces mesures est utilisé afin d'estimer le forçage radiatif lié à l'effet direct des aérosols, de l'échelle locale à l'échelle régionale. Ce travail permet de mieux représenter la distribution des aérosols et leur impact radiatif dans les modèles atmosphériques, de différentes échelles. Ces données doivent également permettre d'améliorer ou de valider les produits aérosols déduits des observations spatiales.

L'objectif de la SOP-0 est donc de documenter précisément les propriétés optiques et physico-chimiques de ces deux types d'aérosols, notamment pour des situations de présence simultanée de ces particules de nature différente. Il s'agit :

- a) D'effectuer des observations in situ et de télédétection de qualité sur les propriétés optiques et microphysiques des aérosols issus de feux de biomasse et des aérosols d'origine naturelle soulevés suite à l'érosion éolienne des régions arides et semi-arides ;

- b) De déterminer l'interaction et le mélange éventuel entre ces deux types de particules en utilisant un couplage entre les mesures chimiques, structurales et optiques ;
- c) De fournir des données spectrales des effets radiatifs de ces aérosols ;
- d) De déterminer l'accord entre mesures in situ, mesures satellitaires et mesures de télédétection depuis la surface pour l'évaluation du forçage radiatif additionnel associé aux deux types d'aérosols.

### 6.3 Situations rencontrées

Les poussières désertiques sont transportées depuis des sources situées dans le désert du Sahara au Nord et à l'Est vers le Sahel par un flux d'Est ou Nord-Est à des altitudes faibles (inférieures à 2 km). Cet air froid et stable force l'air plus chaud chargé en provenance du Sud ou Sud-Est à s'élever au-dessus de la couche d'air chargée en poussières minérales (Fig. 6.5). Les masses d'air en provenance du Sud apparaissent comme plus humides mais également chargées en aérosols issus de feux de biomasse.

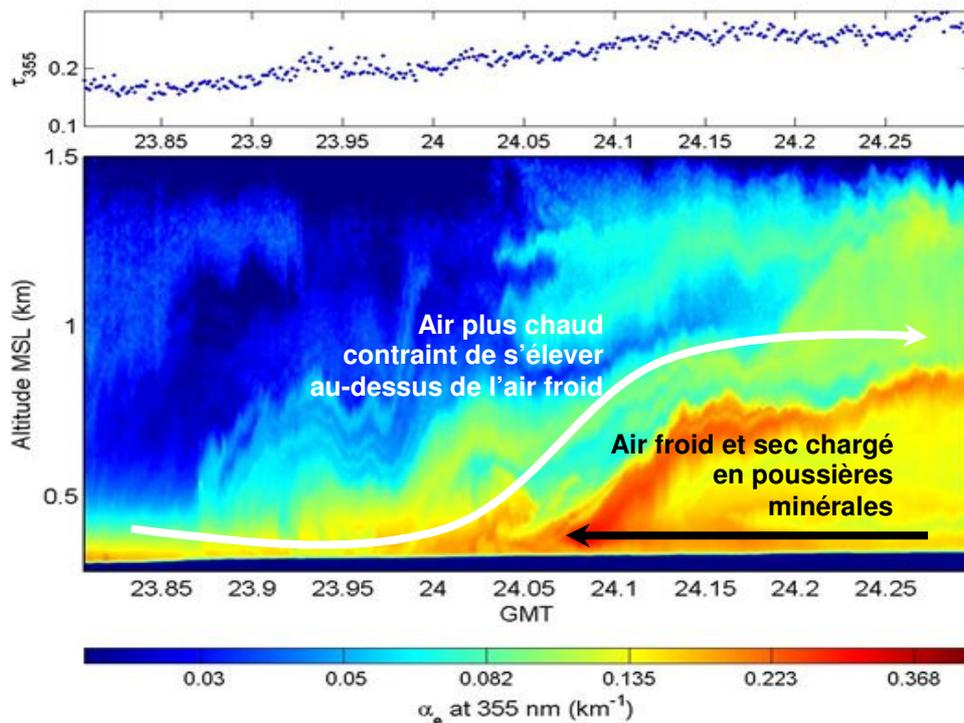


Fig. 6.5 : Profil de coefficient d'extinction à 355 nm mesuré par le LAUVA mettant en évidence la progression d'un front de poussières désertiques traversant Niamey dans la nuit du 23 au 24 janvier 2006. Le lidar est situé à l'aéroport de Niamey. L'axe des abscisses est exprimé en heures UTC décimales. Dans le cadran supérieur est figurée l'évolution temporelle de l'épaisseur optique totale en particules à 355 nm.

La masse d'air chargée en aérosols de feux de biomasse est advectée lentement vers le Nord et l'Ouest par un flux à des altitudes moyennes comprises entre 2 et 5 km. Cette couche peut être aisément détectée à plusieurs centaines de kilomètres au Nord des zones de feux actifs, en particulier à Niamey, ainsi qu'au Sud des zones de feux au-dessus du Golfe de Guinée. L'instabilité atmosphérique dans cette région s'avère être le facteur majeur dans le

soulèvement des couches d'aérosols issus de feux de biomasse au-dessus des couches de poussières désertiques. A l'inverse, la flottabilité dans les panaches de feux eux-mêmes (pyroconvection) a probablement peu d'effet.

Dans tous les cas traités, on observe une couche de poussières désertiques localisée dans les deux premiers kilomètres au-dessus de laquelle on peut rencontrer plusieurs couches superposées chargées en aérosols de feux de biomasse jusqu'à 6 km d'altitude (Fig. 6.6).

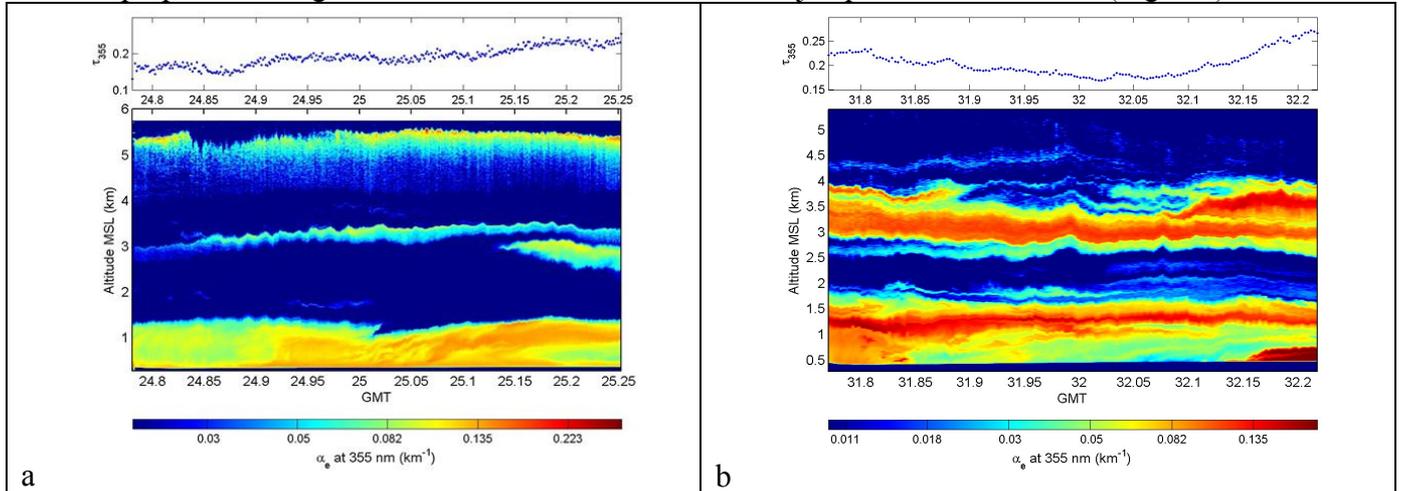


Fig. 6.6 : Profils de coefficient d'extinction à 355 nm mesuré par le LAUVA au-dessus de Niamey dans la nuit du 24 au 25 janvier (a) et dans la nuit du 31 janvier au 1<sup>er</sup> février (b). Le lidar est situé sur l'aéroport de Niamey. L'axe des abscisses est exprimé en heures UTC décimales. Dans le cadran supérieur de (a) et (b) est figurée l'évolution temporelle de l'épaisseur optique totale en particules à 355 nm.

## 6.4 Méthodologie envisagée

Comme précisé dans le paragraphe précédent, la SOP-0 d'AMMA, qui se déroule sur une zone et à une époque propices à l'étude des aérosols, s'est dotée de moyens expérimentaux performants afin de permettre la quantification du forçage radiatif direct des structures multicouches d'aérosols désertiques et issus des feux de biomasse. Les interactions du rayonnement avec ces particules sont complexes car elles dépendent principalement des propriétés de diffusion et d'absorption de ces couches, de leurs distributions en taille et de leurs positions respectives dans la colonne d'air. L'épaisseur optique totale peut atteindre des valeurs importantes à l'intérieur des panaches (0.6 à 355 nm). Ces fortes valeurs d'épaisseur optique, qui sont associées à des fortes concentrations d'aérosols, suggèrent que ces particules ont probablement des effets radiatifs significatifs sur la zone sahélienne. Cette section présente succinctement la méthode d'estimation du forçage radiatif des aérosols à partir des propriétés des aérosols restituées par une synergie instrumentale dans l'Article de Raut and Chazette (2008b). Le code de transfert radiatif TUV (Madronich and Flocke, 1998) qui fonctionne sur le principe des ordonnées discrètes pour les calculs de diffusion multiple et d'interactions avec l'absorption (Sect. 2.5.4.3) a été modifié de manière à pouvoir utiliser en arguments d'entrée l'ensemble des résultats de la méthode de couplage expérimental. Le code adapté fonctionne à une résolution verticale de 100 m, une résolution temporelle d'1 h et une résolution spectrale de 2.5 nm.

Les études des Chapitres 4 et 5 ont montré qu'il était important de considérer les conditions dans lesquelles se trouvaient les aérosols, s'ils étaient en mélange interne ou externe et si l'humidité relative était importante. Il est toutefois nécessaire, dans un premier temps, de caractériser davantage ces aérosols avant de pouvoir traiter leurs influences sur le rayonnement. L'évaluation du forçage radiatif direct en surface et au sommet de l'atmosphère induit par les aérosols requiert plusieurs paramètres, qu'il est nécessaire de déterminer le plus précisément possible. Dans ce Chapitre, on associe aux résultats précédents de nouvelles contraintes sur les propriétés optiques des aérosols de feux de biomasse et de poussières désertiques. Celles-ci permettent une estimation plus précise de l'indice de réfraction dans les différentes couches et de l'albédo de simple diffusion des aérosols requis pour le calcul de l'échauffement atmosphérique induit par les différentes masses d'air. La méthodologie pour évaluer ces paramètres et en déduire le forçage de l'aérosol est décrite sur la Fig. 6.7.

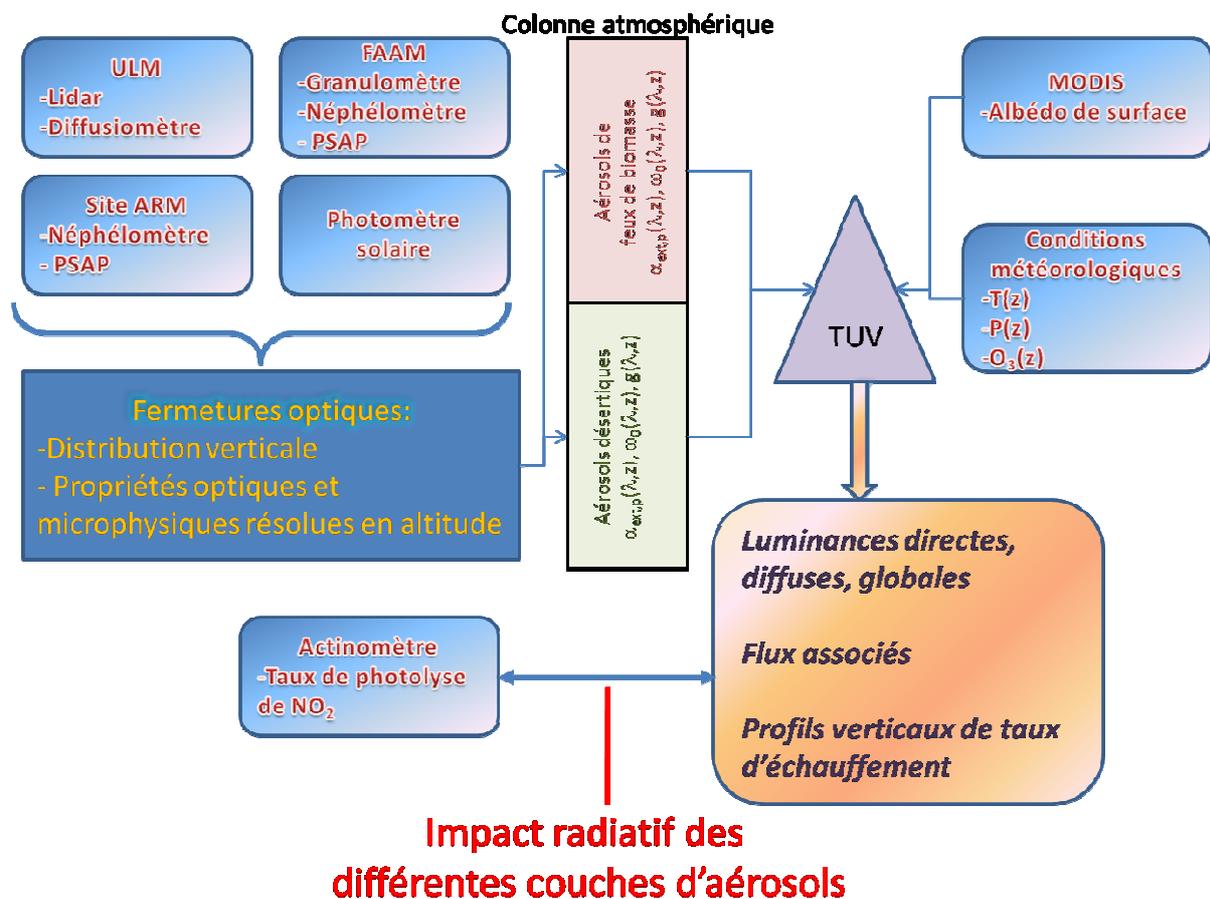


Fig. 6.7 : Schéma de la méthode d'estimation des forçages radiatifs directs des couches d'aérosols

Afin de déterminer les différentes propriétés des couches d'aérosols, la méthodologie utilisant une synergie entre l'optique et la distribution en taille des aérosols a été appliquée, en combinant mesures in situ en surface, mesures in situ aéroportées, observations aéroportées de télédétection active, et mesures radiométriques. Cette approche fournit pour chaque couche un indice de réfraction constant dans le domaine UV-Visible (Volz, 1973). À partir d'un modèle de Mie, sont calculées les propriétés optiques spectrales des aérosols nécessaires au code TUV modifié. Il s'agit de l'albédo de diffusion simple  $\omega_0(z, \lambda)$  principalement pour l'absorption du rayonnement par les particules et du facteur d'asymétrie  $g(z, \lambda)$  essentiellement pour la diffusion due aux aérosols. Le coefficient d'Angström permet d'étendre spectralement

les coefficients d'extinction des particules à tout le domaine spectral considéré dans l'étude. En plus de ces propriétés optiques, il faut aussi connaître la valeur de l'albédo de surface, notamment pour l'estimation du forçage radiatif direct exercé au TOA. Le code TUV prend enfin en compte la faible absorption par les gaz dans le domaine UV-visible ( $O_2$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ...) et la diffusion par les molécules de type Rayleigh. Cette dernière nécessite des informations météorologiques. L'entrée du code TUV utilise par conséquent :

- les profils verticaux de vapeur d'eau, d'ozone, de pression, de température issus des mesures faites à bord de l'avion de recherche FAAM du MetOffice ou de l'ULM, complétés par l'extrapolation des données climatologiques pour les hautes couches atmosphériques (au-dessus de 5 km) ;
- les propriétés optiques  $\alpha_{ext,p}$ ,  $g$ ,  $\omega_0$  des aérosols estimées en faisant tourner un code de Mie à partir des indices de réfraction et des distributions en taille pour tout le spectre solaire et dont la répartition verticale est définie, en partie, grâce aux mesures des profils verticaux du lidar ;
- l'albédo de surface terrestre estimé à partir du capteur MODIS sur tout le spectre solaire pour tous les angles zénithaux solaires possibles.

En sortie, le code TUV calcule les luminances, les flux et les taux d'échauffement radiatif à tous les niveaux de l'atmosphère définis par la grille du code de transfert radiatif (résolution de 100 en dessous de 5 km d'altitude). Les conventions utilisées pour l'étude du forçage radiatif à la surface, au TOA et dans toute la couche atmosphérique sont les mêmes que celles généralement utilisées dans la littérature et décrites à la Sect. 2.5.5. Les valeurs du taux de photolyse du dioxyde d'azote calculées par le modèle de transfert radiatif TUV sont ensuite comparées à celles mesurées par un actinomètre localisé au niveau du sol. Le code de transfert radiatif étant lui-même contraint par des observations, cela permet d'en déduire le jeu de données conduisant à la synergie expérimentale la plus précise.

L'Article de Raut and Chazette (2008b) présente en détail l'approche décrite ci-dessus. La première partie a été consacrée à la méthodologie qui a permis, par divers jeux de données, l'estimation de l'ACRI dans chacune de couches de poussières minérales ou d'aérosols de feux de biomasse. Elle comprend la description du modèle de transfert radiatif TUV ainsi que la description des différents paramètres de l'aérosol nécessaires à l'entrée du modèle. Les résultats du modèle sont ensuite décrits et différentes études de sensibilité sont menées. L'influence des indices et du profil vertical des propriétés optiques de l'aérosol est enfin étudiée.