



HAL
open science

Caractérisation de panaches industriels par imagerie hyperspectrale

Adrien Deschamps

► **To cite this version:**

Adrien Deschamps. Caractérisation de panaches industriels par imagerie hyperspectrale. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2012. Français. NNT : . tel-00816224

HAL Id: tel-00816224

<https://theses.hal.science/tel-00816224>

Submitted on 20 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

SPÉCIALITÉ : SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

présentée et soutenue le 19 décembre 2012 par
M. Adrien DESCHAMPS

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Pierre et Marie Curie

**Caractérisation de Panaches Industriels
par Imagerie Hyperspectrale**

Laboratoire Télédétection, Surveillance, Environnement
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

et

Département d'Optique Théorique et Appliquée
ONERA, the French Aerospace Lab

JURY

M. François RAVETTA
M. Jean-Louis BRENGUIER
M. Christiaan PERNEEL
M. Xavier BRIOTTET
M. Rodolphe MARION
M. Gilles BERGAMETTI
M. Pascal FLAMENT
M. Pierre-Yves FOUCHER

Président
Rapporteur
Rapporteur
Directeur de thèse
Co-encadrant
Examinateur
Examinateur
Invité

Remerciements

A propos des mémoires de thèse, un collègue m'a dit que les remerciements étaient très probablement les lignes qui étaient lues par le plus grand nombre de lecteurs (et je me demande s'il n'a pas ajouté que c'étaient les seules lignes que tout le monde lisait). Ma courte expérience en tant que lecteur de thèses lui donne plutôt raison. Je vais donc m'appliquer pour écrire ce qui suit.

Un énorme merci, pour commencer, à Rodolphe Marion qui m'a donné le goût de l'imagerie hyperspectrale, qui a fini de me convaincre de faire une thèse, et qui m'a co-encadré durant ce doctorat. C'est en grande partie grâce à toi que je suis parvenu à mener ces travaux sans être rongé par le doute. Merci pour ta patience, ta pédagogie, ta disponibilité et ton soutien. Cela a été un plaisir de travailler avec toi.

Un très grand merci également à Xavier Briottet, qui a dirigé ces travaux de recherche. Bien qu'étant loin géographiquement, tu as toujours trouvé le moyen de répondre à mes nombreuses questions et de m'aider lorsque j'en avais besoin. Toi aussi, merci pour ta disponibilité, la grande attention que tu as portée à mes travaux, et la confiance croissante que tu m'as témoignée. Tu m'as beaucoup appris et apporté.

Merci à Pierre-Yves Foucher, qui a également participé à l'encadrement de ma thèse en suivant, de près, mes travaux depuis leurs débuts et qui n'a jamais été avare de conseils avisés.

Je souhaite aussi remercier Jean-Louis Brenguier et Christiaan Perneel, qui ont accepté la tâche difficile de rapporter cette thèse dans des délais particulièrement courts, malgré leurs agendas chargés et François Ravetta pour avoir bien voulu présider ce jury. Merci à Gilles Bergametti et Pascal Flament qui ont accepté aujourd'hui d'être examinateurs.

Je profite également de ces lignes pour remercier Jocelyn Chanussot, qui a été l'un de mes professeurs à Grenoble et grâce à qui je me suis orienté vers le traitement d'images et la télédétection. Je le remercie également, tout comme Marc Mallet et Cyril Crévoisier, d'avoir accepté de participer à mon comité de thèse et suivi ainsi mes travaux tout au long de ces trois années. Merci, en passant, à Véronique Carrère, grâce à qui je me suis senti moins seul dans certaines conférences.

Bien sûr, j'adresse de sincères remerciements à mes collègues du Laboratoire TSE du CEA, qui m'ont chaleureusement accueilli lorsque je suis arrivé parmi eux, comme jeune stagiaire, et qui m'ont supporté ensuite pendant trois ans et demi. Merci également à nos voisins de couloir de RSG, qui partageaient, jusqu'à présent, nos déjeuners et pauses café avec bonne humeur. L'ambiance que vous avez tous contribué à faire régner m'a permis de venir, chaque jour (ou presque), travailler avec enthousiasme.

Une pensée particulière pour les quelques-uns qui ont partagé mon bureau. Dans l'ordre chronologique, Pierre qui m'a de nombreuses fois dépanné lorsque mon ordinateur et moi ne nous comprenions plus, Fanny, qui m'a légué un beau papyrus (qui, malheureusement, s'en est allé), et Cyrielle avec qui j'ai pu partager le pire comme le meilleur de l'existence d'un thésard. Courage Cyrielle, une petite année encore et c'est à toi.

Et, bien évidemment, je remercie tous ceux qui, dans mon entourage, m'ont apporté soutien, réconfort, joie et bonne humeur, et sans qui, indiscutablement, je n'aurais pas pu accomplir ce travail dans d'aussi bonnes dispositions. Merci donc à mes partenaires de mes entraînements d'escrime, avec qui j'ai pu me défouler deux fois par semaine et refaire les matchs autour d'une bière.

Un énorme merci à tous mes amis qui, j'en suis sûr, scruteront ces lignes pour voir si leurs noms apparaissent. C'est avec un énorme plaisir que je vous cite : Gaïane (tu es à l'autre bout du monde en ce moment, mais je pense toujours autant à toi), Manue, Sonia, Mohammed, Marguerite, Morgane, Sacha et tous les autres. Vous avez toujours su être là pour moi depuis de nombreuses années maintenant. Je suis persuadé que beaucoup m'envieraient, s'ils la connaissaient, mon extraordinaire bande d'amis, mais je vais tâcher de la garder jalousement.

Enfin, bien que cela soit honteusement classique, comment ne pas remercier mes parents. Papa, Maman, vous m'avez apporté bien trop pour que quelques lignes puissent suffire à exprimer ma gratitude. Je vous dirai donc juste que, grâce à votre aide et votre soutien, je suis finalement parvenu à finir cette thèse. Je suis donc heureux et fier, aujourd'hui, de pouvoir présenter ces travaux.

Résumé

Les capteurs hyperspectraux, qui acquièrent des images dans le domaine réflectif ($[0,4-2,5\mu\text{m}]$), avec une haute résolution spatiale (quelques mètres) et dans de nombreuses bandes spectrales simultanément, permettent d'estimer à la fois les propriétés des aérosols atmosphériques et de certains gaz. Les travaux présentés ici portent sur la caractérisation de panaches industriels.

Les particules émises par les industries ont des propriétés encore très mal connues et les bases de données actuelles ne contiennent pas les informations nécessaires à la compréhension et la modélisation de leur impact radiatif. La première partie de cette étude consiste donc à caractériser les propriétés physiques et optiques de ces aérosols, à partir d'échantillons prélevés, et a conduit à l'établissement d'un modèle permettant de décrire l'impact radiatif d'un panache émis par une industrie métallurgique.

Dans une seconde partie, une méthode d'estimation conjointe du CO_2 et des aérosols est proposée. Il a été montré, à partir d'une étude de sensibilité et de l'application de cette méthode sur deux images AVIRIS, que cette estimation conjointe, dans le cas des panaches optiquement denses, conduisait à une erreur d'estimation du CO_2 divisée d'un facteur 2 par rapport aux techniques existantes (*e.g.* JRGE).

Enfin, une méthode d'estimation du type d'aérosols, EARTH (*Estimation of Aerosol Type using Hyperspectral data*), spécifiquement adaptée aux panaches industriels, a été développée. Une validation sur données simulées et réelles (image CASI) a montré qu'elle permettait de reconnaître, sans information *a priori*, la présence de particules métalliques dans un panache de faible épaisseur optique.

Mots clés : imagerie hyperspectrale ; aérosols ; gaz ; émissions industrielles ; suivi de pollution.

Abstract

Industrial plume characterization using hyperspectral imagery

Hyperspectral sensors acquire images in the reflective domain([0.4-2.5 μm]), with a high spatial resolution (several meters), in numerous spectral bands simultaneously. These images enable the estimation of both atmospheric aerosols and gases. The present work aims at characterizing industrial plumes.

The particles emitted by factories have widely unknown properties and the current databases do not include the information needed to understand and model their radiative impact. So, the goal of the first part of this study is to characterize the physical and optical properties of such aerosols, from samples *in situ* collected. It has led to the establishment of a model, enabling the description of the radiative impact of a plume emitted by a metallurgical plant.

In a second part, a method to jointly estimate CO₂ and aerosols in a plume is proposed. A sensitivity analysis and the application of this method to two AVIRIS images have shown that, for optically thick plumes, this joint estimation leads to an error, in the CO₂ estimation, divided by a factor of two, compared with existing techniques (*e.g.* JRGE).

Finally, a method to estimate the aerosol type, EARTH (*Estimation of Aerosol Type using Hyperspectral data*), has been developed, specifically designed for industrial plumes. Its application to simulated and real data (CASI image) has shown that it enables to identify, without any *a priori* information, the presence of metallic particles in an optically thin plume.

Keywords : hyperspectral imagery ; aerosol ; gas ; industrial emissions ; pollution monitoring.

Table des matières

1	Introduction	15
2	Physique et télédétection d'un panache	19
2.1	Introduction	19
2.2	Physique des aérosols	19
2.2.1	Généralités	19
2.2.2	Propriétés microphysiques	20
2.2.3	Propriétés optiques	21
2.2.4	La théorie de Mie et les lois de mélange	22
2.2.5	Les aérosols industriels	23
2.3	Physique des gaz	24
2.3.1	Propriétés optiques	24
2.3.2	Les gaz industriels	25
2.4	Transfert radiatif dans l'atmosphère	27
2.4.1	Principes physiques	27
2.4.2	Équation du transfert radiatif dans le domaine réflectif	27
2.4.3	Phénomènes de couplage	29
2.4.4	Outils de simulation développés	29
2.5	Télédétection des panaches	31
2.5.1	Estimation des gaz à partir de données satellites	32
2.5.2	Estimation des gaz à partir de données terrain ou aéroportées	33
2.5.3	État de l'art des méthodes d'estimation des aérosols	34
2.5.4	Démarche adoptée	35
2.6	Conclusion	36
3	Propriétés radiatives d'aérosols émis par une industrie métallurgique	37
3.1	Introduction	37
3.2	État de l'art des études portant sur les aérosols industriels	38
3.3	Site d'étude et échantillons collectés	39
3.4	Matériels et méthodes	41
3.4.1	Analyse physico-chimique	41
3.4.2	Mesure des propriétés optiques	41
3.4.3	Simulation de l'impact radiatif	41
3.5	Analyse physico-chimique des particules prélevées dans les filtres	42
3.6	Propriétés optiques des aérosols	43
3.7	Impact radiatif du panache	46
3.7.1	Établissement de modèles de mélange des aérosols	47
3.7.2	Simulations des propriétés radiatives et discussion	49
3.8	Conclusion	52

4	Estimation conjointe du CO₂ et des aérosols dans un panache optiquement dense	53
4.1	Introduction	53
4.2	Motivations et objectif	53
4.2.1	Les phénomènes d'interaction gaz-aérosols dans le SWIR	53
4.2.2	Le cas des feux de biomasse	54
4.2.3	Objectif	54
4.3	Description de la méthode développée	55
4.3.1	Principe général	55
4.3.2	Estimation des propriétés des aérosols	56
4.3.3	Estimation de la teneur en CO ₂	57
4.3.4	Création des <i>Look-Up Tables</i>	58
4.4	Étude de sensibilité	59
4.4.1	Méthode d'analyse	59
4.4.2	Erreur due à l'interpolation de la réflectance du sol	60
4.4.3	Influence des aérosols	61
4.4.4	Influence d'autres paramètres	63
4.4.5	Bilan	65
4.5	Application sur des images AVIRIS	66
4.5.1	Image du feu de Quinault	66
4.5.2	Image du feu d'Aberdeen	70
4.6	Conclusion	72
5	Estimation du type d'aérosols dans un panache industriel : la méthode EARTH	75
5.1	Introduction	75
5.2	Principe de la méthode	75
5.2.1	Démarche globale	75
5.2.2	Modèle de transfert radiatif utilisé	77
5.2.3	Correction atmosphérique et estimation de la réflectance du sol sous le panache	78
5.2.4	Estimation des propriétés optiques des aérosols	79
5.2.5	Calcul des scores de dissimilarité et détermination du type d'aérosols	80
5.3	Génération de la <i>Look-Up Table</i>	81
5.3.1	Modèles d'aérosols choisis	81
5.3.2	Analyse des propriétés optiques des aérosols	82
5.4	Étude de sensibilité	84
5.4.1	Les principales sources d'erreurs	84
5.4.2	Méthode d'analyse	84
5.4.3	Erreur de modélisation	85
5.4.4	Erreur algorithmique	87
5.4.5	Erreur due au bruit instrumental	88
5.4.6	Erreur due à la réflectance du sol	88
5.4.7	Erreur due à l'atmosphère hors panache	89
5.4.8	Bilan des différents postes d'erreurs	89
5.4.9	Influence de l'erreur totale dans l'estimation du type	90
5.5	Application sur une image CASI	91
5.5.1	Présentation des données	91
5.5.2	Prétraitements	92
5.5.3	Estimation des propriétés optiques	94
5.5.4	Estimation du type d'aérosols	96
5.5.5	Discussions	96
5.6	Conclusion	97

6 Conclusion et perspectives	99
A Acronymes	103
B Principaux codes de transfert radiatif dans l'atmosphère	105
C COMPAS : COde de Modélisation d'un Panache d'AéroSols	107
D Études complémentaires menées sur la détection de gaz	109
D.1 Détection de CO ₂ et CH ₄ dans le domaine réflectif	109
D.2 Détection de SO ₂ dans le domaine émissif	109
Table des figures	113
Liste des tableaux	115
Bibliographie	117

Chapitre 1

Introduction

Depuis ces dernières décennies, le réchauffement climatique a fait l'objet d'un nombre croissant d'études scientifiques et de nombreux débats politiques. Si les causes de ce réchauffement sont encore aujourd'hui sujet à controverses, en 2007, dans son dernier rapport d'évaluation [1], le GIEC (Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) estimait la probabilité que le réchauffement soit dû aux activités humaines supérieure à 90%.

En effet, l'activité humaine est à l'origine, notamment, du rejet dans l'atmosphère d'une quantité importante de dioxyde de carbone (CO_2), acteur important de l'effet de serre atmosphérique, et dont la concentration est passée de 280ppm en 1979 à 379ppm en 2005. Outre les gaz à effet de serre, les émissions humaines d'aérosols atmosphériques ont également un impact sur le climat, directement (en absorbant et diffusant une partie du rayonnement solaire) et indirectement (en servant de noyau de nucléation aux nuages).

Dans ce contexte, la caractérisation des émissions anthropiques, et particulièrement industrielles, par télédétection constitue un enjeu majeur. Ainsi, l'estimation de la quantité de CO_2 et des propriétés des aérosols émis par une usine ou une industrie, à partir de données satellites ou aériennes, présente le double avantage d'améliorer les méthodes de suivi de pollution et de fournir des facteurs d'émissions, utiles pour les modèles climatologiques. C'est vers cet objectif que tendent les travaux présentés dans ce manuscrit de thèse.

Parmi les différents outils de télédétection, l'imagerie hyperspectrale, ou spectro-imagerie, présente un potentiel particulièrement intéressant pour la caractérisation d'effluents à l'échelle d'un site industriel. En effet, elle permet, à partir d'une unique acquisition, d'estimer conjointement la concentration des principaux gaz à effet de serre (le CO_2 , mais également la vapeur d'eau et le méthane) et les propriétés des aérosols. De plus, la bonne résolution spatiale des images hyperspectrales (de l'ordre du mètre pour les images aéroportées, à quelques décimètres pour les images satellites) permet l'étude des effluents au plus proche de leur source d'émission.

L'imagerie hyperspectrale est une technique d'imagerie passive, ce qui signifie que le signal reçu par le capteur est un signal naturel, et non émis par un instrument. Dans le cas des images hyperspectrales acquises dans le domaine réflectif du spectre électromagnétique (soit pour des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et $2,5\mu\text{m}$), l'unique source de rayonnement considérée est le soleil. L'énergie incidente au capteur, la luminance, est enregistrée simultanément en de nombreuses bandes spectrales étroites et contiguës pour chaque pixel de l'image, comme l'illustre la figure 1.1. La juxtaposition de ces différentes bandes spectrales permet d'associer, à chaque pixel de l'image, un spectre de luminance.

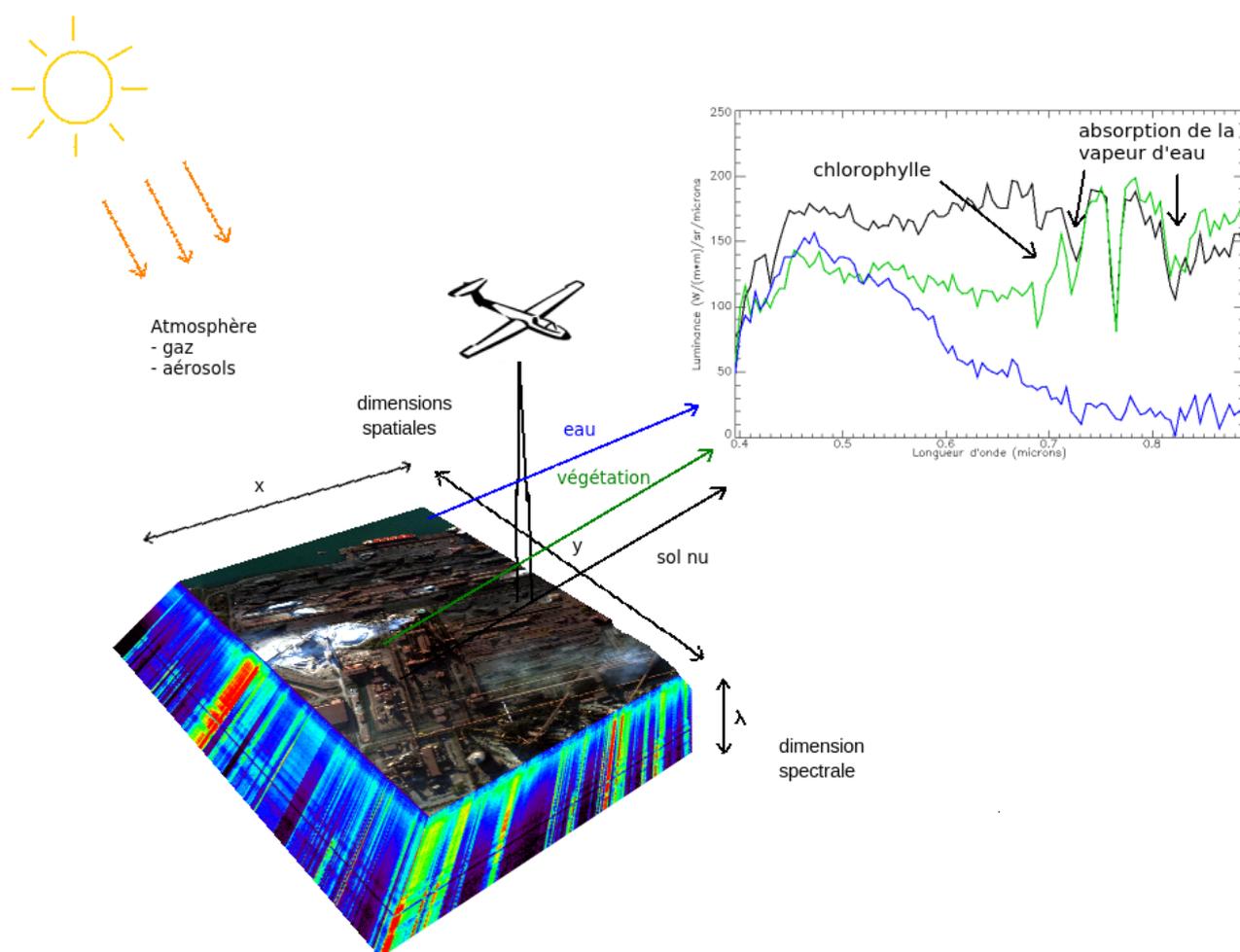


FIGURE 1.1 – *Principe de l'acquisition d'une image hyperspectrale. Les luminances sont enregistrées par le capteur simultanément en de nombreuses bandes spectrales; elles représentent l'énergie incidente au capteur, provenant du rayonnement solaire, après interactions avec les gaz et aérosols atmosphériques et le sol. A chaque pixel de l'image correspond donc un spectre de luminance finement échantillonné, mettant en évidence certaines caractéristiques spectrales de l'atmosphère et du sol.*

Cette luminance spectrale est une fonction du rayonnement solaire, de l'absorption et de la diffusion des gaz et aérosols atmosphériques, du sol et de la fonction de transfert de l'instrument. Il permet donc d'extraire des informations aussi bien sur les propriétés de l'atmosphère, au moment de l'acquisition de l'image, que sur la nature des matériaux constituant la surface terrestre. La séparation de ces différentes contributions est cependant complexe, et nécessite l'utilisation de modèles de transfert radiatif.

Ainsi, ce sont des images hyperspectrales, acquises dans le domaine réflectif, que nous nous proposons d'utiliser dans cette étude, pour caractériser des fumées (ou panaches) industrielles. Le choix de ce domaine spectral permet, comme nous le verrons, à la fois de mesurer de manière optimale l'impact radiatif des aérosols et d'estimer certains gaz d'importance, dont le CO₂. Notons cependant que, bien que nous nous soyons intéressés également à l'étude des effluents gazeux, l'essentiel de notre travail a porté sur l'estimation des propriétés des aérosols.

Dans le chapitre 2 de ce manuscrit sont présentées la physique du transfert radiatif dans l'atmosphère et la modélisation de l'impact d'un panache. Un état de l'art, concernant les méthodes d'estimation des gaz et des aérosols par télédétection y est également dressé. Le manque de données concernant les aérosols industriels est, par ailleurs, souligné.

C'est pourquoi, dans le chapitre 3, nous présentons une étude pluridisciplinaire (collaboration entre le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, l'ONERA et l'Université du Littoral - Côte d'Opale), visant à caractériser les propriétés physiques, optiques et radiatives d'aérosols émis par une industrie métallurgique, à partir de prélèvements *in situ*. Ce travail a ainsi permis de disposer de nouvelles données, utilisées dans le chapitre 5.

Le chapitre 2 ayant également mis en évidence des phénomènes d'interactions entre l'absorption des gaz et la diffusion des aérosols, une méthode d'estimation conjointe du CO₂ et des aérosols à partir d'images hyperspectrales a été développée. Elle fait l'objet du chapitre 4. Cette méthode, adaptée aux panaches optiquement denses, a été validée sur données simulées puis appliquée sur deux images AVIRIS de feux de biomasse. Elle permet d'estimer la concentration en gaz, en corrigeant au préalable l'effet de diffusion des aérosols.

Puis, une nouvelle méthode d'estimation des aérosols, EARTH (*Estimation of AeRosol Type using Hyperspectral data*), spécifiquement dédiée aux panaches industriels, est présentée au chapitre 5. Également validée sur données simulées, elle a été appliquée sur une image hyperspectrale CASI d'un panache émis par une usine métallurgique. Elle permet de reconnaître, sans information *a priori*, le type de particules présentes dans un panache de faible épaisseur optique.

Enfin, une synthèse du travail effectué, suivie d'une discussion sur les perspectives ouvertes par nos études, conclut le corps de ce manuscrit.

Par ailleurs, on pourra trouver en annexe une comparaison des principaux codes de transfert radiatif, la description de l'outil COMPAS (COde de Modélisation d'un Panache d'Aérosols), développé au cours de la thèse et utilisé pour la simulation des propriétés optiques des mélanges d'aérosols, ainsi que des résultats d'études annexes portant sur la détection de gaz sur des images hyperspectrales dans différents domaines spectraux.

Chapitre 2

Physique et télédétection d'un panache

2.1 Introduction

Ce chapitre vise à décrire l'impact radiatif d'un panache dans le domaine réflectif du spectre électromagnétique, puis à dresser un état de l'art des méthodes d'estimation des gaz et des aérosols par imagerie hyperspectrale. Une description physique des aérosols est présentée dans la première partie. Après avoir décrit globalement ce que signifie le terme "aérosols", leurs propriétés microphysiques puis optiques sont présentées. Les spécificités des aérosols industriels sont ensuite examinées. La seconde partie porte sur les propriétés optiques des gaz. L'équation du transfert radiatif, expliquant la formation du signal enregistré par un capteur hyperspectral, est rappelée dans la troisième partie. L'influence d'un panache sur les termes de cette équation est ensuite discutée et les outils de simulation développés dans le cadre de cette thèse sont présentés. Dans une dernière partie, un état de l'art des méthodes d'estimation des gaz et des aérosols est dressé. Enfin, la démarche adoptée pour ce travail est exposée.

2.2 Physique des aérosols

Les aérosols jouent un rôle important dans le processus de formation des nuages et dans le bilan radiatif de la Terre. Ils ont donc un rôle important dans les changements climatiques et, à ce titre, sont très largement étudiés, notamment à partir de données satellites. Pour comprendre comment fonctionnent les méthodes permettant leur étude par télédétection, il est nécessaire de décrire leur impact radiatif, c'est-à-dire la manière dont ils interagissent avec le rayonnement. Pour ce faire, nous présentons, dans cette section, une description générale des aérosols, puis nous examinons leurs propriétés microphysiques puis optiques. Ensuite, la méthode, reposant sur la théorie de Mie, qui sera utilisée dans cette thèse pour passer des propriétés microphysiques aux propriétés optiques, est décrite. Enfin, nous examinons les spécificités des aérosols industriels.

2.2.1 Généralités

Les aérosols sont des particules fines, solides ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux ou liquide. Dans la suite du document, le terme "aérosols" désignera en fait les aérosols atmosphériques. Ceux-ci sont présents principalement dans les basses couches de l'atmosphère (la troposphère) et même essentiellement dans la couche dite limite (entre 0 et 2km). Ils peuvent provenir de sources naturelles (des poussières soulevées par le vent, des embruns océaniques et des particules provenant de feux de biomasse ou d'émissions volcaniques) ou être émis par l'activité humaine (émissions de

véhicules, rejets industriels, chauffage au bois). Ces derniers sont appelés aérosols anthropiques et influent fortement sur la qualité de l'air.

On distingue également les aérosols primaires des aérosols secondaires. Les premiers sont des particules directement émises dans l'atmosphère, alors que les seconds sont des produits d'interactions physico-chimiques. En effet, les particules peuvent être produites à partir de composés gazeux (nucléation), s'agglomérer entre elles (coagulation) ou subir des modifications de leurs propriétés physiques (phénomènes de dilution et de condensation) [2, 3].

2.2.2 Propriétés microphysiques

Les aérosols sont définis par leur composition chimique ou minéralogique, leur taille et leur forme. C'est ce que l'on appelle les propriétés microphysiques d'une particule.

Dans le cadre de notre étude, portant sur l'interaction des aérosols avec le rayonnement, c'est l'indice de réfraction (grandeur complexe dépendant de la longueur d'onde) qui porte l'information sur la composition des aérosols. Pour les grandes familles d'aérosols, ces indices de réfraction sont disponibles dans des bases de données. Celle que nous avons utilisée est la base GEISA-aérosols¹ (Gestion et Études des Informations Spectroscopiques Atmosphériques) [4]. Elle contient notamment les sous-bases OPAC (*Optical Properties of Aerosols and Clouds*) [5] et LITMS (*Laboratory for Information Technologies and Mathematical Simulations*) mais également une base propre, regroupant des mesures effectuées en laboratoire par diverses équipes, et qui se veut la plus exhaustive possible. Parmi les types d'aérosols référencés, on peut citer les suies, les sulfates, les particules minérales (mélange d'argile et de quartz) les matières organiques et les sels marins. Ces différents types de particules permettent de constituer des mélanges dits standard (rural, urbain, maritime, désertique) utilisés notamment dans les codes de transfert radiatif pour représenter les aérosols.

Pour décrire la distribution en taille des aérosols (on parle aussi de granulométrie), nous adopterons une modélisation par une loi lognormale, ce qui est l'approche la plus classique car en bon accord avec les observations. Cela consiste à considérer que le nombre de particules par unité de volume $N(r)$ dont le rayon est compris entre r et $r + dr$ est donné par

$$N(r) = \frac{N}{r \ln(\sigma_m) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln^2(r/r_m)}{2 \ln^2 \sigma_m}\right], \quad (2.1)$$

où r_m est le rayon moyen du mode, σ_m son écart-type, et N le nombre de particules par unité de volume.

Pour décrire la distribution en taille des aérosols, trois modes peuvent être considérés : un mode fin (rayon inférieur à $0,05\mu\text{m}$), qui correspond aux plus petites particules, servant de noyaux de condensation aux nuages, un mode d'accumulation (rayon compris entre $0,05\mu\text{m}$ et $0,5\mu\text{m}$), issu de l'agrégation de particules plus petites et enfin un mode grossier (rayon supérieur à $0,5\mu\text{m}$), qui regroupe les plus grosses particules, restant généralement peu de temps dans l'atmosphère car retombant rapidement du fait de la gravité.

Pour prendre en compte plusieurs de ces modes, nous remplacerons donc la distribution lognormale monomodale, dont l'expression est donnée par l'équation 2.1, par une distribution lognormale multimodale, qui n'est rien d'autre que la somme de plusieurs distributions lognormales monomodales. Pour une distribution à n modes, l'expression précédente devient

$$N(r) = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{r \ln(\sigma_{mi}) \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln^2(r/r_{mi})}{2 \ln^2 \sigma_{mi}}\right]. \quad (2.2)$$

¹<http://ara.lmd.polytechnique.fr/htdocs-public/products/GEISA/HTML-GEISA/GeisaAero.html>

2.2.3 Propriétés optiques

Comme nous nous intéressons à l'impact des aérosols sur le rayonnement, ce ne sont pas directement leurs propriétés microphysiques mais leurs propriétés optiques qui influenceront sur les signaux que nous observerons. Trois d'entre elles suffisent à décrire complètement l'impact radiatif d'une particule : l'épaisseur optique τ , l'albédo de diffusion simple ω_0 et la fonction de phase $P(\Theta)$. Dans ce paragraphe, toutes les quantités dépendent de la longueur d'onde λ . Pour alléger les notations, nous omettrons cependant cette dépendance.

Lorsqu'un photon rencontre un nuage d'aérosols, il peut être soit diffusé (c'est-à-dire qu'il change de direction), soit absorbé. La proportion d'énergie perdue dans la direction d'incidence (absorbée ou diffusée) par une onde lors de la traversée d'un milieu est, par unité de longueur, définie par le coefficient d'extinction. Ceci se résume par la loi de Beer-Lambert [6]

$$\frac{dL}{dz} = -k_{ext}(z)L, \quad (2.3)$$

avec

$$k_{ext}(z) = k_{dif}(z) + k_{abs}(z), \quad (2.4)$$

où dz est l'épaisseur infinitésimale du milieu traversé par l'onde d'énergie L et $k_{ext}(z)$, $k_{dif}(z)$ et $k_{abs}(z)$ sont respectivement les coefficients d'extinction, de diffusion et d'absorption du milieu à l'altitude z .

Le pouvoir d'extinction qu'a un milieu (un panache d'aérosols par exemple) entre les altitudes z_1 et z_2 est appelé épaisseur optique τ . Elle est définie par

$$\tau = \int_{z_1}^{z_2} k_{ext}(z) dz. \quad (2.5)$$

Plus cette épaisseur optique est grande, plus un photon a de chances de rencontrer un aérosol pendant la traversée du panache. Cette grandeur sans dimension est donc principalement liée à la concentration en particules, mais dépend également de leurs rayons et de leur pouvoir d'extinction, donc de leur nature.

Notons, ici, que l'épaisseur optique des aérosols décroît avec la longueur d'onde. Ainsi, l'impact radiatif des aérosols est plus important pour les longueurs d'onde du visible que pour celles de l'infrarouge. Par ailleurs, la vitesse de cette décroissance dépend du type et de la taille des particules considérées mais, pour un type d'aérosol donné, cette décroissance est d'autant plus rapide que les particules sont petites. Or nos travaux portent sur l'étude d'aérosols industriels qui sont généralement de petites particules (les plus grosses étant piégées dans les filtres des cheminées). Leur impact radiatif est donc particulièrement faible dans l'infrarouge, ce qui explique le choix du domaine réflectif dans le cadre de nos études.

La proportion de photons diffusés parmi l'ensemble de ceux qui ont rencontré un aérosol est définie par l'albédo de diffusion simple ω_0 qui s'écrit

$$\omega_0 = \frac{k_{dif}}{k_{ext}} = \frac{k_{dif}}{k_{dif} + k_{abs}}. \quad (2.6)$$

Cet albédo est lié à la nature de l'aérosol, mais également à sa granulométrie. Si celui-ci est très absorbant (comme la suie), il possédera un albédo faible. Au contraire, s'il est principalement diffusant (comme les sulfates), son albédo sera proche de 1.

La dernière propriété optique, la fonction de phase $P(\Theta)$, est liée à la forme et à la taille des aérosols. Elle représente la probabilité qu'a un photon, après interaction avec un aérosol, d'être diffusé dans une direction formant un angle Θ avec la direction d'incidence (c'est-à-dire celle qu'aurait le photon en l'absence de l'aérosol, voir figure 2.1). Notons que l'utilisation de la fonction de

phase introduit une dépendance en Θ , ce qui complexifie les équations. Pour s'affranchir de cette dépendance, nous préférons utiliser le paramètre d'asymétrie (ou facteur d'asymétrie) g défini par

$$g = \langle \cos \Theta \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\pi P(\Theta) \cos \Theta \sin \Theta d\Theta. \quad (2.7)$$

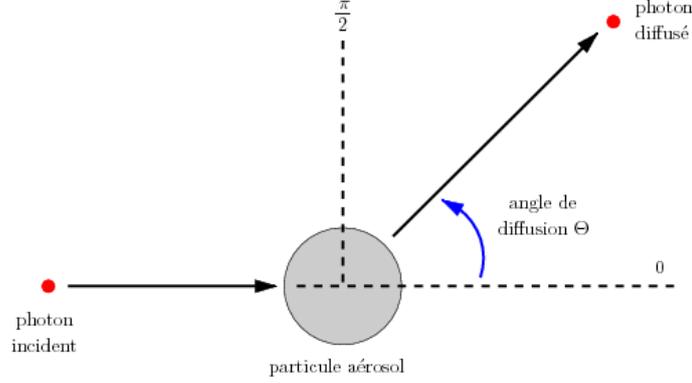


FIGURE 2.1 – Un photon diffusé par une particule aérosol est caractérisé par l'angle de diffusion Θ défini entre la direction qu'aurait le photon sans diffusion et sa direction avec diffusion.

Ainsi, une diffusion isotrope (c'est-à-dire sans direction privilégiée) correspondra à un paramètre d'asymétrie nul, alors qu'une diffusion principalement vers l'avant (Θ compris entre $-\pi/2$ et $\pi/2$) induira un paramètre d'asymétrie positif et qu'une diffusion plutôt vers l'arrière (Θ compris entre $\pi/2$ et $3\pi/2$) correspondra à un paramètre d'asymétrie négatif.

2.2.4 La théorie de Mie et les lois de mélange

Les propriétés optiques sont bien entendu reliées aux propriétés microphysiques. Dans le cas d'une particule sphérique homogène, le passage des premières aux secondes est décrite par la théorie de Mie. Celle-ci consiste à trouver une solution aux équations électromagnétiques de Maxwell à partir de la résolution de l'équation scalaire de propagation des ondes, satisfaite par les champs électriques et magnétiques de l'onde diffusée [7]. En utilisant cette théorie, il est donc possible de calculer l'épaisseur optique, l'albédo de simple diffusion et le facteur d'asymétrie d'un panache d'aérosols à partir des paramètres granulométriques et de l'indice de réfraction des particules.

Pour tenir compte des mélanges entre différents types d'aérosols au sein du panache, deux approches sont possibles. Tout d'abord, on peut considérer que chaque particule reste séparée des autres sans aucune interaction avec son environnement. Il s'agira alors d'un mélange dit externe. Les coefficients d'extinction totaux k_{ext}^T , d'absorption k_{abs}^T et de diffusion k_{dif}^T du mélange sont alors les sommes des coefficients de chaque type i de particules k_{ext}^i , k_{abs}^i et k_{dif}^i

$$k_{ext}^T = \sum_i k_{ext}^i, \quad k_{abs}^T = \sum_i k_{abs}^i, \quad k_{dif}^T = \sum_i k_{dif}^i. \quad (2.8)$$

L'albédo de diffusion simple, la fonction de phase et le facteur d'asymétrie du mélange externe s'écrivent :

$$\omega_0^T = \frac{k_{dif}^T}{k_{ext}^T}, \quad (2.9)$$

$$P(\Theta)^T = \frac{1}{k_{dif}^T} \sum_i k_{dif}^i P^i(\Theta), \quad (2.10)$$

$$g^T = \frac{\sum_i k_{ext}^i \omega_0^i g^i}{\sum_i k_{ext}^i \omega_0^i}, \quad (2.11)$$

où $P(\Theta)^i$ désigne la fonction de phase des particules de type i et $P(\Theta)^T$ la fonction de phase totale du mélange.

En revanche, si l'on souhaite prendre en compte les phénomènes d'agglomération et d'agrégation, il faut considérer que les aérosols sont des particules formées à partir d'un mélange intime des différents constituants de panache. C'est ce qu'on appelle un mélange interne. On calcule alors les propriétés optiques du mélange à l'aide de la théorie de Mie en utilisant un nouvel indice de réfraction m^T , donné par la loi de Maxwell-Garnett [8] :

$$|m^T|^2 = |m_2|^2 \left(1 + 3 f_1 \frac{|m_1|^2 - |m_2|^2}{|m_1|^2 + 2|m_2|^2 - f_1 (|m_1|^2 - |m_2|^2)} \right), \quad (2.12)$$

où m_1 et m_2 sont les indices de réfraction des deux constituants du mélange et f_1 la fraction de volume occupée par le constituant d'indice m_1 . La formule 2.12 fournit en fait l'indice de réfraction équivalent d'une sphère composée d'un noyau (d'indice m_1) et d'une enveloppe externe (d'indice m_2).

2.2.5 Les aérosols industriels

Si les bases de données citées dans le paragraphe 2.2.2 permettent de modéliser convenablement les aérosols naturels, les aérosols anthropiques sont en revanche beaucoup moins bien connus. En particulier, très peu de données sont disponibles concernant les particules émises par les industries.

Le principal projet qui a porté sur l'étude des aérosols anthropiques est TARFOX, pour *Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational eXperiment* [9]. Il s'est déroulé du 10 au 31 juillet 1996 et a mobilisé quatre satellites (GOES-8, NOAR-14, ERS-2 et Landsat) ainsi que quatre avions équipés de lidar, d'imageurs multispectraux, de radiomètres et de photomètres. L'objectif consistait à mesurer et à analyser les propriétés optiques des aérosols urbains et industriels sur la côte Est des États-Unis. Les tailles des particules en suspension ont été mesurées, ainsi que leurs coefficients d'absorption et de rétrodiffusion, leurs compositions chimiques et les luminances montantes et descendantes. Ce projet fait l'objet d'un numéro spécial du *Journal of Geophysical Research* de janvier 1999. On peut également citer la campagne SCAR-A (Sulfate Cloud and Radiation - Atlantic) qui s'est déroulée en juillet 1993, également sur la côte Est des États-Unis [10].

Plus récemment, à Fos-sur-Mer, lors de la campagne ESCOMPTE (Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions), Mallet *et al.* [11] ont effectué des mesures *in situ* de distributions verticale et horizontale de propriétés optiques d'aérosols pendant de fortes pollutions. La diffusion et l'absorption ont été mesurées à trois longueurs d'onde du visible, pendant deux jours de suite. Il est apparu que les propriétés optiques de ces aérosols industriels avaient varié de façon importante pendant la durée de l'étude. A titre d'illustration, nous présentons dans le tableau 2.1 les paramètres des distributions de taille utilisés pour représenter les aérosols industriels du 23 juin 2001.

Bien que ces projets aient fourni des renseignements précieux sur les propriétés des aérosols industriels, ils ne permettent pas d'aboutir à un modèle physique permettant de décrire, de manière générale, les particules émises par les industries. En effet, celles-ci sont de nature très variable, d'une part parce que leur composition dépend très fortement du type d'industrie dont elles proviennent, d'autre part parce que leurs propriétés varient sensiblement avec la distance du point d'émission, du fait des nombreuses interactions avec les gaz atmosphériques.

Par exemple, les mesures effectuées dans le cadre de ESCOMPTE ont été faites soit dans des zones péri-urbaines [12], soit à plusieurs kilomètres de zones industrielles [11]. Le modèle d'aérosols (mélange de sulfates, de suies et de matières organiques) utilisé dans Mallet *et al.* [11] décrit donc

Type d'aérosol	N (m^{-3})	r_m (μm)	σ_m
Suie	3632	0,017	2,07
Matière organique (mode fin)	6012	0,026	1,76
Matière organique (mode d'accumulation)	0,933	0,310	1,90
Sulfate	4700	0,034	1,76

TABLE 2.1 – Paramètres des différents modes granulométriques des aérosols industriels de Fos-sur-Mer du 23 juin 2001, chaque mode étant représenté par une loi lognormale [source : ESCOMPTE].

convenablement les aérosols dans des zones polluées (relativement loin de leur point d'émission) mais ne peut convenir à la description des particules présentes, par exemple, dans un panache sortant d'une cheminée d'une usine métallurgique. En effet, ces usines rejettent principalement des particules d'oxydes métalliques. Si l'on souhaite étudier ce type de panache proche de son point d'émission, il est donc nécessaire de connaître précisément les propriétés microphysiques et optiques de ces particules. C'est l'objet du chapitre 3 de ce manuscrit.

2.3 Physique des gaz

L'atmosphère terrestre est composée de deux types de gaz : les gaz quasi-permanents et les gaz dont la concentration varie en fonction des régions et des conditions climatiques. Parmi les gaz quasi-permanents, on peut citer le diazote N_2 , le dioxygène O_2 et l'argon Ar qui sont les principaux constituants de l'atmosphère. Ils représentent en effet à eux trois 99,99% de l'atmosphère en volume.

Mais les gaz les plus largement étudiés en télédétection sont ceux qui ont un impact important sur le climat. C'est le cas par exemple du CO_2 , gaz à effet de serre produit en grande quantité lors des phénomènes de combustion (feux de végétation, éruptions volcaniques ou activités industrielles), de la vapeur d'eau H_2O , dont la concentration varie fortement à la fois spatialement et temporellement, et de l'ozone O_3 , qui est principalement situé dans la stratosphère (entre 15 et 50 km) et qui est responsable de l'absorption des rayonnements ultraviolets.

Dans cette section, nous présentons d'abord les propriétés optiques des gaz et leur impact radiatif puis nous examinons plus particulièrement les espèces gazeuses présentes dans les rejets industriels.

2.3.1 Propriétés optiques

Les propriétés optiques des gaz se décrivent de manière très différente de celles des aérosols. Pour les faibles longueurs d'onde, les molécules de gaz ont un pouvoir de diffusion. C'est ce qu'on appelle la diffusion de Rayleigh [13]. Généralement, on considère que cette diffusion ne dépend pas des proportions des différents gaz mais simplement de la concentration totale (ou de la pression) ; cette diffusion de Rayleigh varie spectralement en $1/\lambda^4$.

Le second effet d'un gaz sur un rayonnement est l'absorption. Contrairement à la diffusion, le pouvoir d'absorption d'un milieu contenant des gaz est entièrement dépendant de la nature et de la concentration de chacun de ces gaz. En effet, chaque liaison intra-moléculaire est sensible à des longueurs d'onde particulières qui correspondent à ce que l'on nomme les modes vibrationnels ou rotationnels de cette liaison (dans les courtes longueurs d'onde, les atomes sont également sensibles à des modes dits électroniques). Ainsi, lors d'une interaction avec un rayonnement, une molécule de gaz absorbe une partie des photons aux longueurs d'onde correspondant aux différents modes de la liaison qu'elle comporte et gagne ainsi des niveaux d'énergie. Chaque gaz a donc des raies d'absorption caractéristiques. La présence de ces raies (ou bandes) d'absorption dans un spectre permet donc de déterminer la présence de tel ou tel gaz, et leur profondeur est directement reliée à sa concentration.

Cependant, si le gaz est plus chaud que son environnement, les molécules de gaz ont, au contraire, tendance à baisser leur niveau d'énergie et donc à relâcher des photons, toujours aux longueurs d'onde correspondant aux modes des liaisons intra-moléculaires et aux modes électroniques. On observe ainsi un spectre d'émission pour un gaz chaud et un spectre d'absorption pour un gaz froid. Les raies de chacun de ces spectres se trouvent sensiblement aux mêmes longueurs d'onde, mais, si l'on dispose d'une bonne résolution spectrale, on peut cependant remarquer un léger décalage en longueur d'onde, principalement dû à l'effet Doppler et à l'effet de Lorentz (ou effet de collisions). En effet, si le gaz est chaud, les molécules sont animées d'un mouvement plus rapide que lorsque le gaz est froid, ce qui induit un effet Doppler plus important et des collisions entre molécules plus fréquentes. Notons que, pour des températures inférieures à environ 500K, cette émission thermique est négligeable dans le domaine réfléchif du spectre électromagnétique considéré ici.

Entre 0,4 et 2,5 μm , les propriétés optiques d'un gaz sont donc principalement caractérisées par sa section efficace de diffusion σ_{mol} , qui représente la quantité d'énergie diffusée dans le cas d'un flux monochromatique pour une concentration en molécules égale à 1, et le coefficient d'absorption moléculaire global k_{mol} , obtenu par moyenne des coefficients d'absorption de chaque molécule pondérés par la proportion de chaque type de molécule.

L'impact radiatif d'un panache de gaz, situé entre les altitudes z_1 et z_2 , peut donc se définir par sa transmittance, donnée par la loi de Beer-Lambert [6] pour un trajet vertical :

$$T^{gaz}(\lambda) = \exp\left(-\int_{z_1}^{z_2} [k_{mol}(\lambda, z) + \sigma_{mol}(\lambda, z)] N_{mol}(z) dz\right) \quad (2.13)$$

où $N_{mol}(z)$ est la concentration moléculaire du gaz en cm^{-3} à l'altitude z .

2.3.2 Les gaz industriels

Les espèces chimiques gazeuses pouvant être émises par une industrie sont nombreuses. Parmi les principaux constituants des effluents, on trouve des gaz présents naturellement dans l'atmosphère comme la vapeur d'eau H_2O , le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 , le protoxyde d'azote N_2O , des gaz plus rares comme le dioxyde de soufre SO_2 , le dioxyde d'azote NO_2 , le chlorure d'hydrogène HCl , le fluorure d'hydrogène HF ou les COV (composés organiques volatiles) et aussi des gaz purement anthropiques, comme les CFC (chloro-fluorocarbones) et les HCFC (hydro-chloro-fluorocarbones).

Des informations assez complètes sur les émissions polluantes des industries se trouvent sur le site de l'Agence Européenne de l'Environnement. Celle-ci regroupe des données fournies par des milliers d'entreprises à travers l'Europe sur son site E-PRTR (*European Pollutant Release and Transfer Register*)² classées par région, secteur industriel ou nature de polluant. Nous donnons, à titre d'exemple, les informations disponibles pour l'année 2008 sur l'usine d'Arcelor-Mittal à Fos-sur-Mer (tableau 2.2).

Dans la suite de notre travail, nous ne considérerons que les gaz qui sont à la fois les principaux constituants des effluents industriels et qui possèdent des raies d'absorption importantes dans le domaine réfléchif. Il y en a quatre principaux : la vapeur d'eau H_2O , le CO_2 , le CH_4 et le N_2O . A titre d'illustration, la figure 2.2, issue des travaux de *Thorpe et al.* [14], présente les spectres de transmittance de ces gaz.

Notons que de nombreux autres gaz émis par les industries (monoxyde de carbone CO , dioxyde de soufre SO_2 , ammoniac NH_3 , acide nitrique HNO_3) possèdent leur pic d'absorption principal entre 3 et 14 μm , ce qui explique qu'une grande partie des études portant sur l'estimation des gaz industriels par télédétection utilise la partie émissive du spectre électromagnétique. Les travaux présentés en annexe D montrent des résultats de détection de gaz à partir d'images hyperspectrales acquises dans ce domaine spectral.

²<http://prtr.ec.europa.eu>

Nom du polluant	Quantité émise dans l'année
Méthane (CH_4)	897 t
Dioxyde de carbone (CO_2)	6 460 000 t
Hydro-fluorocarbones (HFCs)	148 kg
Protoxyde d'azote (N_2O)	123 t
Composés organiques volatiles (COV)	452 t
Oxydes d'azote (NO_x/NO_2)	6520 t
Oxydes de soufre (SO_x/SO_2)	6960 t
Hydro-chloro-fluorocarbones (HCFCs)	393 kg
Fluore et composés non-organiques (comme HF)	12,5 t
Arsenic et ses composés (As)	40,0 kg
Cadmium et ses composés (Cd)	439,0 kg
Chrome et ses composés (Cr)	195,0 kg
Cuivre et ses composés (Cu)	587,0 kg
Mercure et ses composés (Hg)	69,0 kg
Nickel et ses composés (Ni)	711,0 kg
Plomb et ses composés (Pb)	4,96 t
Zinc et ses composés (Zn)	1,64 t
Benzène (C_6H_6)	18,7 t

TABLE 2.2 – Émissions de polluants dans l'air (solides et gazeux) par l'usine d'Arcelor-Mittal à Fos-sur-Mer en 2008 [source : European Pollutant Release and Transfer Register].

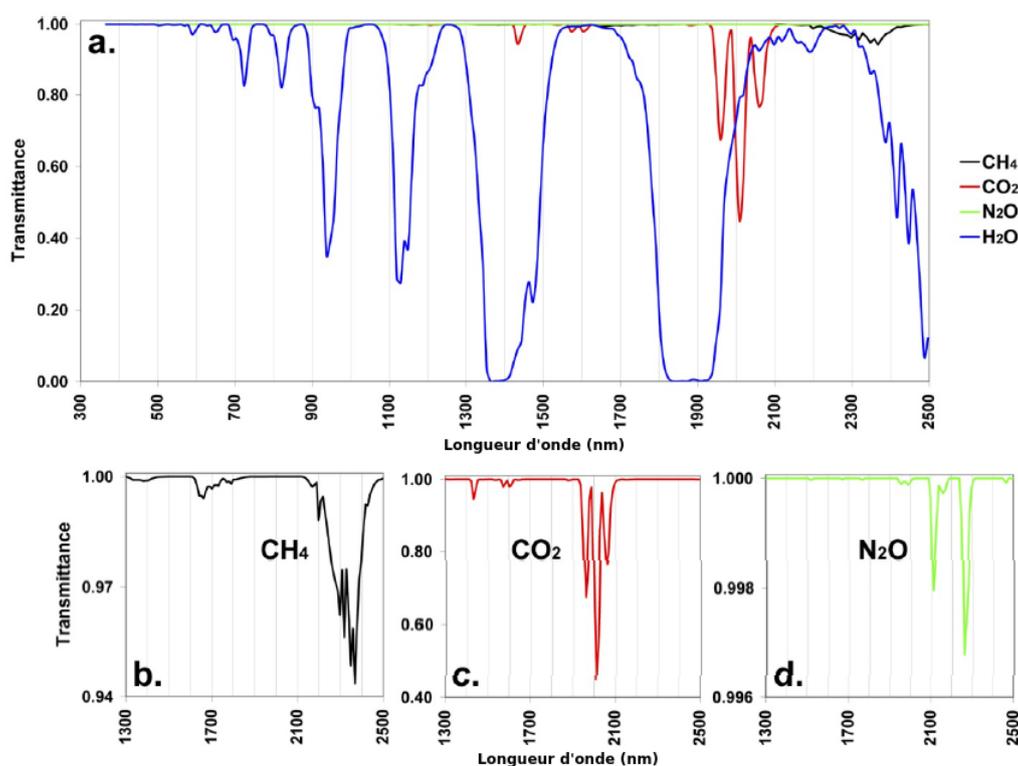


FIGURE 2.2 – a) Spectres de transmittance des principaux gaz possédant des bandes d'absorption entre 400 et 2500nm. b) Absorption relativement faible du CH_4 entre 2150 et 2450nm. c) Forts pics d'absorption du CO_2 centrés en 1958nm, 2008nm et 2058nm. d) Faibles pics d'absorption du N_2O centrés en 2109 et 2258nm. [Source : Thorpe et al. [14]].

2.4 Transfert radiatif dans l'atmosphère

2.4.1 Principes physiques

Le spectre électromagnétique, c'est-à-dire l'intervalle dans lequel peut se situer la longueur d'une onde qui constitue un rayonnement, s'étend du picomètre ($10^{-12}m$) au kilomètre. Selon l'ordre de grandeur de la longueur d'onde considérée, on parle de rayons gamma, rayons X, ultra-violet, visibles, infrarouges, micro-ondes ou ondes radio.

Les ondes dont l'énergie est mesurée par les capteurs hyperspectraux sont les ondes visibles et infrarouges, ce qui correspond à une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 14 μm . Dans cet intervalle, on distingue quatre domaines spectraux : le VNIR (*Visible, Near-InfraRed*) de 0,4 à 1,2 μm , le SWIR (*ShortWave InfraRed*) de 1,2 à 2,5 μm , le MWIR (*MidWave InfraRed*) de 2,5 à 5 μm et le LWIR (*LongWave InfraRed*) de 5 à 14 μm . Cependant, le rayonnement solaire ne peut pas traverser l'atmosphère à toutes ces longueurs d'ondes, à cause de l'absorption des gaz atmosphériques.

Pour des applications de télédétection, les plages de longueurs d'onde pour lesquelles sont développés les capteurs sont celles où la transmission atmosphérique est proche de 1 (ou de 100%). C'est ce qu'on nomme les fenêtres atmosphériques. Du visible au proche-infrarouge, il y en a trois : 0,4-2,5 μm (domaine réflectif), 3-5 μm et 8-14 μm (infrarouge thermique). Comme nous l'avons mentionné précédemment, notre étude porte sur le domaine réflectif, pour lequel l'impact radiatif des aérosols est le plus grand.

Dans ce domaine de longueurs d'onde, le rayonnement produit par le Soleil, et qui parvient au capteur, porte donc des informations sur la composition de l'atmosphère et la nature du sol. Ces différentes contributions interviennent donc dans l'équation du transfert radiatif.

2.4.2 Équation du transfert radiatif dans le domaine réflectif

Les hypothèses sous lesquelles les équations de ce paragraphe seront écrites sont les suivantes :

- Les sols seront supposés homogènes, plats et lambertiens (c'est-à-dire qu'ils réfléchissent la lumière avec la même intensité dans toutes les directions). Les effets de directionnalité dans le rayonnement réfléchi, ainsi que les effets d'environnement seront donc négligés.
- Le panache introduit dans le modèle d'atmosphère sera considéré comme une couche plane, infinie, et homogène.
- L'émission thermique des gaz sera supposée nulle (ce qui est vrai, dans le réflectif, si leur température n'excède pas 500K : voir paragraphe 4.4.4).

En ciel clair

En ciel clair, ou en l'absence de panache, le rayonnement qui parvient au capteur peut provenir soit de la diffusion propre de l'atmosphère (chemin (1) de la figure 2.3), soit de la réflexion du sol après avoir été transmis directement (chemin (2)) ou indirectement (chemin (3)) par l'atmosphère, soit d'interactions multiples entre le sol et l'atmosphère (chemin (4)) [6].

Dans l'équation du transfert radiatif, la diffusion propre de l'atmosphère est représentée par la luminance atmosphérique montante $L^{atm}(\lambda)$. Le rayonnement du Soleil après réflexion par le sol et transmission par l'atmosphère s'écrit quant à lui

$$\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda), \quad (2.14)$$

où $T^{atm}(\lambda)$ est la transmittance atmosphérique totale (montante et descendante, directe et diffuse), $E_s(\lambda)$ l'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère et μ_s le cosinus de l'angle zénithal solaire. Enfin, $\rho^{sol}(\lambda)$ est la réflectance du sol, qui représente le rapport du flux réfléchi sur le flux incident.

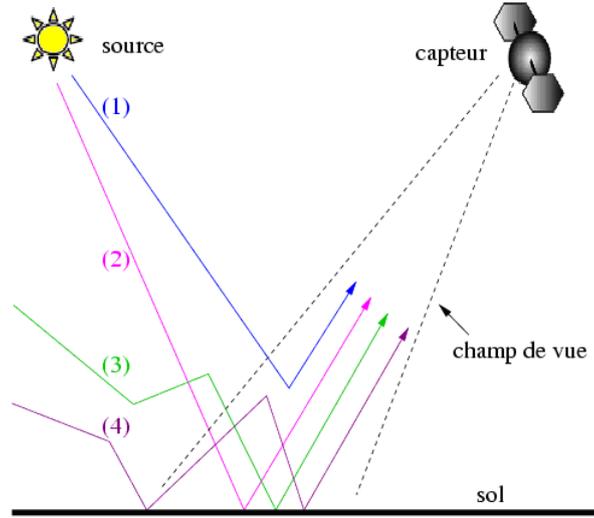


FIGURE 2.3 – Schéma des principaux rayonnements reçus par le capteur observant une scène dans le domaine réflectif $[0,4-2,5\mu m]$. Le rayonnement incident parvient en entrée du capteur en étant (1) diffusé par l'atmosphère, (2) transmis de façon directe jusqu'au sol puis réfléchi par le sol, (3) transmis de façon diffuse jusqu'au sol puis réfléchi par le sol ou (4) en subissant des interactions multiples entre le sol et l'atmosphère.

Si, maintenant, le rayon réfléchi par le sol ne revient pas directement au capteur mais est réfléchi par l'atmosphère puis à nouveau réfléchi par le sol, l'expression précédente devient

$$\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda) S^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda) \quad (2.15)$$

où $S^{atm}(\lambda)$ est l'albédo sphérique de l'atmosphère. Pour tenir compte de toutes les interactions multiples entre le sol et l'atmosphère, il faut additionner une infinité de termes qui forment une suite géométrique de premier terme $\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda)$ et de raison $S^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda)$. Ainsi, l'équation du transfert radiatif dans le domaine réflectif s'écrit finalement

$$L^{capteur}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \frac{T^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda)}{1 - S^{atm}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda)}, \quad (2.16)$$

où $L^{capteur}(\lambda)$ est la luminance en entrée du capteur.

En présence d'un panache

En présence d'un panache, on pose l'équation suivante :

$$\begin{aligned} L^{capteur}(\lambda) &= L^{atm}(\lambda) + L^{panache}(\lambda) \\ &+ \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \frac{T^{atm}(\lambda) T^{panache}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda)}{1 - [S^{atm}(\lambda) + S^{panache}(\lambda)] \rho^{sol}(\lambda)}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

où $L^{panache}(\lambda)$ est la luminance due à la diffusion propre du panache, $T^{panache}(\lambda)$ est la transmittance totale du panache (montante et descendante, directe et diffuse) et $S^{panache}(\lambda)$ son albédo de diffusion simple.

Notons que, dans cette expression, les termes relatifs au panache proviennent à la fois des effets radiatifs des gaz et des aérosols et sont définis par rapport à une atmosphère de référence. Ils représentent en fait l'écart entre les valeurs des termes atmosphériques obtenues pour cette atmosphère de référence sans panache et pour cette même atmosphère lorsqu'un panache est ajouté.

Cette équation a été utilisée pour le développement de la méthode EARTH, pour la caractérisation d'aérosols industriels. Les hypothèses sous-jacentes à l'utilisation de ce formalisme et les erreurs qu'elles peuvent induire sont donc discutées au chapitre 5.

2.4.3 Phénomènes de couplage

Dans les équations précédentes, les termes atmosphériques $L^{atm}(\lambda)$, $T^{atm}(\lambda)$ et $S^{atm}(\lambda)$ dépendent évidemment de l'absorption et de la diffusion des photons induites par les aérosols et les molécules de gaz présents dans l'atmosphère. Il est extrêmement difficile de séparer ces deux contributions à cause de ce que l'on appelle les phénomènes de couplage. On peut distinguer deux types de couplage dus à la présence simultanée de gaz et d'aérosols : le couplage diffusion/diffusion et le couplage diffusion/absorption.

Diffusion particulaire et diffusion de Rayleigh

Dans une atmosphère contenant à la fois des gaz et des aérosols, deux types de diffusion interviennent : la diffusion particulaire et la diffusion de Rayleigh. Pour les faibles longueurs d'onde (typiquement entre 400 et 600nm) pour lesquelles ces deux diffusions sont importantes, distinguer ces deux types de diffusion est notamment indispensable pour corriger atmosphériquement une image (c'est-à-dire passer d'un signal de luminance à un signal de réflectance du sol).

Dans l'équation du transfert radiatif, la diffusion de l'atmosphère s'exprime principalement à travers le terme de luminance atmosphérique L^{atm} et c'est ce terme qui sera examiné ici. La difficulté réside dans le fait que la présence de molécules de gaz modifie la diffusion des aérosols (par rapport à une atmosphère qui ne contiendrait pas de gaz) et inversement.

Plusieurs études ont été menées pour proposer un formalisme permettant de séparer, dans l'expression de la luminance atmosphérique, ces deux diffusions qui ne sont pas additives [15]. Par ailleurs, une étude visant à estimer l'importance relative de chacun de ces termes a été menée à partir de simulations effectuées avec Monte Carlo [16].

Dans les simulations présentées dans ce document, ce couplage diffusion particulaire/diffusion de Rayleigh est pris en compte par le code de transfert radiatif utilisé (voir paragraphe 2.4.4).

Diffusion particulaire et absorption moléculaire

Le deuxième phénomène de couplage qui intervient relie l'absorption moléculaire et la diffusion des aérosols. En effet, dans les bandes d'absorption d'un gaz, les aérosols peuvent avoir un effet diffusant non négligeable, particulièrement dans la partie réfléchive du spectre électromagnétique.

Ainsi, pour une même concentration de gaz, le pic d'absorption de ce dernier est moins profond si la concentration de particules est plus forte. Ce phénomène d'interaction peut être à l'origine d'erreurs significatives dans l'estimation des gaz à partir de données hyperspectrales. En effet, si la diffusion des aérosols est sous-estimée, les algorithmes qui estiment les concentrations de gaz à partir de la profondeur de leurs pics d'absorption vont avoir tendance à sous-estimer les concentrations des molécules. C'est pourquoi nous avons développé une méthode permettant l'estimation conjointe du CO₂ et des aérosols. Ceci fait l'objet du chapitre 4.

2.4.4 Outils de simulation développés

Pour ces travaux, une chaîne complète de modélisation a été développée pour simuler l'impact, sur un pixel hyperspectral, d'un panache constitué de gaz et d'aérosols. Les propriétés de ce panache (composition, altitude, température) sont complètement paramétrables par l'utilisateur. Les paragraphes suivants décrivent le fonctionnement de cette chaîne.

Transfert radiatif dans l'atmosphère

Pour simuler des signaux de luminance tels qu'ils seraient enregistrés par un capteur hyperspectral, nous avons utilisé le logiciel COMANCHE (COde de Modélisation pour l'ANalyse des Cibles Hyperspectrales vues en Entrée instrument [17]), développé par l'ONERA. Il s'appuie sur le code de transfert radiatif MODTRAN [18] de *l'Air Force Research Laboratory* (voir annexe B la description des principaux codes de transfert radiatif dans l'atmosphère).

Ce code simule le signal d'un pixel reçu par un capteur hyperspectral, mais également les différents termes de l'équation du transfert radiatif (voir équations 2.16 et D.1), en prenant en compte les conditions géométriques (position du Soleil, du capteur, altitude du pixel), les caractéristiques du sol (réflectance, température) et celles de l'atmosphère. L'atmosphère est décrite par un modèle météorologique et un modèle d'aérosols que l'utilisateur choisit, en fonction des conditions qu'il souhaite simuler. Le modèle atmosphérique définit les profils de gaz, de température et de pression et le modèle d'aérosols, le type de particules présentes dans les basses couches de l'atmosphère (entre 0 et 2km) et leur concentration. Cette concentration peut, par ailleurs, être modifiée par l'utilisateur grâce au paramètre de visibilité.

Cette visibilité VIS est définie comme étant la distance maximale à laquelle un observateur peut distinguer, à l'œil nu, un objet sombre à l'horizon. Cette visibilité est liée à l'extinction des aérosols à 550nm $k_{ext}(550)$ par la relation

$$VIS(km) = \frac{\ln(50)}{k_{ext}(550)(km^{-1}) + 0,01159(km^{-1})}, \quad (2.18)$$

où 0,01159 est le coefficient de diffusion de Rayleigh à 550nm. Elle définit donc la concentration des aérosols dans la couche basse de l'atmosphère.

Cependant, COMANCHE ne permettait, initialement, ni de considérer des aérosols différents des aérosols standard, ni de modifier les profils en altitude de ces aérosols ou des gaz autres que H_2O , CO_2 et O_3 . Nous y avons donc apporté des modifications pour rendre possible l'insertion, dans un modèle atmosphérique standard, d'un panache composé d'un ou plusieurs gaz et d'aérosols personnalisés. Ces modifications sont décrites ci-après.

Modélisation des aérosols

Les modèles standard d'aérosols prédéfinis dans MODTRAN sont :

- Les aérosols ruraux. Ils représentent les aérosols dans des zones continentales, non affectés par des sources urbaines ou industrielles. Ils sont modélisés par 70% de *water soluble* (sulfate d'ammonium et matières organiques) et 30% de *dust* (poussières minérales).
- Les aérosols urbains. Ils représentent des aérosols ruraux modifiés par l'émission de produits de combustion liés à des activités industrielles ou au chauffage urbain. Ils sont modélisés par un mélange de 80% d'aérosols ruraux et 20% de matières carbonée (*soot* ou suie).
- Les aérosols maritimes. Ce sont principalement des sels marins produits par l'évaporation de gouttelettes d'eau de mer. Ces sels peuvent être mélangés à des particules continentales. On les représente par un mélange de sels marins (*sea salt*) et d'aérosols ruraux auxquels on a enlevé les plus grosses particules (supposées être tombées du fait des mouvements de masses d'air au-dessus de l'océan).
- Les aérosols désertiques. Ce sont des particules principalement minérales, représentatives des régions arides et semi-arides.

Pour pouvoir intégrer des aérosols représentatifs d'un panache industriel, COMANCHE a donc été modifié afin d'ajouter, à un de ces modèles standard, des aérosols spécifiques, définis par leurs

propriétés optiques, entre deux altitudes paramétrables. Par ailleurs, le profil en altitude de ces aérosols est désormais modifiable par le biais d'un facteur d'échelle que l'utilisateur peut spécifier pour différentes altitudes.

Afin de calculer ces propriétés optiques, un code, reposant sur la théorie de Mie (cf. paragraphe 2.2.4), a été développé : COMPAS, pour COde de Modélisation d'un Panache d'AéroSols. Son fonctionnement est détaillé dans l'annexe C. Il permet d'obtenir l'ensemble des propriétés optiques d'un panache composé d'un ou plusieurs types de particules à partir des propriétés microphysiques de ces dernières (granulométrie et indice de réfraction). L'utilisateur peut choisir la loi de mélange (interne ou externe), ce qui permet de modéliser aussi bien des aérosols primaires que secondaires.

Modélisation des gaz

En ce qui concerne les profils de pression, température et gaz, six modèles atmosphériques sont prédéfinis dans MODTRAN :

- 1976 US Standard (latitudes moyennes)
- Tropical (latitude : 15° N)
- Mid-Latitude Winter (latitude : 45° N)
- Mid-Latitude Summer (latitude : 45° N)
- Sub-Artic Winter (latitude : 60° N)
- Sub-Artic Summer (latitude : 60° N)

COMANCHE ne permettait, initialement, que de modifier les profils de H₂O, CO₂ et O₃. Nous y avons donc apporté des modifications pour rendre possible l'insertion, dans un modèle atmosphérique standard, d'un panache de gaz situé entre deux altitudes z_1 et z_2 . L'utilisateur choisit un modèle standard et les altitudes z_1 et z_2 du panache. Ensuite, il choisit un ou plusieurs gaz parmi CO₂, CH₄, N₂O, CO, NO, SO₂, NO₂, NH₃ et HNO₃, indique leurs concentrations respectives (supposées constantes entre z_1 et z_2) et éventuellement une valeur de température. Les modifications apportées à COMANCHE permettent de modifier les profils standard (des gaz indiqués et de la température) correspondant au modèle choisi en ajoutant, aux valeurs par défaut, les valeurs entrées par l'utilisateur.

Chaîne complète de modélisation d'un panache de gaz et d'aérosols

Finalement, l'association de COMPAS (code de calcul des propriétés d'aérosols) et de notre version modifiée de COMANCHE (code de transfert radiatif) permet d'obtenir une chaîne complète de modélisation d'un panache pour l'imagerie hyperspectrale. La figure 2.4 synthétise le fonctionnement de cette chaîne de modélisation directe, qui a été utilisée pour chaque simulation présentée dans la suite du document.

2.5 Télédétection des panaches

Dans cette partie, nous dressons un état de l'art sur les méthodes de caractérisation, par télédétection, de gaz et d'aérosols.

Une littérature abondante existe sur le sujet. Nous avons donc distingué trois types d'études :

- celles qui utilisent des données spectroscopiques issues de satellites (à basse résolution spatiale) pour retrouver les profils des gaz atmosphériques,

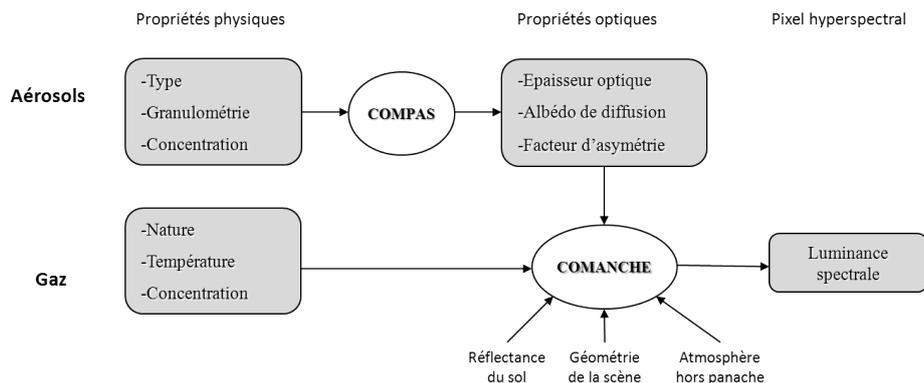


FIGURE 2.4 – Chaîne de modélisation directe développée pour l'étude de panaches.

- celles qui se focalisent sur la détection de rejets gazeux (et notamment industriels) à partir de données acquises par des caméras au sol ou aéroportées (spectro-imageurs à haute résolution spatiale),
- celles qui portent sur l'étude des aérosols par divers moyens de télédétection (lidar, photomètres, spectromètres).

2.5.1 Estimation des gaz à partir de données satellites

Les méthodes de caractérisation de gaz portent en grande majorité sur le domaine émissif du spectre électromagnétique (MWIR, entre 3 et $5\mu\text{m}$ ou LWIR, entre 8 et $14\mu\text{m}$), car c'est dans ces longueurs d'onde que la grande majorité des gaz possèdent leurs raies d'émission et d'absorption (voir paragraphe 2.3.1). Bien que nos travaux portent sur le VNIR-SWIR ($[0,4-2,5\mu\text{m}]$), nous présentons, dans ce paragraphe, quelques unes de ces études car les méthodes utilisées peuvent être transposables à un autre domaine de longueurs d'onde.

Plusieurs instruments embarqués sur des satellites ont permis, ou permettent encore, d'acquérir des données spectroscopiques dans l'infrarouge. Un des premiers était IMG (*Interferometric Monitor for Greenhouse Gases*) [19] qui se situait sur la plate-forme japonaise ADEOS jusqu'à sa destruction en 1997. Citons également MOPITT (*Measurements Of Pollution In The Troposphere*) [20], AIRS (*Atmospheric InfraRed Sounder*) [21] et TES (*Tropospheric Emission Spectrometer*) [22], respectivement embarqués sur les plates-formes EOS-Terra, EOS-Aqua et EOS-Aura de la NASA. Un des plus récents est IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) [23] qui se trouve sur le satellite européen Metop. Différentes techniques d'inversion ont été développées pour estimer, à partir de ces données, les profils, en altitude, des concentrations atmosphériques de différents gaz qui absorbent dans l'infrarouge, comme le CO, le CH₄ ou l'O₃ avec une très bonne précision (de l'ordre du pourcent pour le CO₂), du fait de la très haute résolution spectrale des données.

On peut distinguer, parmi ces méthodes d'inversion, deux types d'approches : celles qui reposent sur un modèle direct physique et celles qui sont purement statistiques. Les premières permettent de retrouver, outre la concentration en gaz recherchée, le profil de température dans l'atmosphère ainsi que l'émissivité et la température du sol. On peut notamment citer l'algorithme d'inversion du Laboratoire de Physique Moléculaire et Applications (LPMA) qui repose sur une modélisation directe du transfert radiatif puis utilise un algorithme classique de minimisation du type Levenberg-Marquardt (descente de gradient) [24]. D'autres méthodes utilisent des tables de recherche, ou *Look-Up Tables* (LUT) générées par des codes de transfert radiatif puis cherchent à minimiser les différences entre les spectres de la LUT et les données du capteur. C'est le cas notamment de l'algorithme du *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), développé pour des données TES [25]. Ce type d'algorithmes nécessite

un temps de calcul important pour générer la LUT mais ceci n'est fait qu'une fois et permet ensuite l'accélération du processus d'inversion grâce aux pré-calculs préalablement effectués. L'utilisation des LUT est particulièrement adapté aux modèles directs complexes et donc difficilement inversibles analytiquement.

Parmi les approches n'utilisant pas de modèle direct de transfert radiatif, les réseaux de neurones sont de plus en plus utilisés [26]. Ces derniers permettent de résoudre des problèmes de régression en estimant une fonction de transfert à partir d'un jeu de situations connues. L'inconvénient principal de ces méthodes est la nécessité de disposer d'informations *a priori* pour procéder à l'inversion.

Notons que les données acquises par ces satellites sont d'une résolution spatiale grossière (plusieurs kilomètres) et ne peuvent résoudre des objets de petite taille. Elles ne peuvent donc pas être exploitées dans le cadre de notre étude qui porte sur les panaches industriels dont la taille excède rarement quelques centaines de mètres. Cependant, les méthodes de traitement de signal utilisées pour l'inversion de ces données peuvent être adaptées pour l'estimation des concentrations en gaz, à partir d'images hyperspectrales mieux résolues spatialement.

2.5.2 Estimation des gaz à partir de données terrain ou aéroportées

Pour détecter et caractériser des panaches de gaz industriels, le spectro-imageur est l'outil le plus couramment utilisé car il offre un bon compromis entre une résolution spectrale assez fine pour l'observation de pics d'absorption (ou d'émission) et une résolution spatiale nécessaire pour repérer des objets de la taille d'un rejet gazeux (soit quelques mètres). Les imageurs hyperspectraux sont soit utilisés depuis le sol (c'est le cas de AIRS, pour *Adaptive Infrared Spectroradiometer*, Telops FIRST et CATSI, pour *Compact Atmospheric Sounding Interferometer*), soit embarqués à bord d'un avion (comme SEBASS et Telops Hyper-Cam [27]).

Là encore, la plupart des méthodes de détection et de caractérisation utilisent soit des algorithmes statistiques [28, 29] soit du filtrage adapté [30–32]. *Messinger* [33], par exemple, compare les performances de l'analyse par composantes principales, de la projection orthogonale et du filtre spectral adapté, dans le MWIR et le LWIR, pour la détection et l'identification d'effluents gazeux, à partir d'images hyperspectrales simulées. Une analyse reposant sur une transformation en ondelettes a aussi été proposée par *Mehta et al.* [34] pour l'estimation de la concentration en butanol, chlorométhane et isopropanol dans une vapeur chimique, à partir de données spectroscopiques. Les performances obtenues, d'après des données simulées, sont de l'ordre de 10%.

Dans les travaux concernant la caractérisation de fumées industrielles, une étude s'est plus particulièrement tournée vers l'estimation de la température d'un panache (*Jellison et Miller* [35]) en utilisant des critères sur des rapports d'émission et d'absorption. Enfin, quelques études proposent des modélisations radiatives directes d'un panache de gaz [36, 37] puis utilisent des algorithmes du type Levenberg-Marquardt pour remonter à l'estimation de concentrations en CO₂ ou CH₄ [38]. Notons cependant que ces méthodes n'ont pour l'instant été appliquées qu'à des données terrain (caméras sur trépied), qui permettent d'avoir une bien meilleure connaissance du sol et de l'atmosphère standard que dans le cas de prises de vues aéroportées.

Une autre méthode proposée pour estimer des concentrations gazeuses à partir d'images hyperspectrales consiste à déterminer empiriquement une relation entre la profondeur des pics d'absorption (ou d'émission) d'un gaz et sa concentration. L'algorithme CIBR (*Continuum Interpolated Band Ratio*) [39] repose sur ce principe. Un rapport de bandes est calculé entre la valeur du continuum de luminance et la luminance à la longueur d'onde du pic d'absorption. Puis, des simulations de luminances sont effectuées par un code de transfert radiatif avec différentes concentrations du gaz considéré pour déterminer une loi reliant la valeur du rapport de bandes à la concentration en gaz. Cette méthode, initialement conçue pour l'estimation de la vapeur d'eau, a été appliquée avec succès à l'estimation du CO₂ dans un panache volcanique [40] et à la détection de SO₂ dans une fumée industrielle [41].

Une version plus complexe de cet algorithme, mais mieux adaptée à des concentrations faibles de gaz, tient compte de l'influence des variations non linéaires de la réflectance du sol dans la relation qui relie la concentration d'un gaz et la profondeur de son pic d'absorption dans le signal de luminance. Il s'agit de la méthode JRGE (*Joint Reflectance and Gas Estimator*) [42]. Cette dernière utilise le code de transfert radiatif MODTRAN pour estimer les différents termes dus à l'atmosphère dans l'équation du transfert radiatif (équation 2.16) puis en déduit la réflectance du sol. En utilisant les canaux situés en-dehors du pic d'absorption, cette réflectance est interpolée de manière non linéaire. Dans la bande d'absorption, la différence entre la réflectance déduite des termes atmosphériques et celle interpolée est reliée à la concentration en gaz, ce qui permet d'estimer l'abondance du gaz pour chacun des pixels de l'image hyperspectrale. L'erreur d'estimation obtenue avec cette méthode est d'environ 3% pour la vapeur d'eau (contre 6% avec le CIBR) et 6% pour le CO₂.

De récentes études (*Thorpe et al.* [14]) ont également porté sur la détection de CO₂, mais aussi de CH₄ à partir d'images hyperspectrales aéroportées acquises dans le VNIR-SWIR. Elles mettent en œuvre des algorithmes de filtrage adapté pour reconnaître, dans les signaux de luminance des pixels, la signature spectroscopique de ces gaz et ainsi mettre en évidence la détection de rejets gazeux, naturels ou industriels.

2.5.3 État de l'art des méthodes d'estimation des aérosols

Comme nous l'avons déjà mentionné, les particules d'aérosols ont un impact radiatif particulièrement marqué pour les faibles longueurs d'ondes. C'est donc sur le domaine réflectif ([0,4-2,5µm]) que portent la majorité des méthodes visant à caractériser les aérosols.

Divers outils de télédétection, passifs (spectromètres ou photomètres) ou actifs (lidars), sont depuis des années utilisés pour observer l'atmosphère, et en particulier les aérosols. Ils peuvent être utilisés depuis des stations au sol ou embarqués dans des avions ou sur des satellites.

Sur Terre, de nombreuses stations scientifiques d'observation sont dédiées à l'étude des aérosols. Elles sont regroupées au sein de réseaux dont les plus connus sont AERONET³ (*AERosol RObotic NETwork Sun-photometers*) pour les stations équipées de photomètres et EARLINET⁴ (*European Aerosol Research LIdar NETwork*) pour celles qui utilisent des lidars. Des algorithmes d'inversion ont ainsi été développés pour permettre de déterminer quels types d'aérosols composent l'air qui entoure les stations, à partir des données enregistrées par celles-ci [43, 44].

Les observations à l'échelle d'une région, d'un continent ou du globe sont réalisées par des satellites. Citons notamment AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), GOME (*Global Ozone MonitorinG Experiment*), TOMS (*Total Ozone Monitoring Spectrometer*), MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectrometer*) ou MISR (*Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*), qui permettent d'obtenir des informations plus ou moins précises sur l'épaisseur optique. L'utilisation de la polarisation de la lumière par les satellites POLDER (*POLarization and Directionnaly of the Earth's Reflectance*) et EOSP (*Earth Observing Scanning Polarimeter*) a également permis de remonter à des informations plus précises comme la taille ou l'indice de réfraction des particules. Pour plus d'informations concernant l'observation des aérosols depuis l'espace, nous renvoyons le lecteur à l'article très complet de *King et al.* : *Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space : Past, Present and Future* [45].

Cependant, l'étude des aérosols primaires, avant vieillissement photochimique, nécessite des observations au plus près de leurs sources, donc à l'échelle d'un site et non d'une région ou d'un continent. L'utilisation de spectro-imageurs (ou capteurs hyperspectraux) embarqués à bord d'un avion permet d'obtenir à la fois une bonne résolution spatiale et spectrale, et donc de caractériser des aérosols issus d'une source déterminée avant qu'ils ne se mélangent à ceux naturellement présents dans l'atmosphère (les aérosols dits de fond).

³<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

⁴<http://www.earlinet.org/>

En utilisant ce type d'imagerie, la méthode L-APOM (*LUT - Aerosol Plume Optical Model*) décrite par *Alakian et al.* [46] permet de déterminer la concentration des particules dans un panache de feu de végétation, mais également leur taille et la proportion de suie dans le mélange d'aérosols. Elle utilise une base de spectres de luminance générée par le code de transfert radiatif MODTRAN pour une atmosphère contenant une couche d'aérosols ayant différentes propriétés microphysiques. Ensuite, pixel à pixel, le spectre enregistré par le capteur est comparé à chacun des spectres contenus dans la base préalablement générée. L'élément de la base qui, lorsqu'on le compare au spectre mesuré, minimise l'erreur quadratique est retenu. On remonte ensuite aux propriétés microphysiques des aérosols en retrouvant les paramètres d'entrée qui ont permis de générer ce spectre. Des contraintes spatiales ont également été implémentées pour limiter les disparités dans les propriétés obtenues pour des pixels proches.

Une autre approche, dite des surfaces sombres, a été développée par *Kaufman et al.* [47]. Elle consiste à observer des pixels pour lesquels le sol a une réflectance faible dans le visible (des zones de végétation par exemple). Pour ces pixels, le signal de luminance enregistré provient essentiellement de la luminance atmosphérique et donc la contribution des aérosols est maximale. Ensuite, à $0,49\mu\text{m}$ et $0,66\mu\text{m}$, l'épaisseur optique des aérosols est déduite du signal enregistré à l'aide d'une inversion par LUT. Enfin, l'épaisseur optique est estimée sur l'ensemble du spectre visible grâce à une extrapolation suivant la loi d'Angström [48]

$$\tau(\lambda) = \tau_0 \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{-\alpha} \quad (2.19)$$

où α est le coefficient d'Angström et τ_0 est l'épaisseur optique à la longueur d'onde λ_0 . Comme on connaît τ pour deux longueurs d'onde distinctes, il est possible de déterminer α , puis d'en déduire l'épaisseur optique pour toutes les autres longueurs d'onde. La limitation principale de la méthode réside dans la nécessité d'avoir des zones de couvert végétal sur l'image étudiée, ce qui est rarement le cas pour des sites industriels.

Enfin, lorsqu'on dispose d'au moins deux images d'une même scène, l'une acquise en ciel clair et l'autre en présence d'aérosols, il est possible d'appliquer la méthode dite de réduction de contraste [49]. Celle-ci suppose que la différence des réflectances en entrée capteur, obtenues pour deux pixels adjacents, est uniquement fonction de la transmittance atmosphérique et de la réflectance du sol sous les deux pixels. L'image en ciel clair permet d'estimer ces réflectances du sol, et donc de n'extraire que le terme dû à la transmittance. Enfin, il est possible de relier ce terme à la concentration en aérosols. Cette méthode, cependant, suppose que pour les deux pixels considérés, les termes atmosphériques sont identiques, ce qui n'est généralement pas le cas en présence d'un panache, qui peut contenir des concentrations en gaz et en particules très variables d'un pixel à l'autre.

2.5.4 Démarche adoptée

L'objectif de ce travail consiste à développer une méthode qui permette de caractériser les constituants solides et gazeux d'un panache industriel par télédétection. Ce premier chapitre, en décrivant les propriétés physiques et radiatives des aérosols et des gaz, les phénomènes de transfert radiatif dans l'atmosphère et en dressant un rapide état de l'art, permet de comprendre la démarche adoptée pour atteindre cet objectif.

Nous avons vu que les aérosols industriels pouvaient d'une part retomber au sol assez rapidement du fait de la gravité, d'autre part subir des modifications importantes de leurs propriétés microphysiques et optiques suite à des interactions avec les autres aérosols et avec les gaz atmosphériques. Pour caractériser l'activité d'un site industriel à partir de ses émissions, il est donc important d'étudier les panaches au plus près de leurs points d'émission.

Or, l'étude de ces panaches dont la taille excède rarement quelques centaines de mètres nécessite d'avoir recours à des imageurs ayant une bonne résolution spatiale (de 1 à quelques mètres). De plus, la détection et l'identification d'espèces gazeuses requiert l'accès à des données spectroscopiques,

c'est-à-dire à des données ayant une bonne résolution spectrale (une dizaine de nanomètres). Les seuls appareils de télédétection répondant à ces deux contraintes sont les capteurs hyperspectraux (ou spectro-imageurs) aéroportés. Ce sont donc ceux que nous utiliserons dans cette étude.

Pour l'étude des panaches industriels, un manque évident de données concernant les propriétés des particules anthropiques proches de leur point d'émission est apparu. Afin de pouvoir étudier le plus grand nombre de panaches industriels possibles, notamment ceux issus des usines métallurgiques (secteur industriel particulièrement émetteur d'effluents atmosphériques), il est donc nécessaire de connaître les propriétés physiques et optiques des aérosols métalliques. Ainsi, un modèle physique d'aérosol adapté aux usines métallurgiques pourra être développé et leur impact radiatif étudié. C'est l'objet du chapitre 3.

Par ailleurs, nous avons rappelé qu'il existait de nombreuses interactions entre les aérosols et les gaz. Dans le cadre de l'étude d'un panache, dans lequel la concentration en particules peut être élevée, ces interactions peuvent fausser les estimations de concentrations gazeuses effectuées à partir d'images hyperspectrales. Le quatrième chapitre propose donc une méthode permettant d'estimer conjointement un gaz d'intérêt et les propriétés des aérosols.

Enfin, un nouvel algorithme de traitement d'images hyperspectrales a été développé pour pouvoir inverser les propriétés des aérosols industriels et en estimer le type, en prenant en compte les spécificités des zones industrielles. Cette méthode a été validée sur des données simulées puis appliquée à une image hyperspectrale aéroportée, acquise au-dessus d'une usine métallurgique. Le chapitre 5 présente cette dernière étude.

2.6 Conclusion

Ce premier chapitre a rappelé les bases physiques nécessaires à la compréhension de l'impact d'un panache dans une image hyperspectrale. Les spécificités des aérosols et des gaz industriels ont été discutées, ce qui a permis de mettre en évidence un manque de données concernant les particules anthropiques, notamment celles émises par les industries métallurgiques.

Les équations du transfert radiatif ont ensuite été présentées, pour le domaine réfléchissant du spectre électromagnétique, ainsi que la chaîne complète de modélisation qui a été développée. Enfin, un état de l'art des méthodes de caractérisation des gaz et des aérosols par télédétection a été dressé et a montré que les méthodes existantes n'étaient adaptées ni à l'estimation conjointe des aérosols et des gaz dans un panache, ni au cas spécifique des effluents industriels.

Chapitre 3

Caractérisation des propriétés radiatives d'aérosols émis par une industrie métallurgique

3.1 Introduction

Les aérosols anthropiques d'origine industrielle sont de natures très diverses car dans la grande majorité des secteurs industriels, on trouve des émissaires de ces particules fines. De plus, comme cela a été expliqué précédemment, ces aérosols subissent des modifications importantes et rapides de leurs propriétés physiques du fait des interactions qui se produisent avec les autres constituants de l'atmosphère (aérosols de fond et gaz). Il n'est donc pas envisageable de proposer un modèle décrivant les propriétés physiques et optiques d'un aérosol industriel qui soit valable pour tous les types d'industrie, proche et loin de la source d'émission. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux aérosols présents dans des panaches issus d'usines, donc à une distance relativement restreinte de la source d'émission (*i.e.* entre la source et quelques centaines de mètres en aval). Quant au choix du secteur industriel, il est légitime d'examiner en priorité les émissaires les plus importants d'aérosols.

L'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des risques) publie chaque année le Registre Français des Emissions Polluantes qui recense les données fournies par les exploitants d'installations industrielles, de stations d'épuration et d'élevages concernant leurs émissions dans l'air, l'eau et le sol, et notamment les PM10, c'est-à-dire les aérosols de taille inférieure à $10\mu\text{m}$. La répartition des émissions de PM10 par secteur industriel pour l'année 2010 est présentée figure 3.1. On remarque que la majeure partie des aérosols industriels sont émis par le secteur de l'énergie. Il s'agit majoritairement de centrales thermiques, qui émettent des particules carbonées (dont les indices de réfraction sont connus) provenant de la combustion de fioul ou de charbon.

Néanmoins, si l'on regarde plus précisément quels sites industriels émettent le plus de PM10 en France (voir tableau 3.1), on remarque que le premier émissaire est une industrie métallurgique. Or les particules émises par ce type d'industrie sont des mélanges composés notamment d'oxydes métalliques, dont les propriétés optiques et radiatives sont largement méconnues. En effet, les bases de données qui regroupent des informations sur les propriétés physiques et optiques des aérosols (comme GEISA-aérosols [4] ou OPAC [5]) ne renseignent pas sur ce type de particules. Or, pour pouvoir estimer les propriétés physiques des aérosols émis par ces industries à partir d'images hyperspectrales, il est nécessaire de connaître la nature de ces aérosols, ainsi que certaines de leurs propriétés optiques, comme l'indice de réfraction complexe.

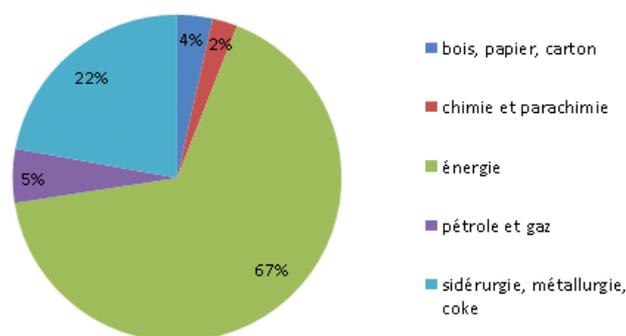


FIGURE 3.1 – Répartition des émissions de PM10 en France par secteur industriel, d'après les déclarations 2010 (données 2007) [Source : Registre Français des Emissions Polluantes, INERIS].

Nom de l'établissement	Emission (kg/an)	Activité
ArcelorMittal Fos-sur-Mer	1 200 000	Sidérurgie, métallurgie, coke
Site de production thermique de Blenod	822 000	Énergie
Unité de production thermique du Havre	675 000	Énergie
Centrale de Bellefontaine	456 000	Énergie
Centre de production thermique de Bouchain	291 000	Énergie
Centrale de Jarry-Nord	254 000	Énergie
Fibre Excellence Tarascon	189 000	Bois, papier et carton
Petroplus Raffinage Petit-Couronne SAS	177 000	Pétrole et gaz
E.ON - Centrale Émile Huchet	170 000	Énergie
Centrale électrique de pointe des carrières	163 000	Énergie

TABLE 3.1 – Liste des 10 premiers émetteurs nationaux de PM10, d'après les déclarations 2010 (données 2007) [Source : Registre Français des Émissions Polluantes, INERIS].

C'est pourquoi nous avons entrepris de mener une étude, en collaboration avec le Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (LPCA) de l'Université du Littoral-Côte d'Opale, pour combler ce manque de données sur les particules émises par les industries métallurgiques. Tout d'abord, des aérosols ont été collectés dans les cheminées d'une usine de la zone industrielle de Dunkerque et dans son environnement, en différents points. Puis, ces aérosols ont été analysés en laboratoire et envoyés au Département d'Optique Théorique et Appliquée de l'ONERA à Toulouse pour que leurs propriétés optiques soient mesurées. Enfin, leurs propriétés radiatives ont pu être simulées, analysées et comparées avec les données de la littérature. Ce travail est détaillé dans la suite de ce chapitre.

3.2 État de l'art des études portant sur les aérosols industriels

Les études portant sur l'estimation des propriétés des aérosols émis par les industries sont rares, ce qui justifie le travail que nous avons mené et qui est présenté dans les paragraphes suivants. Plus précisément, plusieurs études ont eu pour objet l'estimation des propriétés physiques et optiques d'aérosols anthropiques, mais la plupart ont porté sur des aérosols étudiés loin de leurs sources d'émission, et qui sont donc, en fait, des mélanges de particules urbaines et d'aérosols industriels sans que l'on puisse déterminer précisément de quel type d'industries ils proviennent. C'est le cas

des études menées suite aux campagnes TARFOX, SCAR-A (aux Etats-Unis) et ESCOMPTE (en France), citées au paragraphe 2.2.5. C'est également le cas des aérosols de la région très industrialisée du delta de Pearl River en Chine [50]. Les aérosols ainsi étudiés se sont révélés être des mélanges de matières organiques, carbonées et de sulfates. Ce type de mélange n'est pas représentatif de ce que l'on peut trouver dans un panache émis par une industrie métallurgique. Ainsi, les modèles tels que celui proposé par *Remer et Kaufman* [51] (mélange de sels marins, de poussières minérales, de matières organiques et d'aérosols stratosphériques) ne sont pas valables pour les aérosols industriels proches de leur source.

De plus rares études ont été menées sur des aérosols spécifiquement industriels. Citons notamment les travaux de *Annegarn et al.* [52] sur les particules émises par une centrale électrique en Afrique du Sud et ceux de *Mather et al.* [53] portant sur un panache émis suite à l'explosion d'un site de stockage de pétrole. Cependant, dans ces deux cas, les aérosols étudiés étaient majoritairement des suies. Une étude portant sur des aérosols industriels métalliques dans la région de Mexico a été publiée par *Moffet et al.* [54] en 2007, mais il s'agissait principalement de plomb et de zinc provenant d'une usine d'incinération de déchets. Les analyses physico-chimiques présentées dans ces études ne sont donc pas non plus utilisables dans le cas de l'étude d'une usine métallurgique, qui rejette majoritairement des particules composées d'oxydes métalliques.

Pour notre étude, nous avons donc choisi de prélever des particules directement dans les filtres des cheminées d'une usine métallurgique, puis dans l'air, à quelques centaines de mètres de la source.

3.3 Site d'étude et échantillons collectés

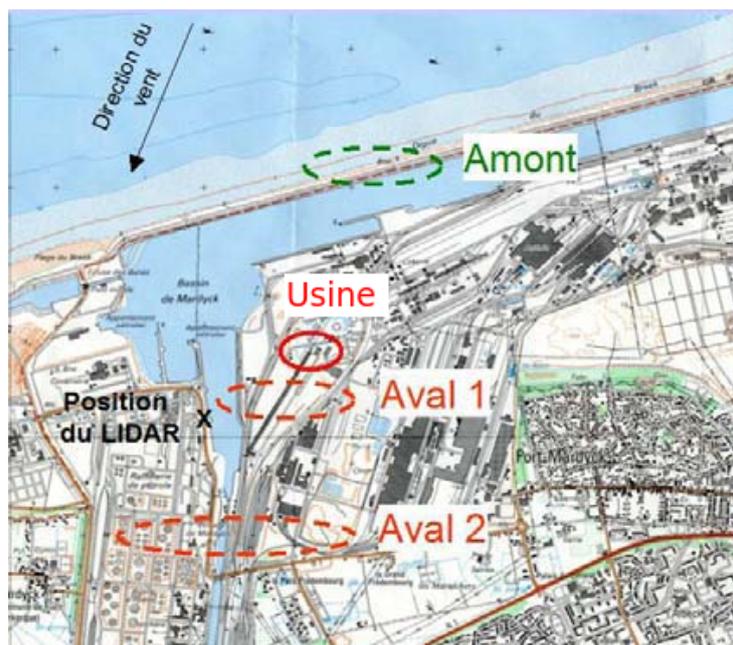
Le site d'étude est une usine fabriquant des alliages de fer (Fe) et de manganèse (Mn), située dans la zone industrielle de Dunkerque. Le procédé de fabrication utilise un mélange de manganèse et de minerais comme matière première et comporte trois étapes principales. Tout d'abord a lieu l'agglomération, qui s'opère à une température allant de 400°C pour l'étape de cuisson à 100°C pour celle de refroidissement, et qui a pour but de transformer la matière première en grains qui s'agglomèrent entre eux puis qui sont concassés. La seconde étape est la production d'un alliage Fe-Mn dans un haut-fourneau à 1400°C. L'alliage fondu est ensuite coulé à intervalles réguliers puis découpé. La dernière étape consiste à broyer et filtrer l'alliage solidifié à température ambiante.

Deux cheminées se trouvent au niveau de l'atelier d'agglomération (l'une au niveau de l'unité de cuisson, cheminée A, l'autre sur celle de refroidissement, cheminée B). La troisième et dernière cheminée (cheminée C) est située sur l'unité de coulée. Ces cheminées sont visibles sur l'image de la figure 3.2(a). Les deux tiers des gaz et des particules émis par l'étape d'agglomération passent par la cheminée A. Des filtres électrostatiques sont placés dans cette cheminée pour retenir les plus grosses particules, qui sont ensuite réutilisées dans le procédé d'agglomération. Cependant, 3 tonnes de particules sont tout de même rejetées chaque année par cette cheminée. La cheminée B comporte, elle, des filtres mécaniques (dits cyclones), bien moins efficaces. Cette cheminée est donc l'émissaire de particules le plus important du site avec 32 tonnes de particules émises chaque année. La cheminée C est équipée de filtres à manche. Elle est la moins émissive, avec 0,6 tonnes de particules émises annuellement. Les cheminées de l'atelier d'agglomération rejettent des particules de manière continue alors que celle de l'atelier de coulée émet pendant 2 heures toutes les 6 heures.

La campagne que nous avons organisée sur ce site s'est déroulée sur trois jours, entre mai et juin 2010. Deux types d'échantillons ont été prélevés. Pour la caractérisation des propriétés optiques, des quantités de matières de l'ordre du gramme sont requises. De grandes quantités ont donc été prélevées dans les filtres des cheminées A, B et C (environ 500g). Par ailleurs, des particules ont également été prélevées en amont du site, et dans le panache, à 500m et 1500m en aval de la source (le panache ayant préalablement été localisé à l'aide de données lidar). L'expérience est décrite dans *Marris et al.* [55]. Les lieux de prélèvements d'échantillons sont indiqués sur la figure 3.2(b).



(a) Photo de l'usine métallurgique étudiée.



(b) Localisation des sites de prélèvements des aérosols.

FIGURE 3.2 – Site d'étude.

3.4 Matériels et méthodes

3.4.1 Analyse physico-chimique

Les distributions en taille des particules collectées dans les filtres ont été mesurées à l'aide d'un analyseur par diffraction laser (LSTM 13320 MW - Beckman Coulter) pour les particules dont le diamètre est compris 17nm et 20µm. Les particules ont été mises en solution dans de l'eau déminéralisée et mélangées avec une sonde échographique avant les mesures.

En complément de ces mesures granulométriques, deux sortes d'analyses chimiques ont été effectuées. La première consiste à analyser la composition du mélange de particules d'un point de vue global. Pour cela, quelques grammes de particules sont déposés sur un bâtonnet de carbone de 1cm², qui est ensuite analysé à l'aide d'un microscope à balayage électronique. La seconde est une analyse plus fine de la composition d'une particule. Elle nécessite, dans un premier temps, d'extraire du reste du mélange des particules dont le diamètre est compris entre 0,1 et 1,0µm, ce qui est fait à l'aide d'un impacteur en cascade (DekatiTM PM₁₀). Ensuite, le microscope à balayage électronique est à nouveau utilisé, ainsi qu'un système de micro-analyse commercial (Link ISIS Series Microanalysis system, Oxford Instruments[®]). La méthodologie est donnée plus en détail dans *Choël et al.* [56].

3.4.2 Mesure des propriétés optiques

Les propriétés optiques des particules ont été mesurées à l'aide de Mélopée Lab. Ce banc de mesure de l'ONERA permet d'étudier les propriétés optiques angulaires et spectrales d'un milieu. Équipé d'une source laser super-continuum, il permet de caractériser les propriétés optiques des matériaux. Ses caractéristiques sont données dans *Ceolato et al.* [57]. Cette source permet de convertir la lumière d'un laser (à une longueur d'onde fixée) en une lumière à plus large spectre. Ce banc permet de mesurer la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), en différents angles et différentes longueurs d'onde (voir le schéma de la figure 3.3).

La BRDF est donnée par

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{d\xi_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)}, \quad (3.1)$$

où dL_r est la luminance spectrale réfléchie, $d\xi_i$ l'éclairement spectral incident, λ la longueur d'onde, θ_i , ϕ_i et θ_r , ϕ_r correspondent respectivement aux angles d'incidence et de réflexion. Elle décrit la manière dont la lumière est réfléchie angulairement et spectralement par un échantillon illuminé sous différents angles. C'est une signature optique unique d'un matériau. Dans le cas des aérosols, cette fonction est directement liée à la distribution en taille et à l'indice de réfraction des particules.

Les échantillons d'aérosols prélevés dans les filtres des cheminées A et B ont été mis en solution et mélangés à l'aide d'une sonde échographique. Les BRDF de ces solutions ont ensuite été mesurées. Le matériel actuel ne permettant pas, aujourd'hui, d'inverser simultanément plusieurs longueurs d'onde, quatre longueurs d'onde ont été choisies dans le visible, correspondant à des émissions classiques de laser. Pour relier les BRDF aux propriétés microphysiques des particules, le code Metropol [58] a été utilisé. Il permet de simuler des BRDF, connaissant la description de la source laser ainsi que la concentration, la distribution en taille, la forme et l'indice de réfraction des particules.

3.4.3 Simulation de l'impact radiatif

La simulation des propriétés radiatives du panache d'aérosols a été effectuée en utilisant le code COMPAS (voir annexe C). Pour l'utilisation de ce code, il est nécessaire de connaître la concentration et la distribution en taille des particules dans le panache, mais également l'indice de réfraction du mélange d'aérosols. Si les deux premiers paramètres ont été mesurés à partir des échantillons prélevés dans le panache, les propriétés optiques (et donc l'indice de réfraction du mélange) n'ont pas pu être

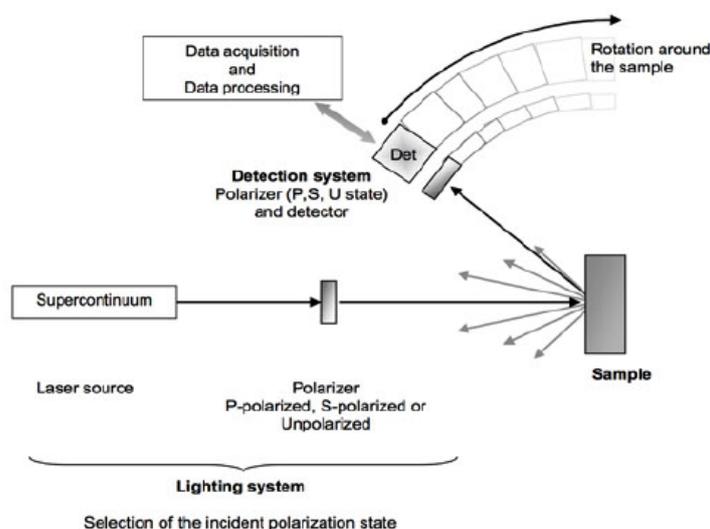


FIGURE 3.3 – Schéma de fonctionnement de Mélopée Lab.

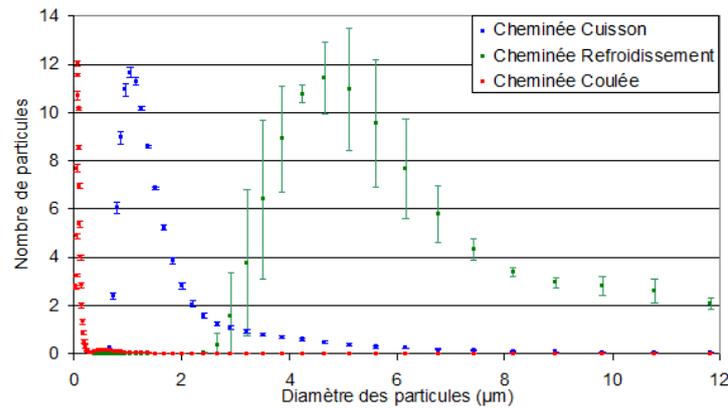
estimées à partir de ces mêmes échantillons car la quantité de matière prélevée était très insuffisante. Comme cela a donc été mentionné, les mesures optiques ont été effectuées sur les particules collectées dans les filtres des deux principales cheminées.

Nous avons donc supposé que les particules prélevées dans les filtres étaient de même composition que celles qui s'échappaient des cheminées. Pour simuler l'impact radiatif du panache plus loin de la source, nous avons considéré que les aérosols du panache étaient des mélanges d'aérosols « standard » (aérosols naturels ou anthropiques loin de leurs sources d'émission) et de particules directement issues des cheminées de l'usine. Pour les aérosols « standard » les indices de réfraction de la base de donnée OPAC [5] ont été utilisés. Pour les autres, nous avons utilisé les indices estimés à partir des mesures effectuées grâce à Mélopée Lab.

3.5 Analyse physico-chimique des particules prélevées dans les filtres

La figure 3.4 présente les résultats de l'analyse de la distribution en taille obtenus pour les particules prélevées dans les filtres des cheminées. Bien entendu, la granulométrie des ces particules est très différente de celle des aérosols effectivement rejetés dans l'atmosphère car les filtres ne laissent passer que les plus petites particules, mais c'est une donnée nécessaire à l'estimation des propriétés optiques (voir paragraphe suivant). Pour les particules des filtres, on remarque une distribution monomodale, centrée autour de $5\mu\text{m}$ pour la cheminée B, $1\mu\text{m}$ pour la cheminée A et 70nm pour la cheminée C. Ces valeurs correspondent vraisemblablement aux diamètres de coupure des filtres.

La composition élémentaire des particules prélevées dans les filtres est présentée figure 3.5(a). On retrouve les éléments constitutifs des matières premières utilisées dans le procédé industriel : le carbone provient de la coke qui est utilisée comme agent réducteur, Al et Si sont présents dans la gangue (enveloppe) des minéraux et Ca vient de la chaux. Mn est l'élément métallique majoritaire, ce qui est cohérent car la matière première principale utilisée est un mélange de manganèse. Une analyse fine des particules de la cheminée de refroidissement (cheminée B) a également été effectuée. Les résultats sont présentés figures 3.5(b) et 3.5(c). On remarque que le mélange est constitué de 15% de particules d'aluminosilicates, 21% de particules métalliques et 53% de particules mixtes aluminosilicates-métalliques. Les concentrations relatives et la composition élémentaire des ces différents types de particules sont en cohérence avec les résultats de l'analyse globale de la figure 3.5(a).

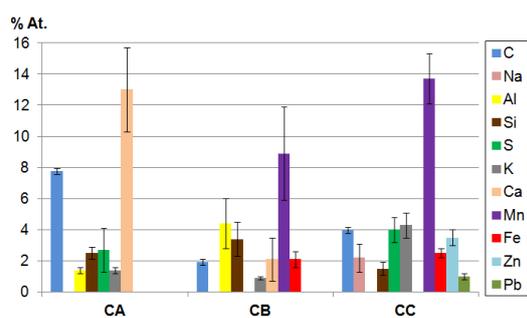
FIGURE 3.4 – *Distribution en taille des échantillons collectés dans les filtres.*

Si l'on observe la composition élémentaire moyenne à l'échelle de la particule, on remarque que les particules métalliques (contenant Mn et Fe) semblent toujours être associées au même type d'aluminosilicate. En effet, le diagramme de la figure 3.5(c) indique que les particules d'aluminosilicates ont un rapport Al/Si quasi-constant et une quantité variable de Mn et Fe. Ces observations suggèrent que les particules mixtes Al-Si/(Mn+Fe) sont essentiellement constituées d'oxydes de fer et manganèse purs intimement mélangés avec des aluminosilicates de compositions élémentaires identiques (Al/Si = 1).

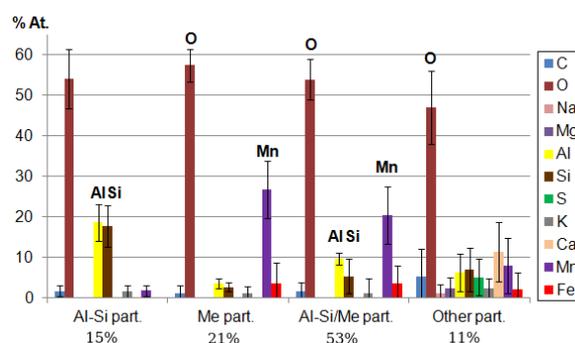
En ce qui concerne les autres points d'émission, les particules prélevées dans les filtres de la cheminée A sont principalement constituées de calcite et d'aluminosilicates. La cheminée C, elle, rejette des particules qui sont principalement métalliques. La figure 3.5(d) résume les différents types de particules présents dans chacun des échantillons. Cependant, pour toutes ces cheminées, les compositions identifiées à partir des échantillons collectés dans les filtres sont très similaires à ceux des aérosols émis par ces cheminées. Nous supposons donc, pour cette étude, que les indices de réfraction estimés à partir des particules des filtres sont représentatifs des aérosols émis, dans l'atmosphère, par chacune de ces cheminées. Dans la suite, seuls les aérosols émis par les cheminées A et B (émissaires principaux du site) seront considérés.

3.6 Propriétés optiques des aérosols

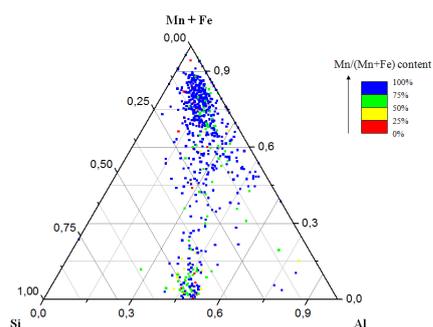
Afin d'étudier les propriétés optiques des aérosols, les BRDF des échantillons collectés ont été d'abord mesurées par le Mélopée Lab, puis simulées à l'aide du code Metropol. Enfin, les données ont été comparées pour estimer les indices de réfraction des mélanges d'aérosols. La distribution en taille et la composition chimique des aérosols de chaque échantillon, issues de l'étude décrite dans le paragraphe précédent, ont été utilisées comme données d'entrée pour le code Metropol [58]. La seule inconnue était l'indice de réfraction complexe du mélange. Ce paramètre a été itérativement modifié. Les valeurs d'indices estimées sont celles qui minimisent l'erreur entre les BRDF mesurées et simulées.



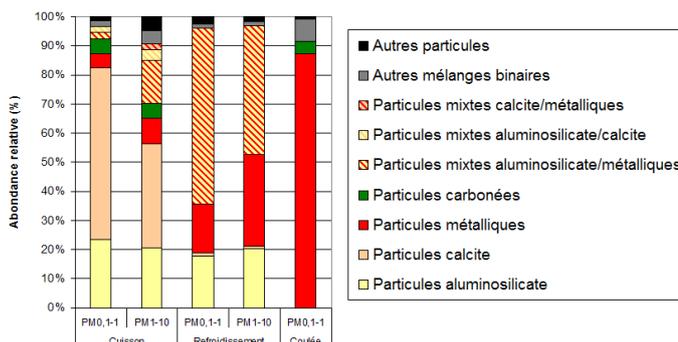
(a) Analyse des éléments déterminés par microscope à balayage électronique pour les échantillons prélevés dans les filtres.



(b) Concentrations relatives des particules individuelles et composition élémentaire moyenne des particules prélevées dans la cheminée B.



(c) Diagramme ternaire Al-Si-(Mn+Fe) pour les particules prélevées dans la cheminée B.



(d) Composition des différents échantillons prélevés.

FIGURE 3.5 – Analyse chimique des échantillons effectuée par le Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (LPCA).

La figure 3.6 présente les BRDF mesurées et simulées pour l'échantillon de la cheminée A à quatre longueurs d'onde. Pour les quatre longueurs d'onde, les BRDF simulées et mesurées sont très proches (dépendance angulaire et niveau de diffusion), excepté pour les forts angles de diffusion. Les différences observées aux extrémités s'expliquent par le procédé de calibration du banc de mesure. Cependant, la bonne adéquation de ces courbes montre que l'indice de réfraction choisi est proche de l'indice réel du mélange d'aérosols. Ces indices estimés, pour les deux échantillons, sont donnés tableau 3.2. La précision de ces estimations est d'environ 0,005 pour la partie réelle et 0,05 pour la partie imaginaire.

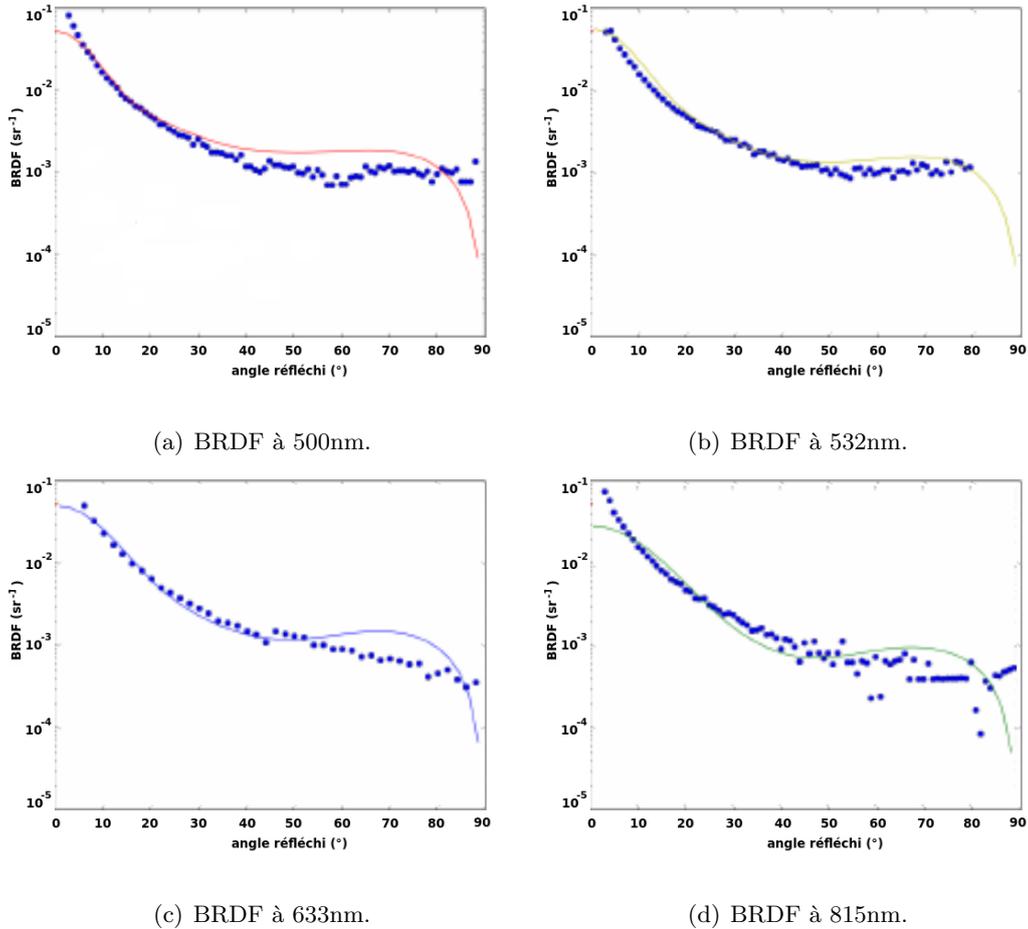


FIGURE 3.6 – BRDF mesurées (pointillés) et simulées (traits pleins) pour les particules de la cheminée A (cuisson) par le Département d'Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA.

Longueur d'onde (nm)	Indice de réfraction de l'échantillon A	Longueur d'onde (nm)	Indice de réfraction de l'échantillon B
500	1,57	532	1,85+0,3i
532	1,55	633	1,90+0,4i
633	1,55	727	1,83+0,5i
815	1,53	800	1,80+0,6i

TABLE 3.2 – Indices de réfraction estimés à partir des mesures de BRDF.

Les aérosols issus de la cheminée de cuisson sont principalement constitués de calcites et d'aluminosilicates (cf. figure 3.5(d)). La partie imaginaire de l'indice de réfraction de ce mélange est proche de 0 car l'absorption de ce type de particules est très faible [59]. La partie réelle, qui est légèrement supérieure à 1,55 avec une légère décroissance spectrale dans le visible, est en accord avec les données de la littérature [59] (indice de la calcite et celui de la kaolinite, qui est un aluminosilicate). Pour les aérosols provenant de la cheminée de refroidissement, l'absorption mesurée est bien plus forte. En effet, ce mélange d'aérosols est constitué principalement de particules métalliques, d'aluminosilicates et d'agrégats métalliques/aluminosilicates. Or, les oxydes métalliques absorbent fortement la lumière dans le visible et le proche-infrarouge.

Pour cet échantillon, la comparaison des valeurs obtenues pour ces indices avec les données de la littérature est délicate. En effet, comme nous l'avons rappelé, il n'existe pas, à ce jour, de données publiées sur des aérosols métalliques industriels. Nous pouvons cependant nous pencher sur d'autres types d'études. Notons par exemple que l'augmentation de la partie imaginaire de l'indice avec la longueur d'onde est en accord avec les observations de *Li et al.* [60] portant sur des films métalliques. De même, cette évolution de l'indice de réfraction a également été notée par *Ordal et al.* [61]. Cependant, les données existantes sur les aérosols minéraux métalliques (comme l'hématite, qui est un oxyde de fer) indiquent au contraire une décroissance de l'indice de réfraction entre 400 et 800nm [59]. Il semble donc, en ce qui concerne les indices de réfraction, que les données existantes sur les aérosols métalliques d'origine minérale ne puissent pas être utilisées pour notre étude. Pour simuler l'impact radiatif d'un panache sortant d'une usine métallurgique, nous utiliserons donc, désormais, les indices de réfraction provenant de la base de données OPAC pour décrire les aérosols de fond, et les indices du tableau 3.2 pour les aérosols émis par l'usine.

3.7 Impact radiatif du panache

Pour simuler l'impact radiatif du panache en différents points, nous avons utilisé les mesures de distribution de taille et de composition chimique effectuées sur les aérosols, dans l'air, en trois points : en amont de l'usine, à 500m en aval et à 1500m en aval. Ces résultats sont présentés figure 3.7. A partir des données de la figure 3.7(b), cinq modèles de mélanges d'aérosols ont été proposés, correspondant aux trois points de prélèvement et aux deux cheminées A et B qui sont les principaux émissaires de particules de l'usine. A partir de ces modèles de mélange et de la distribution de taille de la figure 3.7(a), le code COMPAS a été utilisé pour simuler les propriétés radiatives du panache en ces différents points.

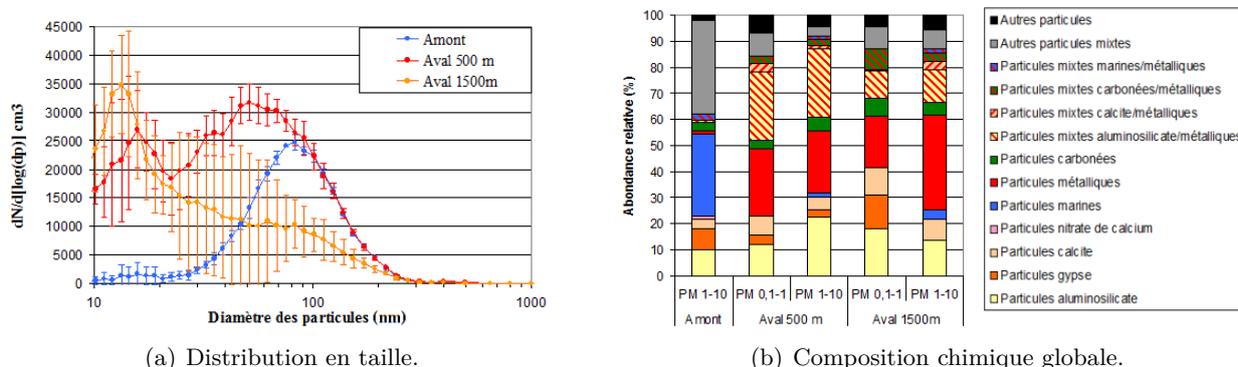


FIGURE 3.7 – Analyse physico-chimique des aérosols prélevés dans l'environnement [55].

Pour représenter les aérosols qui ne sont pas issus de l'usine, nous avons choisi d'utiliser les modèles de la base de données OPAC. Pour cela, il est nécessaire de faire le lien entre les différents types de particules identifiés par l'analyse chimique de la figure 3.7(b) et les types d'aérosols présents

dans la base de donnée OPAC. Voici les correspondances que nous avons pu établir :

- les particules marines correspondent aux *sea salts* de la base de donnée OPAC,
- les particules mixtes et autres particules sont du type *water soluble*,
- la calcite, le gypse et les aluminosilicates sont de type *insoluble*,
- les particules carbonées correspondent aux aérosols de type *soot* de la base de donnée OPAC.

3.7.1 Établissement de modèles de mélange des aérosols

En amont

Les données obtenues pour les particules prélevées en amont du site industriel permettent de proposer un modèle représentant les aérosols de fond. Pour ces particules, la distribution de taille s'apparente à une loi bimodale avec un mode fin, peu visible, autour de 15nm, et un mode plus grossier, prépondérant, autour de 80nm. Ce mode grossier est dû à la forte présence de sels marins, car l'échantillon a été collecté en bord de mer (voir figure 3.2(b)). Nous avons donc choisi, pour décrire la granulométrie de ces particules, d'utiliser une loi lognormale monomodale, qui tient compte du mode grossier largement prépondérant (l'impact radiatif du mode fin, dans ces proportions, étant négligeable). Le rayon modal a donc été fixé à 0,08 μ m et l'écart-type à 2,24.

L'indice de réfraction du mélange a été obtenu à partir des modèles *urban* et *maritime polluted* de OPAC. En effet, le modèle *urban* est composé de 56% de *water soluble*, 36% de *insoluble* et 8% de *soot*. Le modèle *maritime polluted*, lui, est constitué de 16% de *water soluble*, 82,3% de *sea salts* et 0,6% de *soot*. Ainsi, on remarque que si l'on forme un mélange externe constitué à 50% du modèle *urban* et 50% du modèle *maritime polluted*, d'après les correspondances rappelées ci-avant, on obtient des proportions similaires à celles mesurées pour l'échantillon prélevé en amont (voir figure 3.7(b)).

En sortie des cheminées

Il nous a paru intéressant de simuler également les propriétés radiatives du panache d'aérosols en sortie des deux principales cheminées de l'usine (cuisson et refroidissement). Cependant, il n'a pas été possible, pour des questions de sécurité, de faire des prélèvements (et donc de mesurer la granulométrie) des aérosols dans l'air à moins de 500m des points d'émission. A défaut de mesures spécifiques, nous avons donc choisi d'utiliser la granulométrie des aérosols prélevés à 500m en aval pour décrire la distribution de taille des particules en sortie de cheminée. Bien entendu, les indices de réfraction choisis pour ces aérosols sont ceux du tableau 3.2.

A 500m en aval

A 500m en aval des cheminées, nous disposons à nouveau de mesures granulométriques et chimiques. Sur la distribution de taille de la figure 3.7(a), on voit une très forte augmentation des particules fines par rapport aux particules prélevées en amont, qui est due à l'émission de l'usine. L'analyse de la composition chimique montre également une très forte proportion de particules métalliques et de particules mixtes aluminosilicates/métalliques. Cela montre qu'une part importante de ces aérosols provient de la cheminée de refroidissement, ce qui est en accord avec les chiffres donnés dans le paragraphe 3.3. Nous avons donc choisi une loi lognormale bimodale pour décrire la distribution de taille. Les paramètres de cette distribution ont été fixés respectivement à 0,07 et 0,019 μ m pour les rayons modaux et 2,5 et 2,0 pour les écart-types. Pour décrire la composition chimique du mélange, nous avons construit un modèle de mélange externe composé pour 80% de particules provenant de la cheminée B (refroidissement), 8% de la cheminée A (cuisson) et 12% des aérosols de fond, ce qui est en accord avec les proportions indiquées par la figure 3.7(b). Les particules provenant des deux

cheminées sont décrites par les indices de réfraction du tableau 3.2 et les aérosols de fond, par le mélange, précédemment présenté, utilisé pour les aérosols prélevés en amont de l'usine.

A 1500m en aval

En observant la distribution de taille des particules prélevées 1500m en aval des cheminées, on remarque que les particules les plus grosses sont moins présentes. En effet, il y a moins de sels marins dans le mélange car les échantillons ont été prélevés plus loin du bord de mer. Les particules les plus fines, issues de l'usine mais également de sources anthropiques plus lointaines, sont prépondérantes. Une loi lognormale monomodale (rayon modal : $0,05\mu\text{m}$, écart-type 2,0) a donc été choisie pour décrire cette distribution. La composition chimique indique une concentration moins forte de particules métalliques que dans l'échantillon prélevé à 500m en aval. En revanche, il y a plus de particules de calcite, de gypse (*insoluble*) et d'« autres particules » (*water soluble*), ce qui indique une plus forte proportion d'aérosols de fond dans le mélange. Le modèle que nous avons utilisé pour représenter cet échantillon est donc un mélange externe composé de 73% de particules provenant de la cheminée B, 7% de particules provenant de la cheminée A et 20% d'aérosols de fond. Là encore, ces proportions sont cohérentes avec l'analyse chimique de la figure 3.7(b). Remarquons que, comme on pouvait le prévoir, la proportion des particules provenant de l'usine diminue avec la distance à la source. Cependant, même à 1500m des cheminées, plus de 80% du mélange est identifié comme provenant du site industriel. Ce fort pourcentage s'explique par le fait que les prélèvements ont été effectués précisément là où se situait le panache provenant de l'usine, qui avait été localisé à l'aide d'un lidar.

Bilan

Le tableau 3.3 synthétise les différents paramètres choisis pour construire les modèles de mélanges d'aérosols qui ont permis la simulation de l'impact radiatif du panache industriel, à différentes distances de la source d'émission.

	Aérosols en amont (aérosols de fond)	Aérosols en sortie de cheminée A	Aérosols en sortie de cheminée B	Aérosols à 500m en aval	Aérosols à 1500m en aval
Granulométrie	distribution monomodale, $r_1 = 0,08\mu\text{m}$, $\sigma_1 = 2,24$	idem aval 500m	idem aval 500m	distribution bimodale, $r_1 = 0,07\mu\text{m}$, $\sigma_1 = 2,5$, $r_2 = 0,019\mu\text{m}$, $\sigma_2 = 2,0$	distribution monomodale, $r_1 = 0,05\mu\text{m}$, $\sigma_1 = 2,0$
Composition	50% d'aérosols urbains et 50% d'aérosols maritimes pollués [5]	composition de l'échantillon prélevé dans la cheminée de cuisson (<i>cf.</i> figure 3.5(d))	composition de l'échantillon prélevé dans la cheminée de refroidissement (<i>cf.</i> figure 3.5(d))	8% provenant de la cheminée A, 80% de provenant de la cheminée B et 12% d'aérosols de fond	7% provenant de la cheminée A, 73% provenant de la cheminée B et 20% d'aérosols de fond

TABLE 3.3 – Description des modèles utilisés pour décrire les aérosols à différentes distances de leurs sources d'émissions.

3.7.2 Simulations des propriétés radiatives et discussion

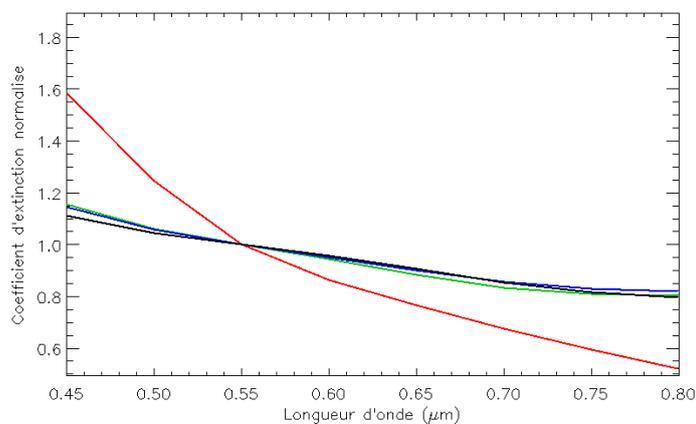
A partir des modèles précédemment décrits, les propriétés radiatives des différents mélanges d'aérosols ont été simulés à l'aide du code COMPAS. La figure 3.8 présente les coefficients d'extinction normalisés, l'albédo de diffusion simple et le facteur d'asymétrie obtenus.

Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces courbes. Tout d'abord, on remarque que les propriétés radiatives obtenues pour les aérosols émis par la cheminée de cuisson sont très différentes de celles obtenues pour les autres modèles : l'extinction décroît plus vite avec la longueur d'onde, l'albédo de simple diffusion est très supérieur et le facteur d'asymétrie est plus fort. Or la principale différence, en terme de composition chimique, entre les aérosols issus de cette cheminée et les trois autres modèles réside dans la proportion de particules métalliques (l'échantillon prélevé dans les filtres de la cheminée de cuisson est le seul à ne pas en contenir). L'observation du tableau 3.2 pouvait déjà permettre de constater que la présence de particules métalliques dans un mélange d'aérosols induisait une forte augmentation de son absorption (la partie imaginaire de l'indice du mélange B étant bien plus forte que celle du mélange A). Cela se retrouve ici, dans la simulation de l'albédo de simple diffusion. Cependant, on remarque également que l'ensemble des propriétés radiatives sont impactées par la présence de ces particules métalliques. Notons toutefois que l'albédo obtenu pour les aérosols de la cheminée de cuisson (constante égale à 1) n'est pas réaliste mais découle directement de la précision avec laquelle a été obtenu l'indice de réfraction de ce mélange (une partie imaginaire inférieure à 0,05 étant considérée comme nulle).

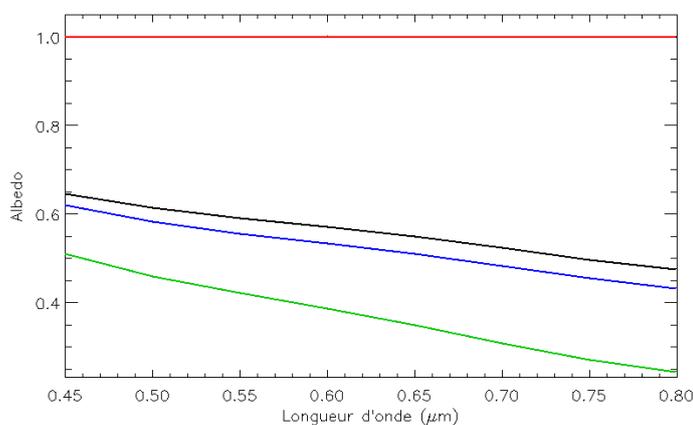
On remarque également que les aérosols prélevés à 500m et 1500m en aval ont des propriétés radiatives relativement similaires à ceux provenant de la cheminée B (refroidissement). La différence entre les trois courbes est même difficilement visible sur les extinctions normalisées. Cela s'explique par le fait que la cheminée B est le principal émissaire d'aérosols du site et les échantillons prélevés en aval sont constitués à 80% et 73% de ces particules. Cependant, on pouvait s'attendre à une influence plus importante des aérosols de fond sur le coefficient d'extinction des mélanges, pour les deux échantillons prélevés en aval. On remarque cependant une augmentation de l'albédo lorsqu'on s'éloigne de la source (ce qui est en accord avec une proportion décroissante de particules métalliques).

Finalement, il semble que les propriétés radiatives des aérosols émis par une industrie métallurgique soient assez particulières, notamment du fait de la forte absorption induite par la présence d'oxydes métalliques. Afin de comparer ces propriétés à celles d'autres aérosols anthropiques, nous présentons, figure 3.9, les propriétés radiatives issues des modèles provenant de nos mesures et celles calculées à partir des données de la campagne ESCOMPTE. Cette campagne, qui s'est déroulée sur plusieurs jours, portait sur la caractérisation des propriétés physiques et optiques d'aérosols industriels et urbains, à plusieurs kilomètres de leurs sources d'émission et non dans un panache. Les données ESCOMPTE choisies sont celles mesurées un jour de forte pollution.

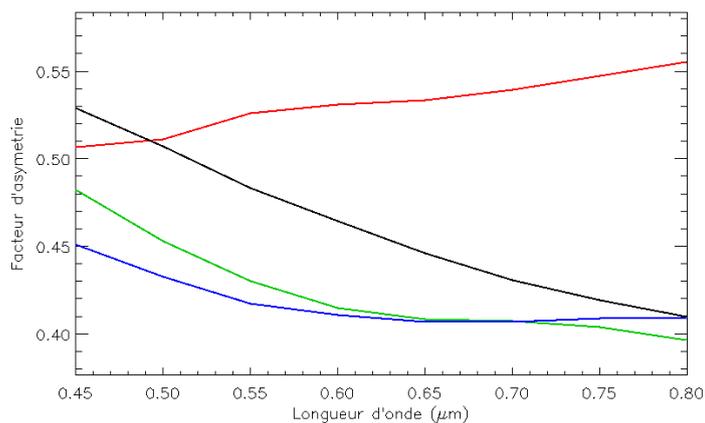
On remarque des différences notables entre les propriétés des aérosols étudiés pendant ESCOMPTE et celles provenant de nos prélèvements : la décroissance de l'extinction avec la longueur d'onde est légèrement plus importante pour les aérosols d'ESCOMPTE que pour nos aérosols de panache, mais surtout l'albédo de diffusion est bien plus élevé. La différence significative des albédos s'explique par la nature différentes des particules étudiées : les aérosols étudiés pendant ESCOMPTE étaient des mélanges constitués en grande partie de matières organiques et de sulfate d'ammonium. Or les particules organiques et les sulfates d'ammonium ont des absorptions très faibles. Le mélange en résultant est donc principalement diffusant (malgré la présence de particules carbonées assez absorbantes, particulièrement pendant les journées de forte pollution). Au contraire, les mesures d'indices de réfraction qui ont été faites sur nos échantillons provenant de la cheminée B (principal émissaire) ont montré une partie imaginaire significative, ce qui explique la forte absorption des mélanges obtenus et donc les très faibles albédos.



(a) Coefficients d'extinction normalisés par leurs valeurs à 550nm.

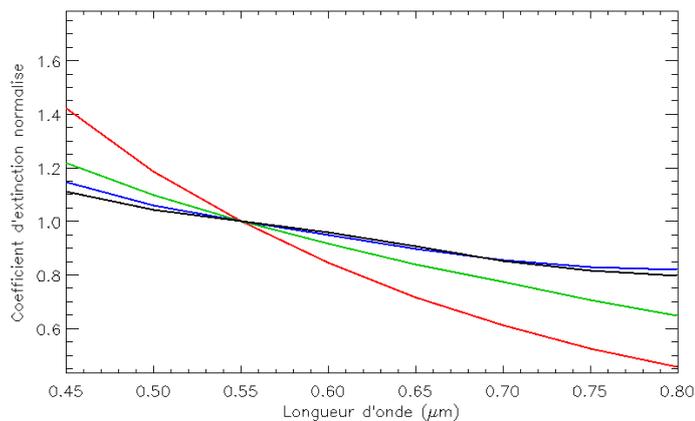


(b) Albédo de diffusion simple.

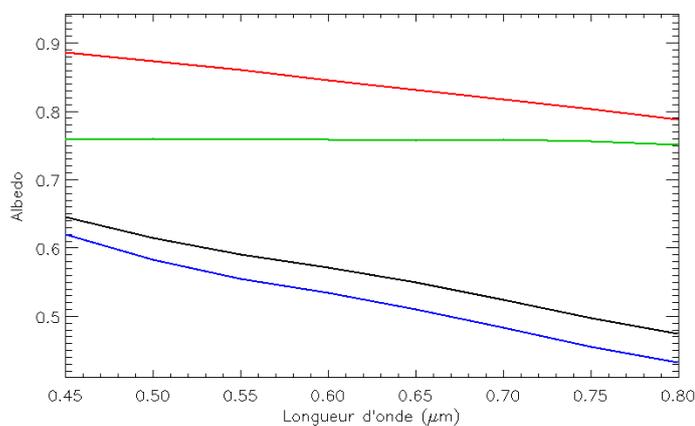


(c) Facteur d'asymétrie.

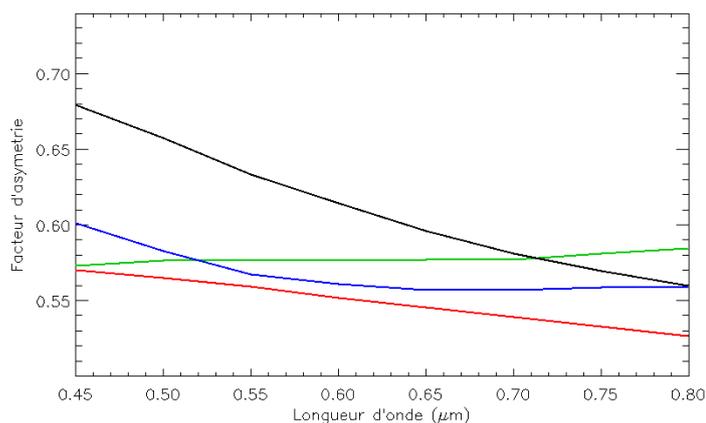
FIGURE 3.8 – Propriétés radiatives obtenues pour les mélanges d'aérosols issus de l'usine (rouge : sortie de cheminée A (cuisson), vert : sortie de cheminée B (refroidissement), bleu : à 500m en aval, noir : à 1500m en aval).



(a) Coefficients d'extinction normalisés par leurs valeurs à 550nm.



(b) Albédo de diffusion simple.



(c) Facteur d'asymétrie.

FIGURE 3.9 – Comparaison des propriétés radiatives obtenues pour le panache issu de l'usine métallurgique et pour les aérosols mesurés lors de la campagne ESCOMPTE [11] (rouge : données ESCOMPTE, bleu : 500m en aval de l'usine, noir : 1500m en aval de l'usine, vert : en amont de l'usine).

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude pluri-disciplinaire, fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère, le Département d'Optique Théorique et Appliquée de l'ONERA et le Laboratoire Télédétection, Surveillance, Environnement du CEA, portant sur la caractérisation des aérosols émis par une industrie métallurgique. Les données actuellement disponibles dans les bases de propriétés d'aérosols n'étant pas utilisables dans le cadre de l'étude d'un panache d'industrie métallurgique, nous avons entrepris de combler ce manque. Des particules ont donc été prélevées dans différentes cheminées d'une usine et dans l'atmosphère à proximité du site, puis étudiées en laboratoire. Ces analyses ont permis d'une part d'estimer l'indice de réfraction des aérosols émis par cette usine, d'autre part de simuler l'impact radiatif d'un panache industriel.

Nous avons pu montrer que les aérosols présents dans le panache émis par cette usine étaient constitués pour une grande part d'oxydes métalliques et que cette proportion importante de particules métalliques induisait une forte absorption du mélange d'aérosols. La comparaison de ces données avec celles de la littérature a montré que ces oxydes métalliques semblaient avoir un indice de réfraction différent des aérosols minéraux contenant du fer (comme l'hématite) et étaient très peu semblables aux aérosols prélevés dans des zones industrielles mais loin de leur source d'émission (comme ceux de la campagne ESCOMPTE qui sont principalement diffusants).

L'incertitude avec laquelle ont été mesurés les indices de réfraction des échantillons prélevés ne permet pas d'analyser plus en détail l'impact radiatif de ces aérosols particuliers. En effet, il n'a pas été possible d'estimer un indice de réfraction pour chaque type de particules identifié mais seulement pour le mélange, et l'erreur d'estimation (0,05 pour la partie imaginaire) est assez forte. Cependant, notre étude permet de disposer d'un jeu inédit de propriétés physiques et optiques d'aérosols industriels proches de leur source d'émission. Ces données pourront permettre d'améliorer l'étude de l'impact radiatif des aérosols anthropiques et, à terme, d'enrichir les modèles de transport d'aérosols à une échelle locale. Dans le cadre de nos travaux, elles vont permettre de créer des bases de données de propriétés radiatives qui seront utilisées pour caractériser un panache industriel à partir d'images hyperspectrales (voir chapitre 5).

Chapitre 4

Estimation conjointe du CO₂ et des aérosols dans un panache optiquement dense : application à la caractérisation de feux de biomasse

4.1 Introduction

Le chapitre précédent, dans lequel l'impact radiatif des gaz et des aérosols a été décrit, a mis en évidence des phénomènes d'interactions entre absorption moléculaire et diffusion particulaire. Du fait de ces interactions, l'estimation de concentrations gazeuses dans une atmosphère contenant une forte concentration d'aérosols s'avère délicate avec les méthodes actuelles.

Nous avons donc développé une méthode permettant d'estimer conjointement les concentrations en gaz et les propriétés des aérosols dans un panache. Particulièrement adaptée à la caractérisation de panaches optiquement denses, cette méthode a été d'abord validée sur données simulées puis appliquée à des images AVIRIS de feux de biomasse. Elle est présentée dans ce chapitre.

4.2 Motivations et objectif

4.2.1 Les phénomènes d'interaction gaz-aérosols dans le SWIR

De nombreuses techniques ont été développées pour estimer des gaz à partir de données hyperspectrales. Les principales d'entre elles ont été présentées dans les paragraphes 2.5.1 et 2.5.2. Dans le domaine spectral VNIR-SWIR, la grande majorité de ces méthodes repose sur des calculs de transfert radiatif. C'est le cas notamment du CIBR, d'APDA (*Atmospheric Precorrected Differential Absorption*) [62] ou de JRGE. Cependant, malgré l'impact radiatif important des aérosols dans ce domaine de longueurs d'onde (voir paragraphe 2.4.3), aucune de ces techniques n'estime conjointement ou préalablement les propriétés des aérosols.

Pour prendre en compte la diffusion des aérosols, *Schläpfer et al.* [62] utilise un paramètre fixé empiriquement dans le calcul de la luminance alors que *Spinetti et al.* [40] estime l'AOT puis utilise les modèles standard d'aérosols présents dans MODTRAN pour simuler leur impact radiatif. Cependant, les particules présentes dans un panache ont souvent des propriétés microphysiques et donc optiques bien différentes de celles des aérosols plus classiques décrits par les modèles standard. Cette différence peut introduire un biais dans l'estimation des concentrations gazeuses, du fait de l'extinction des aérosols dans les bandes d'absorption du gaz.

Ces effets de couplage entre l’extinction des aérosols et l’absorption des gaz ont rarement été étudiés. Quelques méthodes existent pourtant pour estimer conjointement des gaz et les aérosols à partir de données hyperspectrales [40, 63–65]. Mais ces méthodes ont un inconvénient notable : elles n’estiment, au mieux, qu’une AOT spectrale. Les autres propriétés optiques (albédo de diffusion simple et facteur d’asymétrie) sont données par les modèles standard d’aérosols. Dans le cas de la caractérisation d’un panache de fumée, comme ces modèles ne sont pas adaptés, il paraît judicieux d’estimer les propriétés des particules avant d’inverser les concentrations gazeuses.

4.2.2 Le cas des feux de biomasse

Bien que l’objet de cette thèse soit de développer une méthode permettant la caractérisation de panaches industriels, il a été décidé d’appliquer la méthode présentée dans ce chapitre à l’étude d’un panache de feu de biomasse. Tout d’abord, parce que ce type de panache a été plus souvent étudié que des panaches industriels, et qu’en conséquence, on dispose de jeux de données assez complets, nécessaires à la validation de la méthode développée, ce qui n’est pas le cas aujourd’hui pour des émissions industrielles (images hyperspectrales aéroportées acquises simultanément à des prélèvements d’aérosols et de mesure d’AOT et de teneur en CO₂).

Ensuite, ces feux de biomasse émettent des particules en grande quantité et ont donc une épaisseur optique souvent très importante (supérieure à 3 à 550nm), ce qui est plus rarement le cas des panaches industriels, du moins dans les pays développés (et excepté lors de certains accidents). Cela a pour avantage que, dans le signal de luminance acquis par le capteur, la contribution des aérosols est forte et celle de la réflectance du sol est plus faible, particulièrement dans les faibles longueurs d’onde. Enfin, la méthode présentée est tout à fait adaptable aux panaches industriels, pourvu qu’ils soient d’épaisseur optique assez élevée. Seul le modèle physique utilisé pour décrire le mélange d’aérosols dans le panache est à modifier.

Dans ce chapitre, nous utiliserons donc un modèle de mélange d’aérosols adapté à la description des particules de feu de végétation [66]. Nous supposons que les particules sont des sphères à deux couches concentriques : le coeur étant composé de suie et la couche externe de matières organiques. On nommera f_{BC} la fraction volumique de suie. Cette description permet l’utilisation de la loi de Maxwell-Garnett, donnée par l’équation 2.12. Par ailleurs, la distribution en taille sera décrite par une loi lognormale monomodale. En effet, bien que, en réalité, plusieurs modes coexistent (un mode fin et un mode grossier), le mode fin est largement prépondérant en nombre de particules et a un impact radiatif prédominant dans le VNIR-SWIR [67]. On nommera respectivement r_m et σ_m le rayon modal et l’écart-type modal.

4.2.3 Objectif

L’objectif de cette étude est donc le développement d’une méthode d’estimation conjointe du CO₂ et des aérosols à partir d’une image hyperspectrale acquise dans le VNIR-SWIR, et sa validation dans le cas de l’étude d’un feu de biomasse. Plus précisément, il s’agit d’utiliser des méthodes développées d’une part pour l’estimation de gaz (JRGE) et d’aérosols (L-APOM), de les modifier et de les combiner afin d’améliorer l’inversion de concentration de CO₂ dans un panache. Cela implique, dans un premier temps, de retrouver les propriétés microphysiques des aérosols du panache (granulométrie, composition, concentration) à partir des longueurs d’onde du VNIR, en utilisant une description physique du mélange de particules adaptée. Dans un second temps, l’impact radiatif de ces aérosols est simulé entre 1,9 et 2,2 μ m, où le CO₂ possède trois pics d’absorption caractéristiques (voir figure 2.2). Cependant, du fait de la forte absorption de la vapeur d’eau de 1,8 à 2,0 μ m, seuls deux sont visibles dans les spectres de luminance (à 2,008 et 2,058 μ m, voir figure 4.1). Enfin, les concentrations en CO₂ dans le panache sont estimées à partir des signaux de luminance dans le SWIR.

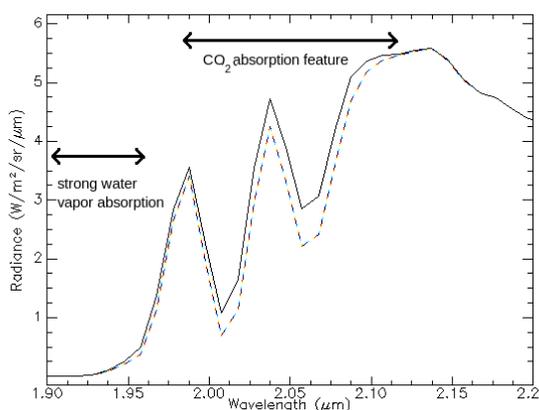


FIGURE 4.1 – Spectres de luminances dans le SWIR pour différentes teneurs en CO_2 . Trait plein : concentration standard (du modèle atmosphérique 1976 US standard, soit 330ppm), pointillé : excès de 150ppm, soit 480ppm.

4.3 Description de la méthode développée

4.3.1 Principe général

L'épaisseur optique, l'albédo de simple diffusion et le facteur d'asymétrie d'un mélange d'aérosols dépendent des propriétés microphysiques de ces aérosols (voir paragraphe 2.2.4). Cependant, pour la plupart des particules, l'épaisseur optique décroît avec la longueur d'onde, et plus le rayon des particules est important, plus cette décroissance est lente. Ainsi, les aérosols de feu de biomasse, qui sont généralement plus gros que les aérosols ruraux, peuvent avoir un impact radiatif non négligeable dans les longueurs d'onde du SWIR, et en particulier dans la bande d'absorption du CO_2 à $2,0\mu\text{m}$. Ceci est illustré par la figure 4.2 qui montre trois bandes de la même image AVIRIS, acquise au-dessus d'un panache de feu de végétation. Bien que le panache soit plus visible dans les faibles longueurs d'onde, on peut encore le distinguer à $2,04\mu\text{m}$ (bande 177), ce qui indique que l'extinction des aérosols n'est pas négligeable dans la bande d'absorption du CO_2 .

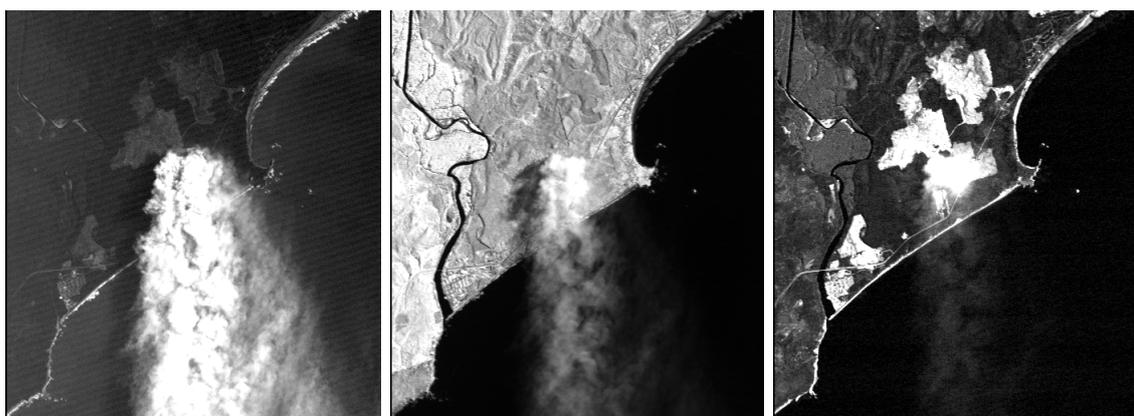


FIGURE 4.2 – Image AVIRIS du feu de Quinault, acquise le 21 septembre 1994 en Californie. De gauche à droite : bande 6 ($0,42\mu\text{m}$), band 68 ($1,0\mu\text{m}$) et bande 177 ($2,04\mu\text{m}$).

Pour prendre en compte l'impact radiatif des aérosols dans l'estimation du CO_2 , un algorithme en trois étapes a été développé (voir figure 4.3). Tout d'abord, les propriétés microphysiques des aérosols sont estimées à l'aide de l'algorithme L-APOM que nous avons légèrement modifié pour les

besoins de l'étude. Pour cela, les longueurs d'onde du VNIR sont utilisées (en-dehors des bandes d'absorption des gaz), car l'effet des aérosols est maximal et celui du CO₂ est nul. Ensuite, les propriétés optiques des aérosols dans le SWIR sont déduites, à partir des propriétés microphysiques retrouvées, grâce à une *Look-Up Table* générée par le code COMPAS. L'impact radiatif des aérosols dans la bande d'absorption du CO₂ à 2,0 μ m peut donc être simulé. Enfin, les spectres de luminances dans cette bande sont exploités pour estimer la concentration en CO₂, à l'aide de l'algorithme JRGE.

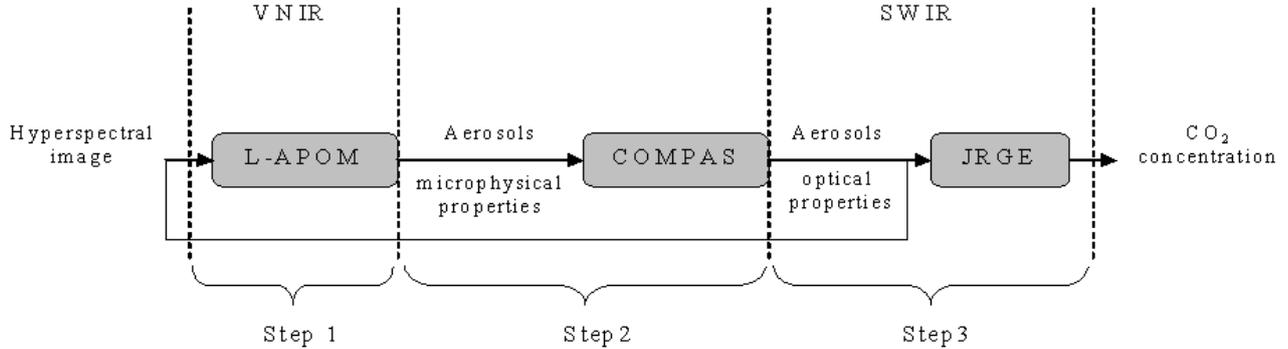


FIGURE 4.3 – Schéma global de la méthode proposée.

4.3.2 Estimation des propriétés des aérosols

Nous avons présenté, au paragraphe 2.5.3 plusieurs méthodes pour estimer les propriétés des aérosols par télédétection, et en particulier à partir d'images multi ou hyperspectrales. Notons cependant que la plupart permettent de retrouver, au mieux, une épaisseur optique spectrale [47] ou ne sont valables que pour de faibles épaisseurs optiques [49]. Cependant, déterminer l'épaisseur optique et l'albédo de diffusion simple des aérosols n'est pas suffisant pour décrire complètement l'impact radiatif de ces aérosols. En effet, *Stephens et Heindinger* [68], qui ont étudié l'effet de la diffusion des aérosols sur la bande A de l'O₂, ont montré que l'influence de la fonction de phase des aérosols, et donc du facteur d'asymétrie, ne pouvait pas être négligée, particulièrement quand la concentration des aérosols est forte.

Quelques méthodes estiment, en plus, le facteur d'asymétrie et l'albédo de diffusion simple. Elles adoptent des approches par LUT utilisant soit des mesures *in situ* de propriétés optiques [69], soit des calculs de transfert radiatifs [46, 70]. Dans cette étude, nous avons choisi d'appliquer l'algorithme L-APOM (reposant sur des LUT générées par calculs de transfert radiatif) car il a déjà été appliqué à des images hyperspectrales AVIRIS et validé pour des aérosols de biomasse. Nous avons cependant apporté quelques modifications à cet algorithme (le modèle radiatif APOM proposé par *Alakian et al.* [46] n'a pas été utilisé car nous avons directement créé une LUT de termes atmosphériques).

Cette méthode nécessite la création de trois LUT interconnectées : une LUT de propriétés microphysiques d'un mélange d'aérosols, une LUT de propriétés optiques dans le VNIR (calculée par le code COMPAS à partir de la première LUT) et une troisième LUT de termes atmosphériques (L^{atm} , T^{atm} , S^{atm} de l'équation 2.16), calculée dans le VNIR, à partir de la seconde LUT, à l'aide du code transfert radiatif MODTRAN.

Après la création de ces trois LUT, la réflectance du sol dans le VNIR est obtenue, pour chaque pixel du panache, en comparant la réflectance dans le SWIR (fournie par le code de correction atmosphérique FLAASH [71]) de ce pixel et celles des pixels en-dehors du panache. Le pixel hors du panache dont la réflectance dans le SWIR est la plus proche, au sens des moindres carrés, de celle du pixel du panache est sélectionné. On impose alors à la réflectance du pixel du panache d'être égale

à celle du pixel sélectionné dans le VNIR. Cette méthode, qui repose sur le fait que l'extinction des aérosols est bien plus faible dans le SWIR que dans le VNIR, a été proposée par *Bojinski et al.* [72].

Les luminances des pixels L_{pix} sont ensuite comparées aux luminances L_{mod} simulées par l'équation du transfert radiatif 2.16 et les termes atmosphériques de la troisième LUT. Le jeu de termes atmosphériques fournissant la luminance L_{mod} la plus proche de L_{pix} au sens des moindres carrés est obtenu par un algorithme de Levenberg-Marquardt [73]. Des contraintes spatiales sont également ajoutées pour gérer la non-unicité des solutions (se référer à la publication de *Alakian et al.* [46] pour une description détaillée de l'algorithme). La figure 4.4 résume le fonctionnement de cette méthode.

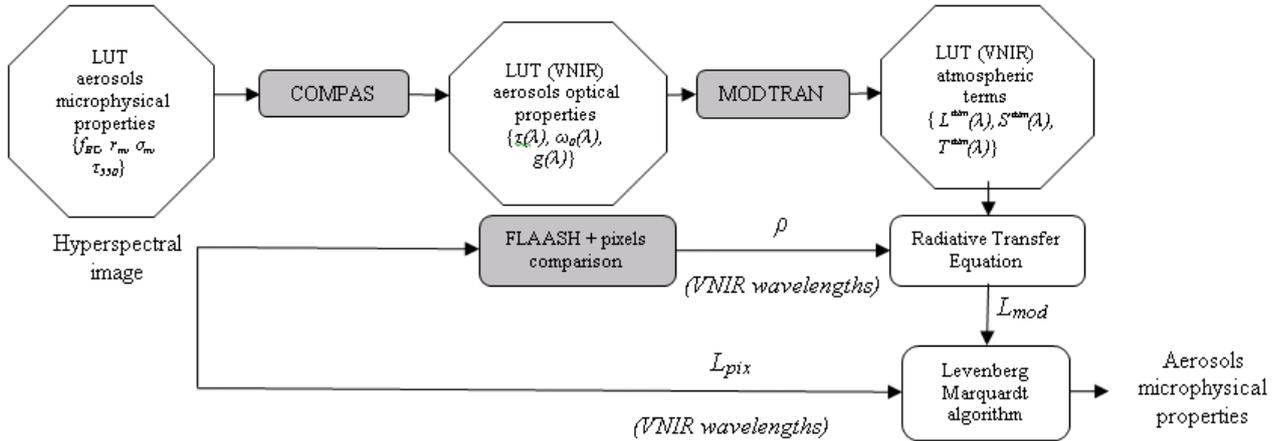
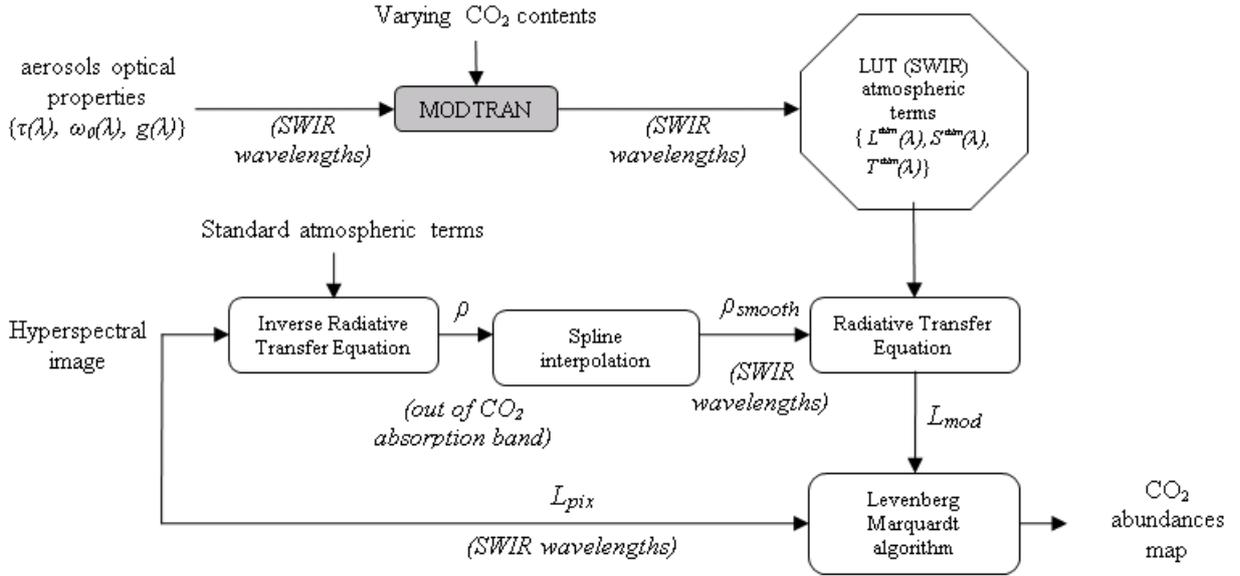


FIGURE 4.4 – Schéma du fonctionnement de la méthode d'estimation des aérosols (issue de la méthode L-APOM).

4.3.3 Estimation de la teneur en CO_2

Pour l'estimation de la teneur en CO_2 , la méthode JRGE (*Joint Reflectance and Gas Estimator* [42]) a été choisie, car elle prend en compte les variations non-linéaires de la réflectance du sol dans les bandes d'absorption des gaz. Par ailleurs, cette méthode a été également appliquée et validée sur des données hyperspectrales AVIRIS. Elle repose sur l'hypothèse que la réflectance du sol varie lentement avec la longueur d'onde alors que la transmittance atmosphérique possède des pics d'absorption de gaz très localisés en longueur d'onde. Ceci permet de séparer ces deux contributions distinctes dans le signal de luminance.

L'algorithme peut être divisé en trois étapes. D'abord, une LUT de termes atmosphériques est créée, entre 1,9 et 2,2 μm pour différentes teneurs en CO_2 . Ensuite, pour chaque pixel, la réflectance ρ du sol est estimée en-dehors de la bande d'absorption du gaz en utilisant l'équation du transfert radiatif (eq. 2.16) et les termes atmosphériques de la LUT. Puis, cette réflectance est interpolée dans la bande d'absorption, en utilisant une interpolation spline, pour obtenir ρ_{smooth} . Enfin, les termes atmosphériques de la LUT et ρ_{smooth} sont utilisés dans l'équation 2.16 pour obtenir des luminances simulées. Le jeu de termes atmosphériques qui permet de simuler la luminance la plus proche de celle du pixel observé est sélectionné, ce qui permet d'en déduire la concentration en CO_2 . La figure 4.5 résume le fonctionnement de cette méthode.


 FIGURE 4.5 – Schéma du fonctionnement de la méthode JRGE pour l'estimation du CO₂.

4.3.4 Création des Look-Up Tables

L'utilisation conjointe de L-APOM et JRGE nécessite la création de quatre LUT (trois pour L-APOM et une pour JRGE). La première est obtenue en faisant varier f_{BC} , r_m , σ_m et τ_{550} , l'épaisseur optique à 550nm, directement liée au nombre total de particules N . Les domaines de variations choisis pour ces paramètres sont donnés tableau 4.1. Ils ont été choisis pour être représentatifs des particules de feu de biomasse [67]. La seconde LUT est obtenue à partir de la première en utilisant le code COMPAS, qui repose sur la théorie de Mie. La troisième, qui contient les quatre termes atmosphériques de l'équation 2.16, est calculée par MODTRAN dans le VNIR. le modèle atmosphérique 1976 US standard a été choisi pour effectuer les simulations, et une couche d'aérosols a été ajoutée à ce modèle entre 0 et 400m. Dans cette couche, les aérosols ont été définis par les propriétés optiques de la deuxième LUT. Chaque jeu de termes atmosphériques ($L^{atm}(\lambda)$, $T^{atm}(\lambda)$, $S^{atm}(\lambda)$) correspond donc bien à un jeu unique de propriétés optiques ($\omega_0(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, g) auquel est associé un jeu de paramètres microphysiques (f_{BC} , r_m , σ_m et τ_{550}).

Paramètre microphysique	Intervalle de variation	Pas de variation
Fraction volumique de suie f_{BC}	[0 ; 12]	1
Rayon modal r_m (μm)	[0,03 ; 0,25]	0,01
Écart-type modal σ_m	[1,3 ; 2,0]	0,1
AOT à 550nm	[0 ; 5]	0,5

TABLE 4.1 – Intervalles de variations des propriétés microphysiques des aérosols utilisés pour la base de données de L-APOM.

La création de la table de termes atmosphériques dans le SWIR pour différentes teneurs de CO₂ est également effectuée à l'aide du code de transfert radiatif MODTRAN et avec le même modèle atmosphérique. Une quantité variable de CO₂ est ajoutée à la concentration standard entre 0 et 400m. C'est ce qu'on appellera par la suite l'excès en CO₂. Verticalement, les aérosols et le CO₂ sont uniformément répartis dans le panache. L'influence du choix de cette géométrie est discutée au paragraphe 4.4.4.

4.4 Étude de sensibilité

Afin de valider la méthode précédemment décrite et d'évaluer ses performances dans le cadre de la caractérisation d'un panache de feu de biomasse, une étude de sensibilité a été conduite. Des données simulées ont été utilisées pour quantifier différentes sources d'erreurs dans l'estimation du CO₂ : l'interpolation de la réflectance du sol, les propriétés des aérosols ainsi que d'autres paramètres comme le contenu en vapeur d'eau, la température et la géométrie du panache.

4.4.1 Méthode d'analyse

Méthode et paramètres utilisés

L'algorithme JRGE a été appliqué sur des luminances simulées par MODTRAN, entre 1,9 et 2,2 μ m, à la résolution spectrale du capteur AVIRIS et en utilisant DISORT 16 flux (DIScrete Ordinate Radiative Transfer [74]) pour tenir compte de la diffusion multiple. Les paramètres utilisés pour décrire les propriétés de la scène, les conditions d'acquisition et l'atmosphère (en-dehors des aérosols et du CO₂) ont été choisis pour être en accord avec l'image AVIRIS du feu de Quinault, dont l'analyse est présentée au paragraphe 4.5.1. Notons que l'estimation du CO₂ nécessite qu'on puisse distinguer ses pics d'absorption autour de 2,0 μ m dans le signal de luminance. Cela requiert une réflectance du sol dans le SWIR suffisamment importante (typiquement supérieure à 0,1 à 2,0 μ m). Ainsi, dans l'image du feu de Quinault, l'algorithme JRGE n'a été appliqué que sur les pixels de la plage et des pixels de roche nue.

Ainsi, pour les simulations, nous avons choisi de prendre comme spectre de réflectance un spectre de sable, issu de la librairie spectrale de la *John Hopkins University* (JHU), Baltimore, MD. Dans cette librairie, le spectre utilisé a été le *brown sandy loam* car il était le plus proche des spectres obtenus pour les pixels de la plage, hors panache, après correction atmosphérique par le code FLAASH de l'image AVIRIS du feu de Quinault. Les principaux paramètres utilisés pour ces simulations sont présentés dans le tableau 4.2.

Réflectance du sol	<i>brown sandy loam</i>
Température du sol (K)	300
Altitude du capteur (km)	20,15
Angle azimutal de visée (°)	0
Angle zénithal de visée (°)	0 (nadir)
Angle azimutal solaire (°)	180
Angle zénithal solaire (°)	46,7
Modèle atmosphérique	1976 US standard (voir le Modtran report [18])

TABLE 4.2 – Principaux paramètres utilisés pour les simulations MODTRAN.

Entre 0 et 400m (altitude donnée par des mesures lidar pour la localisation du panache lors de l'acquisition de l'image [75]), une couche a été ajoutée au modèle atmosphérique standard contenant des aérosols de biomasse et un excès en CO₂. D'abord, l'erreur algorithmique de JRGE, *i.e.* due à l'interpolation de la réflectance du sol, a été estimée. Ensuite, l'erreur, dans l'estimation du CO₂, induite par une mauvaise estimation des propriétés des aérosols, ou par l'utilisation d'un modèle d'aérosol non adapté, a été évaluée. Enfin, nous avons également étudié l'impact d'autres paramètres physiques.

Définition des erreurs

Les erreurs de mesure observées dans l'estimation du CO₂ peuvent provenir de trois principales sources distinctes : le bruit instrumental du capteur (déjà évalué pour des données AVIRIS [42] et que nous supposons donc connu), la procédure d'interpolation de la réflectance et le modèle de transfert radiatif utilisé (particulièrement les effets dus aux aérosols et à l'émission thermique). Afin d'évaluer ces sources d'erreurs, l'algorithme JRGE a été appliqué sur différentes luminances simulées, en utilisant différentes LUT atmosphériques.

Pour ces différents jeux de données, deux types d'erreurs ont été examinés : l'erreur E de mesure du CO₂ et l'erreur RMS (*Root Mean Square*) de reconstruction du signal de luminance, respectivement définies par

$$E = \frac{n - \hat{n}}{N_0 - n}, \quad (4.1)$$

et

$$\text{erreur RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_\lambda} \sum_{i=1}^{N_\lambda} |L_{pix}(\lambda_i) - L_{mod}(\lambda_i)|^2}, \quad (4.2)$$

où n est l'excès en CO₂, rapporté à la colonne totale, dû au panache, \hat{n} est la valeur estimée de cet excès et N_0 est la colonne totale de CO₂ sans panache. N_λ est le nombre de bandes spectrales utilisé pour le calcul de la luminance (ici, $N_\lambda = 18$), L_{pix} et L_{mod} sont respectivement les luminances observées (provenant d'un pixel hyperspectral ou d'une simulation) et calculées à partir de l'équation du transfert radiatif (voir figure 4.5).

4.4.2 Erreur due à l'interpolation de la réflectance du sol

Si la réflectance du sol n'est pas correctement interpolée dans la bande d'absorption du CO₂, l'estimation de la teneur en CO₂ peut être biaisée. Par exemple, une sous-estimation de la réflectance du sol induit une surestimation de la teneur en CO₂. La valeur de ce biais dépend évidemment de la réflectance considérée. *Marion et al.* [42] ont montré que cette erreur, qu'ils nomment « erreur algorithmique », vaut en moyenne 3% pour l'ensemble des réflectances de la base de données spectrales JHU. Cependant, comme l'algorithme JRGE est appliqué, pour l'image AVIRIS du feu de Quinault, principalement sur des pixels de plage, il est nécessaire d'estimer cette erreur spécifiquement pour la réflectance du sable.

Pour ce faire, vingt luminances ont été simulées, pour différentes teneurs en CO₂ (avec des excès variant de 30 à 315ppm, avec un pas de 15ppm), en choisissant pour réflectance du sol le spectre du *brown sandy loam*. Pour chaque valeur de CO₂, les concentrations estimées ont été comparées aux concentrations effectivement utilisées pour les simulations, sans ajout de bruit et en utilisant le même modèle atmosphérique pour la LUT et pour la simulation des luminances. Ainsi, l'erreur E observée n'est due qu'à l'interpolation de la réflectance du sol. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.3. On observe que la concentration de CO₂ est sous-estimée (valeur de E positive) et que le biais moyen est de 4,12%. Par ailleurs, la faible valeur de l'écart-type de E (0,37%) montre que les performances de l'algorithme sont assez peu dépendantes de la concentration en CO₂. Dans la suite de ce chapitre, cette erreur sera prise en compte, sans être ajoutée aux erreurs discutées ci-après.

Moyenne des erreurs de mesure E (%)	4,12
Écart-type des erreurs de mesure E (%)	0,37
Moyenne des erreurs RMS de reconstruction (%)	0,93

TABLE 4.3 – Erreurs de l’algorithme JRGE dues à l’interpolation de la réflectance du sol.

4.4.3 Influence des aérosols

Motivations

Le choix des propriétés optiques des aérosols a une influence importante sur le signal de luminance à $2,0\mu\text{m}$, particulièrement quand l’épaisseur optique est forte. A titre d’illustration, la figure 4.6 présente quatre luminances simulées avec les données d’entrée, excepté pour les aérosols. La première a été calculée sans aérosols, les trois autres avec une épaisseur optique de 5 à 550nm , mais avec trois modèles différents d’aérosols : des aérosols maritimes, des aérosols ruraux et des aérosols de biomasse. On remarque d’une part que la luminance est deux fois plus importante lorsqu’on supprime les aérosols du modèle d’atmosphère, d’autre part que les luminances peuvent varier de 20% lorsqu’on considère différents types d’aérosols. Cela souligne l’importance d’estimer correctement les propriétés des aérosols avant de retrouver les concentrations en CO_2 .

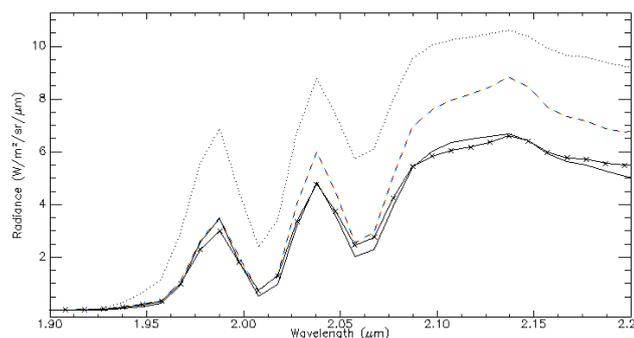


FIGURE 4.6 – Impact des propriétés des aérosols, pour une épaisseur optique de 5 à 550nm , sur le signal de luminance autour de la bande d’absorption du CO_2 à $2,0\mu\text{m}$. Pointillés : sans aérosols ; trait plein : aérosols de biomasse ; tirets : aérosols maritimes ; traits et croix : aérosols ruraux.

Dans les paragraphes suivants, l’erreur d’estimation du CO_2 est évaluée dans deux cas : d’abord lorsqu’un modèle correct d’aérosols est utilisé mais que les propriétés microphysiques sont mal connues, ensuite lorsque le modèle d’aérosols choisi ne correspond pas aux aérosols effectivement présents.

Impact d’une erreur sur les propriétés microphysiques

Afin d’estimer l’impact du choix des propriétés microphysiques des aérosols, plusieurs luminances ont été simulées, avec différentes concentrations de CO_2 , et en utilisant différents jeux de propriétés microphysiques (l’AOT à 550nm par défaut a été fixée à 5 pour représenter un panache optiquement dense). Toutes ces luminances ont ensuite été utilisées pour estimer la concentration en CO_2 par l’algorithme JRGE et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.4. Une erreur de 30% dans la fraction en suie conduit à une erreur de 4,5% dans l’estimation du CO_2 et à une erreur de reconstruction du signal de luminance de 0,8%. Ces valeurs sont proches de celles obtenues dans de paragraphe précédent. En revanche, une sous-estimation de 30% du rayon modal conduit à une

erreur d'environ 14% dans l'estimation du CO₂, et une erreur de 30% de l'AOT induit une erreur de 7,4% en moyenne. Il semble donc que l'estimation du CO₂ soit moins sensible à une erreur dans la fraction en suie que dans le rayon modal des aérosols ou leur épaisseur optique.

Notons par ailleurs que les performances de l'algorithme L-APOM pour l'estimation des propriétés microphysiques des aérosols dans un tel panache ont déjà été évaluées : l'erreur d'estimation peut atteindre 20% pour la fraction en suie, mais est inférieure à 10% pour le rayon modal ou l'épaisseur optique. Pour de telles erreurs, les concentrations en CO₂ sont retrouvées à moins de 5% près avec l'algorithme JRGE.

	Sous-estimation de 30% du rayon modal r_m	Sur-estimation de 30% du rayon modal	Sous ou Sur-estimation de 30% de la fraction en suie f_{BC}	Sous-estimation de 30% l'épaisseur optique à 550nm τ_{550}
Moyenne des erreurs de mesure E (%)	14,6	5,76	4,49	7,39
Écart-type des erreurs de mesure E (%)	1,93	5,69	0,83	0,69
Moyenne des erreurs RMS de reconstruction (%)	1,75	1,33	0,81	1,32

TABLE 4.4 – Erreurs de l'algorithme JRGE dues à une erreur de 30% dans l'estimation des propriétés microphysiques des aérosols.

Impact de l'utilisation d'un modèle d'aérosols non adapté

L'algorithme JRGE a également été appliqué aux luminances précédemment décrites, mais en utilisant d'autres LUT atmosphériques, afin d'évaluer l'erreur commise par une mauvaise description physique du mélange d'aérosols. La première, qu'on nommera LUT1, a été calculée avec une atmosphère sans aérosols, la seconde, LUT2, l'a été avec une atmosphère contenant des aérosols maritimes et la dernière, LUT3, avec des aérosols industriels (mélange externe de suie, de matières organiques et de sulfate d'ammonium [12]). Mis à part les aérosols, les trois LUT atmosphériques ont été calculées avec les mêmes paramètres (voir tableau 4.2). Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5.

	LUT1 (pas d'aérosols)	LUT2 (aérosols maritimes, $\tau_{550} = 5$)	LUT3 (aérosols industriels $\tau_{550} = 5$)
Moyenne des erreurs de mesure E (%)	-15,0	9,82	9,38
Écart-type des erreurs de mesure E (%)	3,30	7,86	0,66
Moyenne des erreurs RMS de reconstruction (%)	2,68	3,42	1,53

TABLE 4.5 – Erreurs de l'algorithme JRGE dues à l'utilisation d'un modèle d'aérosols non adapté.

On remarque que, dans le cas où l'on néglige les aérosols (*i.e.* avec la LUT1), les concentra-

tions en CO₂ sont surestimées d'environ 15% alors que l'utilisation des LUT 2 et 3 conduit à une sous-estimation de ces concentrations, de 9 à 10% en moyenne. De plus, l'écart-type de l'erreur d'estimation E est bien plus fort avec les aérosols maritimes (7,86%) qu'avec les aérosols industriels (0,66%), pour une erreur moyenne du même ordre de grandeur (environ 9%). Cela s'explique par le fait que la composition, et donc les propriétés physiques et optiques, des aérosols industriels sont plus semblables à celles des aérosols de biomasse (suie et matières organiques sont présents dans les deux modèles, bien que la granulométrie soit différente) que ne l'est la composition des aérosols maritimes, dont les sels marins sont les principaux constituants. Le choix du modèle d'aérosols a donc un impact sur la précision de l'estimation du CO₂.

Par ailleurs, l'erreur RMS dans la reconstruction du signal de luminance est de 2 à 3,5 fois plus importante lorsqu'un modèle d'aérosols non adapté est utilisé. Cette erreur est maximum dans le cas des aérosols maritimes. L'utilisation d'un modèle d'aérosols non réaliste introduit même des erreurs plus importantes que lorsqu'on néglige complètement l'effet des aérosols dans les calculs de transfert radiatif.

Enfin, l'erreur de mesure E varie entre 9 et 15% en moyenne quand un modèle d'aérosols non adapté est utilisé pour le calcul des LUT, alors qu'elle vaut environ 4% quand les particules sont correctement décrites. Cela met en évidence, là aussi, l'intérêt de retrouver les propriétés des aérosols avant d'estimer le CO₂, permettant de diviser jusqu'à un facteur deux l'erreur d'estimation du gaz.

4.4.4 Influence d'autres paramètres

Tout comme les aérosols, d'autres paramètres peuvent influencer sur le signal de luminance dans le SWIR. C'est le cas par exemple du contenu en vapeur d'eau, de la température du panache et même de sa géométrie. Il est donc important d'évaluer l'impact des incertitudes sur ces paramètres et de les comparer aux résultats précédents, liés à la description physique des aérosols.

Impact du contenu en vapeur d'eau

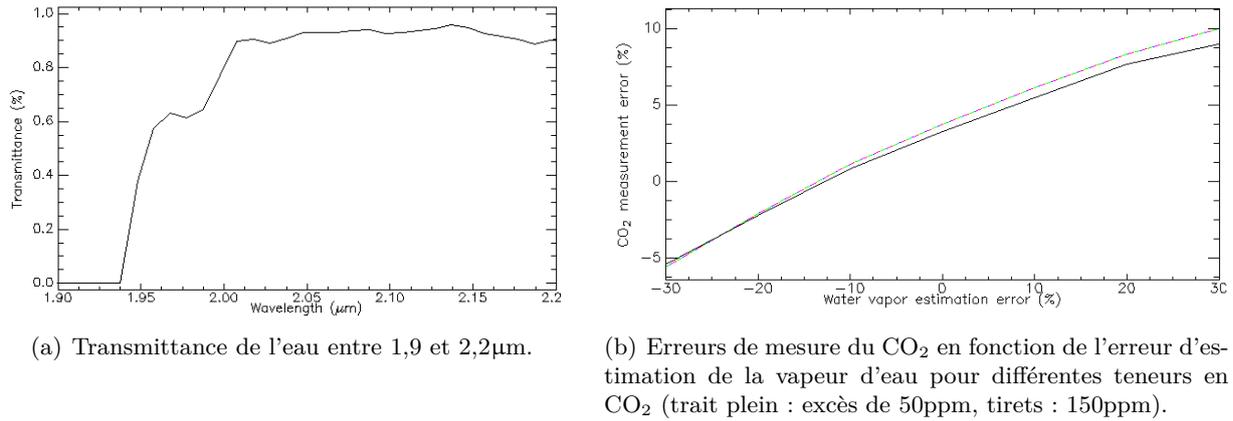
Le contenu en vapeur d'eau peut avoir une influence non négligeable sur le signal de luminance entre 1,9 et 2,2 μm , à cause d'une forte bande d'absorption des molécules de H₂O autour de 1,9 μm et d'un continuum d'absorption entre 2,0 et 2,2 μm (voir figure 4.7(a)). Une différence dans le contenu en vapeur d'eau, entre le modèle atmosphérique choisi pour le calcul de la LUT et celui effectivement présent lors de l'acquisition de l'image, peut donc affecter la qualité d'estimation du CO₂.

Pour quantifier cet éventuel biais, différentes luminances ont été simulées avec des aérosols de biomasse, différentes valeurs d'excès de CO₂, et en appliquant un facteur d'échelle au profil de vapeur d'eau, variant de 0,3 à 1,3. L'algorithme JRGE a ensuite été appliqué à ces luminances en utilisant la LUT calculée pour le profil de vapeur d'eau par défaut. Les erreurs induites dans l'estimation du CO₂ sont présentées figure 4.7(b).

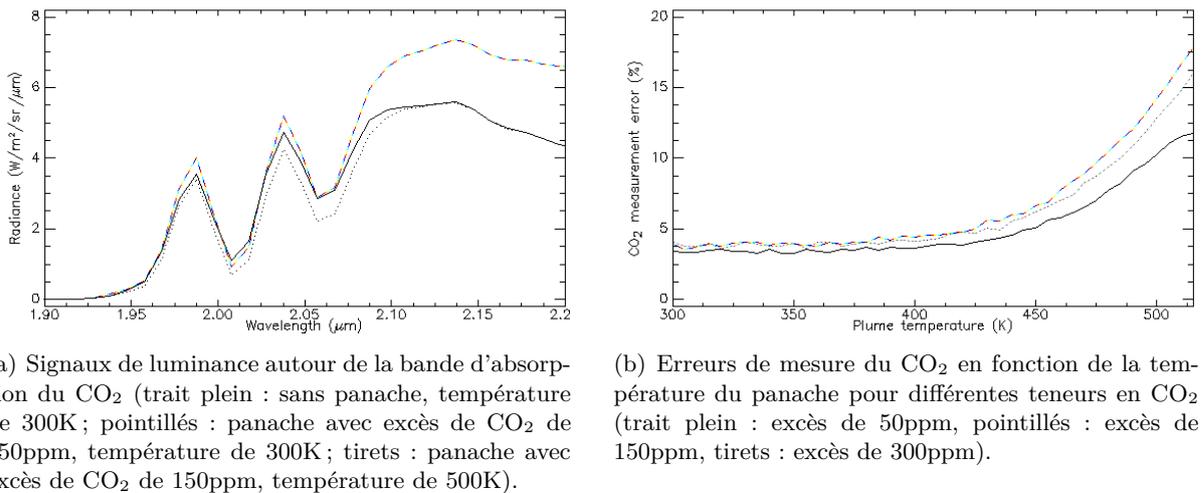
On remarque que, si aucune erreur n'est faite sur le contenu en vapeur d'eau, l'erreur d'estimation E du CO₂ atteint 4% et est due uniquement à l'interpolation de la réflectance du sol, comme expliqué au paragraphe 4.4.2. Si l'erreur sur le contenu en eau est de 10%, quelle que soit la concentration en CO₂, le biais induit dans l'estimation du CO₂ est inférieur à 6%, soit 30% de moins que celui induit par une mauvaise description des propriétés des aérosols. Or, une erreur de 10% correspond à la précision des algorithmes d'estimation de la vapeur d'eau [62].

Impact de la température

Les températures du panache et du sol peuvent également avoir un impact significatif sur les luminances dans le SWIR (voir figure 4.8(a)). En effet, l'émission thermique n'est pas considérée dans l'équation du transfert radiatif utilisée par JRGE (équation 2.16), car les sols et les molécules aux températures « naturelles » ont un impact thermique négligeable dans le SWIR. Cependant, dans le


 FIGURE 4.7 – Impact du contenu en vapeur d'eau sur l'estimation du CO_2 .

cas de pixels proches du foyer d'un feu, la température du sol et du panache peut dépasser 800K [76]. Ainsi, l'influence d'une haute température sur les résultats de JRGE a été examinée. Différentes luminances ont été simulées pour différentes températures (les températures du panache et du sol sont supposées égales) et avec différentes concentrations de CO_2 . Les résultats de JRGE sur ces luminances sont présentés figure 4.8(b).


 FIGURE 4.8 – Impact de la température sur l'estimation du CO_2 .

D'une part, pour une température inférieure à 400K, l'erreur de mesure n'excède pas 5% (valeur observée au paragraphe 4.4.2 et due à l'interpolation de la réflectance du sol). Cela signifie que, pour les pixels loin du foyer du feu, les performances de l'estimateur de CO_2 ne sont pas sensibles à la température. D'autre part, au-delà de 425K, la sous-estimation de la concentration en CO_2 augmente avec la température, et plus la teneur en CO_2 est forte, plus l'erreur d'estimation est importante (elle atteint 17% à 500K pour un excès de CO_2 de 300ppm). Cela confirme que la méthode JRGE n'est pas valide pour les pixels proches du foyer d'un feu. Il est donc nécessaire, dans le cas de l'étude d'un feu de biomasse, d'exclure ces pixels avant d'appliquer l'algorithme.

Impact de la géométrie du panache

De même que la vapeur d'eau et la température, la géométrie du panache peut également affecter l'estimation du CO_2 . En effet, la luminance, autour de la bande d'absorption du CO_2 peut varier selon

qu'on considère le panache, constitué de gaz et d'aérosols, comme homogène ou non. La figure 4.9 présente trois luminances simulées pour trois géométries de panache différentes : la première avec un panache homogène, la seconde avec les aérosols en-dessous de l'excès en CO_2 , la dernière avec l'excès de CO_2 en-dessous des aérosols. Bien que la concentration totale de molécules et de particules soit la même pour les trois simulations, on remarque que la luminance est plus forte, dans la bande d'absorption du CO_2 , lorsque les aérosols sont situés au-dessus de l'excès en gaz. Cela s'explique par le fait que, dans cette configuration, les particules rétro-diffusent une partie des photons avant que ceux-ci n'atteignent les molécules de gaz et ne soit absorbés. Cet impact de la géométrie n'est aujourd'hui pas pris en compte dans les algorithmes d'estimation de gaz, ce qui peut expliquer, du moins partiellement, les différences obtenues entre les concentrations estimées et celles mesurées *in situ*, notamment dans le cadre de la caractérisation de panaches. Cependant, après avoir appliqué l'algorithme JRGE aux trois luminances de la figure 4.9, la différence E observée n'était au plus que de 0,1%.

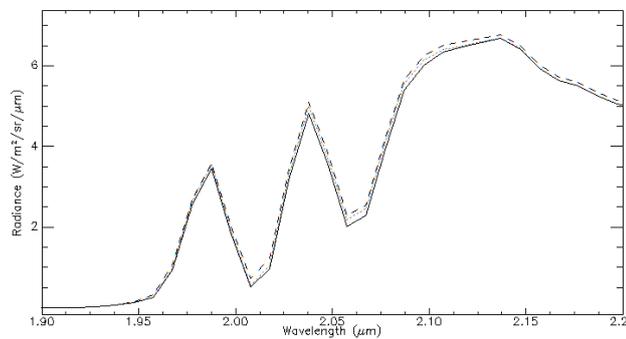


FIGURE 4.9 – Impact de la géométrie du panache sur le signal de luminance autour de la bande d'absorption du CO_2 à $2,0\mu\text{m}$. Trait plein : panache homogène entre 0 et 400m; pointillés : panache avec les aérosols entre 0 et 200m et le CO_2 entre 200 et 400m; tirets : panache avec le CO_2 entre 0 et 200m et les aérosols entre 200 et 400m.

4.4.5 Bilan

Dans le cas d'un panache de feu de biomasse, les algorithmes d'estimation du CO_2 qui utilisent des simulations de transfert radiatif dans le SWIR peuvent donner des résultats biaisés. Ce biais provient à la fois du bruit des données, de l'estimation de la réflectance du sol mais également de plusieurs paramètres liés à la description de l'atmosphère (contenu en vapeur d'eau, température, géométrie du panache et propriétés des aérosols). L'analyse de sensibilité présentée dans cette partie a montré que, pour un sol sableux, l'interpolation de la réflectance du sol induit une erreur d'estimation du CO_2 de 4% environ. De plus, une mauvaise estimation des propriétés des aérosols, et particulièrement de leur granulométrie, entraînait une augmentation de l'erreur d'estimation du gaz, bien que l'erreur RMS de reconstruction du signal de luminance reste inférieure à 2%. Si les aérosols ne sont pas pris en compte dans les calculs de transfert radiatif, le CO_2 est sur-estimé de 15% en moyenne. Mais si un modèle non adapté est utilisé pour décrire les propriétés des aérosols, l'erreur d'estimation du CO_2 est supérieure à 9% et l'erreur RMS peut dépasser 3%.

En comparaison, une erreur de 10% dans le contenu en vapeur d'eau induit une erreur d'au maximum 6,5%, et une sous-estimation de 100K de la température (du sol et du panache) ne dégrade pas les performances de l'algorithme. Ainsi, la description des propriétés des aérosols apparaît comme le paramètre le plus influent sur la qualité de l'estimation du CO_2 dans un panache dense, tel celui d'un feu de biomasse. En particulier, la concentration des aérosols et leur granulométrie ont un

impact important sur le signal de luminance à 2,0 μ m. Une mauvaise estimation du rayon modal augmente donc significativement les erreurs d'estimation du CO₂.

Pour estimer le CO₂ dans un panache dense à partir d'images hyperspectrales acquises dans le SWIR, il semble donc judicieux de retrouver, au préalable, les propriétés des aérosols. Plusieurs approches peuvent ensuite être envisagées. On peut, par exemple, ajouter une dimension à la LUT atmosphérique utilisée par l'algorithme d'estimation du CO₂, pour tenir compte des propriétés des aérosols retrouvées. Cela implique la création d'une LUT de taille très conséquente, ce qui nécessite un temps de calcul très important (plusieurs semaines sur un processeur Pentium double CPU, à 2,66GHz avec 4GB de RAM), ce qui peut poser problème, d'autant que la LUT est à recalculer pour chaque nouvelle image traitée.

Pour réduire ce temps de calcul, une autre approche a été choisie. Après l'estimation des propriétés des aérosols, les pixels sont répartis en différentes classes, selon les valeurs retrouvées pour le rayon modal et l'épaisseur optique (la variance intra-classe doit être de moins de 10%). Puis, une LUT atmosphérique est créée pour chaque classe, en utilisant la valeur moyenne des propriétés estimées des aérosols. Enfin, l'algorithme JRGE est appliqué en utilisant, pour chaque classe, la LUT appropriée. Cette approche a été adoptée pour l'estimation du CO₂ sur deux images AVIRIS acquises au-dessus de feu de biomasse. les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

4.5 Application sur des images AVIRIS

Afin d'évaluer les performances de la méthode proposée sur des données hyperspectrales réelles, deux images AVIRIS (*Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer*) de feu de biomasse ont été choisies. La première a été acquise à Quinault, Washington, simultanément à des prélèvements d'échantillons d'aérosols et de mesures *in situ* de CO₂. Ces données complémentaires permettent de confronter les résultats de nos algorithmes aux valeurs mesurées. Cependant, le panache est principalement au-dessus de l'eau, et l'algorithme d'estimation du CO₂ n'est pas valide sur des surfaces sombres dans le SWIR comme l'eau ou la végétation. Les résultats ont donc été examinés sur quatre zones d'intérêt, relativement restreintes, qui sont des zones de sable ou de roche nue. Afin d'analyser les résultats sur une plus large zone, une seconde image AVIRIS a été traitée. Elle a été acquise à Aberdeen, Washington. Sur cette image, le panache est au-dessus de la terre, ce qui permet de discuter la distribution spatiale des concentrations de CO₂ retrouvées.

4.5.1 Image du feu de Quinault

Présentation des données

La première image AVIRIS traitée a été acquise en septembre 1994, au-dessus d'un feu de végétation déclenché près de la ville de Quinault (47,32°N, 124,27°O), pendant la campagne SCAR-C [77, 78] (*Smoke Cloud And Radiation - California*). Elle a été choisie car plusieurs mesures *in situ* ont été faites simultanément à son acquisition. Des aérosols ont été collectés dans le panache et analysés en laboratoire, ce qui a permis de déterminer leur teneur en suie et leur taille [79]. De plus, le contenu total en CO₂ (appelé colonne totale) a été mesuré : en-dehors du panache, il variait de 345 à 350ppm et l'excès dû au panache, qui était localisé entre 0 et 400m, était de 40 à 120ppm (soit une colonne totale pouvant valoir 470ppm) [78].

Les propriétés des aérosols ont été estimées, par notre algorithme, sur tout le panache mais le CO₂ n'a été retrouvé que pour les pixels dont la réflectance à 2,0 μ m est supérieure à 0,1 (une trop faible réflectance induisant un trop faible signal de luminance pour que les pics d'absorption du gaz soient visibles). Ainsi, les zones de mer et de végétation dense n'ont pas été considérées. Quatre régions d'intérêt (ROI) ont été particulièrement étudiées (voir figure 4.10(a)) : la plage en-dehors du panache (ROI rouge, 128 pixels, 1540m de long), la plage sous le panache dense (ROI verte, 60

pixels, 1140m de long), la plage sous le panache fin (ROI violette, 50 pixels, 800m de long) et le foyer du feu (ROI bleue, 2785 pixels). Comme expliqué précédemment (paragraphe 4.4.5), plusieurs bases de données atmosphériques ont été simulées pour l'application de JRGE.

Estimation du CO₂ sans prise en compte des aérosols

Dans un premier temps, l'estimation du CO₂ a été effectuée suivant la procédure décrite au paragraphe 4.3.3, sans prise en compte des aérosols dans la couche limite de l'atmosphère. La concentration en CO₂ « de fond » a été fixée à 345ppm au lieu de 330ppm pour le modèle d'atmosphère US standard 1976 pour être en accord avec les mesures *in situ*. Les résultats obtenus sont présentés figures 4.10(b) et 4.10(c).

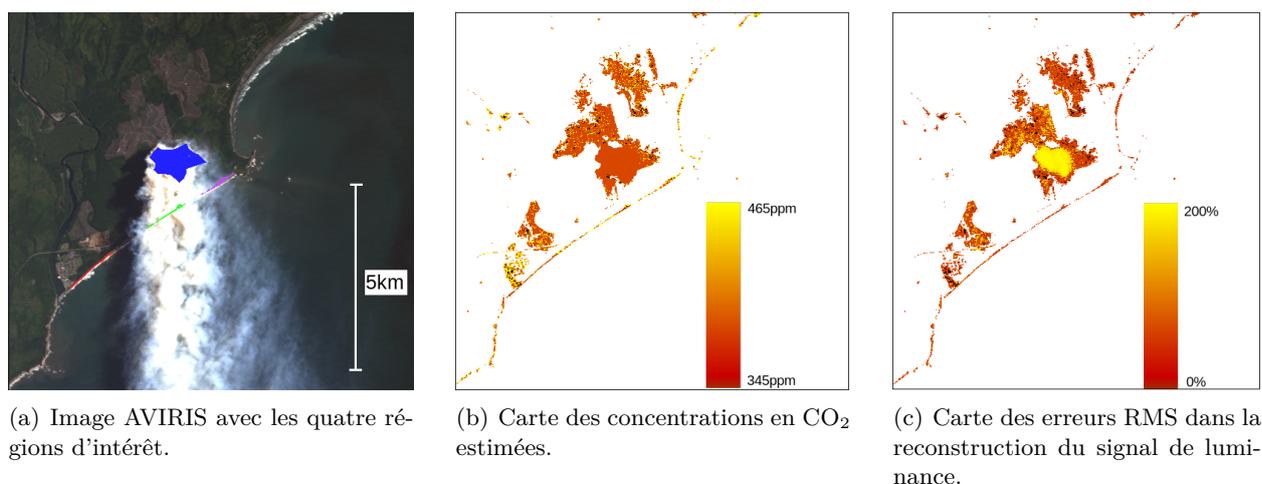


FIGURE 4.10 – Résultats de l'estimation du CO₂ sur l'image du feu de Quinault sans estimation préalable des aérosols.

Les valeurs de concentration en CO₂ retrouvées varient entre 345 et 465ppm. Cependant, en observant la carte des erreurs RMS, on remarque que, près du foyer du feu, la reconstruction du signal de luminosité est très mauvaise (erreur supérieure à 100%). Cela est dû à l'émission thermique importante dans cette zone. Pour les quatre régions d'intérêt, les résultats détaillés sont présentés dans le tableau 4.6. Pour les pixels de plage en-dehors du panache, la valeur moyenne retrouvée est en bon accord avec les mesures *in situ* et l'erreur RMS est inférieure à 5%. Pour les pixels sous le panache (ROI verte et violette), les valeurs moyennes retrouvées sont supérieures aux mesures *in situ* et l'écart-type est deux fois plus grand que pour les pixels hors panache. L'analyse de sensibilité effectuée précédemment a en effet montré que négliger l'impact des aérosols induisait une forte sur-estimation de la concentration en CO₂. Pour les pixels proches du foyer du feu, l'erreur RMS est en moyenne de 100% ce qui indique que les concentrations estimées sont très peu fiables. Cela confirme que l'algorithme utilisé ici, qui ne prend pas en compte l'émission thermique dans le modèle de transfert radiatif, n'est pas adapté aux zones dont la température dépasse 400K.

Estimation des aérosols

Comme une LUT atmosphérique ne tenant pas compte des aérosols n'est pas adaptée à l'estimation du gaz dans le panache, la création d'une LUT contenant des aérosols de biomasse est nécessaire. Pour cela, il est nécessaire d'estimer, à partir de cette image, les propriétés des aérosols. La méthode présentée au paragraphe 4.3.2 a donc été appliquée. Les résultats obtenus sont présentés figure 4.11. Comme ces résultats ont déjà été présentés par *Alakian et al.* [46], nous ne les discuterons pas ici. Nous noterons simplement qu'ils sont en bon accord avec les mesures issues des échantillons de

	Colonne moyenne estimée (ppm)	colonne moyenne mesurée <i>in situ</i> (ppm)	Écart-type des estimations (ppm)	Erreur RMS moyenne de reconstruction du signal de luminance (%)
Plage hors panache	348	347	10	3,07
Plage sous panache dense	368	359	20	2,04
Plage sous panache fin	364	359	17	2,30
Foyer du feu	345	361	1,8	100

TABLE 4.6 – Erreurs de l’algorithme JRGE sur quatre régions d’intérêt sans prise en compte des aérosols.

particules prélevées. Parmi les pixels de la plage, 50% sont retrouvés avec une erreur RMS de moins de 1% sur la reconstruction du signal de luminance. Cependant, la qualité des résultats se dégrade lorsque l’épaisseur optique augmente.

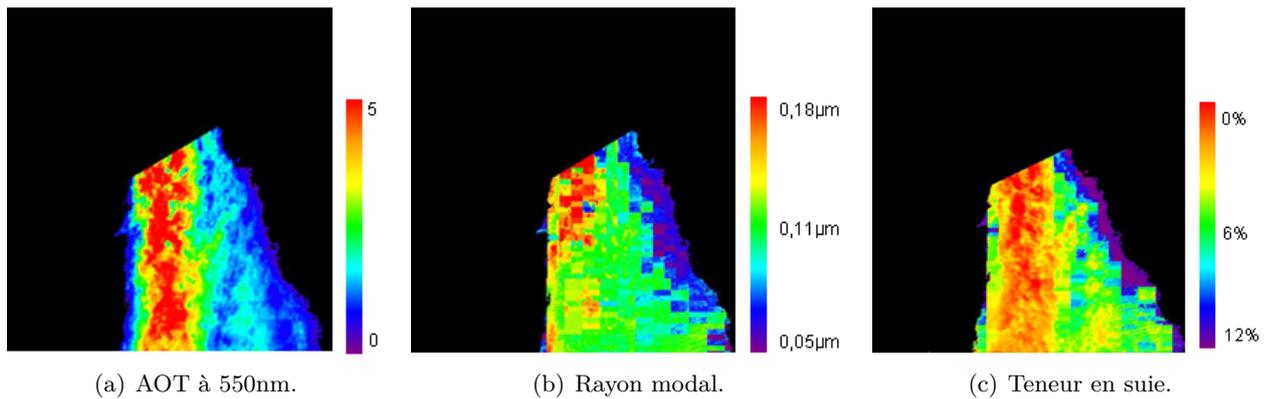


FIGURE 4.11 – Résultats de l’estimation des aérosols sur l’image du feu de Quinault.

Pour les pixels de la plage (extrémité haute des cartes de la figure 4.11), on peut distinguer deux classes principales, selon les propriétés microphysiques des aérosols retrouvées. Pour les pixels situés à gauche (où l’épaisseur optique est forte), les valeurs moyennes retrouvées sont : $\tau_{500} = 5$, $f_{BC} = 2\%$ et $r_m = 0,15\mu\text{m}$, et pour les pixels de droite : $\tau_{500} = 1$, $f_{BC} = 8\%$ et $r_m = 0,9\mu\text{m}$. Ces deux jeux de paramètres microphysiques, appelés respectivement jeu1 et jeu2, ont été utilisés pour simuler deux jeux de propriétés optiques correspondantes. La figure 4.12 présente l’extinction normalisée et l’albédo de diffusion simple obtenus pour ces deux jeux de paramètres. On remarque des différences notables, notamment concernant l’albédo. Cela justifie la nécessité de créer deux bases de données de termes atmosphériques distinctes pour l’application de l’algorithme JRGE sur ces deux zones.

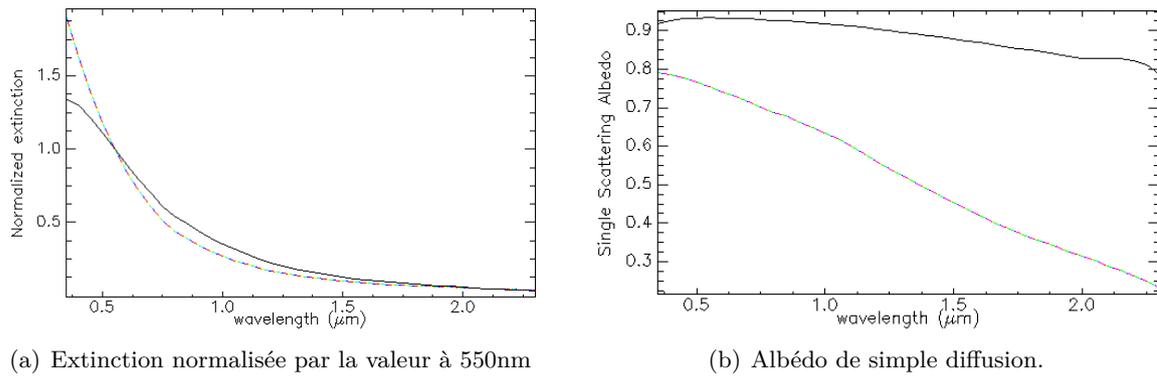


FIGURE 4.12 – Propriétés optiques d’aérosols de biomasse calculées avec COMPAS pour différentes propriétés microphysiques (trait plein : $f_{BC} = 2\%$, $r_m = 0,21\mu\text{m}$; tirets : $f_{BC} = 8\%$, $r_m = 0,13\mu\text{m}$).

Estimation du CO₂ à l’aide des propriétés des aérosols préalablement retrouvées

Après avoir généré les deux LUT de termes atmosphériques, l’estimation du CO₂ a été recalculée. Pour les pixels proches du foyer et sous le panache dense, le jeu1 de paramètre microphysique a été choisi. Pour les pixels hors panache et sous le panache fin, le jeu2 a été préféré. Les résultats pour les quatre régions d’intérêt sont présentés dans le tableau 4.7.

	Colonne moyenne estimée (ppm)	Colonne moyenne mesurée <i>in situ</i> (ppm)	Écart type des estimations (ppm)	Erreur RMS moyenne de reconstruction du signal de luminance (%)
Plage hors panache	347	347	8,2	3,07
Plage sous panache dense	351	359	5,4	2,40
Plage sous panache fin	357	359	15	2,77
Foyer du feu	350	361	0,6	139

TABLE 4.7 – Erreurs de l’algorithme JRGE sur quatre régions d’intérêt en utilisant les propriétés des aérosols préalablement retrouvées.

Pour la plage sous le panache fin, la colonne de CO₂ estimée est bien plus proche des mesures *in situ* que dans le paragraphe précédent. La sous-estimation de la teneur en gaz est désormais de 12ppm, alors qu’elle était de 5ppm lorsque les aérosols n’étaient pas pris en compte. Le biais induit par la diffusion des aérosols a donc été en grande partie corrigé. Pour la plage sous le panache dense, la sur-estimation de 9ppm de la colonne de CO₂ a également été corrigée et l’écart-type des estimations a été réduit (de 20 à 5ppm), mais la concentration en CO₂ est désormais sous-estimée. En effet, lorsque le panache est optiquement dense et que l’albédo des aérosols est proche de 1 (*i.e.* un panache épais et brillant), la diffusion des aérosols est maximale. Dans ce cas, comme l’a montré l’analyse de sensibilité, la concentration en CO₂ a tendance à être sous-estimée.

De plus, l’impact radiatif des aérosols n’est pas parfaitement décrit car on a supposé que les aérosols avaient les mêmes propriétés au sein d’une région d’intérêt. Or leurs propriétés varient vite spatialement. Cependant, l’écart-type des concentrations de CO₂ est bien plus faible que lorsque les aérosols sont négligés, ce qui est plus réaliste physiquement. En outre, les concentrations les plus

hautes sont bien retrouvées pour les pixels où le panache est le plus épais.

Bien qu'un biais entre mesures *in situ* et estimations persistent quand l'épaisseur optique est grande, il semble y avoir une cohérence spatiale dans les estimations de CO₂ obtenues lorsqu'on décrit les aérosols en utilisant un modèle physique adapté. Pour le vérifier, nous avons appliqué notre méthode sur un second jeu de données.

4.5.2 Image du feu d'Aberdeen

Présentation des données

Pendant la campagne SCAR-C, une autre image AVIRIS a été acquise sur un second feu de biomasse, près d'Aberdeen (47,10°N, 123,30°O). Bien qu'aucune mesure *in situ* n'ait été faite, l'application de notre méthode sur cette image permet de discuter de la cohérence spatiale des concentrations retrouvées. En effet, le panache est au-dessus de la terre (végétation et roche nue). Or, la réflectance de la roche à 2,0μm est supérieure à 0,1, ce qui permet au CO₂ d'être convenablement estimé sur ces zones.

Estimation des aérosols

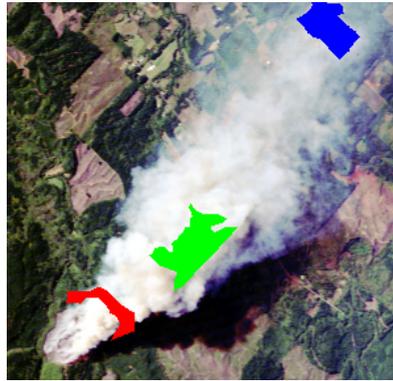
De la même manière que pour l'image de Quinault, nous avons estimé les propriétés des aérosols. Les résultats obtenus sont présentés figure 4.13. Tout comme pour l'image précédente, la distribution spatiale des paramètres retrouvés semble cohérente : l'épaisseur optique et le rayon modal décroissent avec la distance au foyer car les particules les plus lourdes tombent du fait de la gravité, alors que la teneur en suie augmente. A partir de ces cartes, on peut distinguer trois zones au sein desquelles les paramètres physiques sont relativement homogènes : le panache proche du foyer, le panache dense (épaisseur optique forte, rayon moyen, faible teneur en suie) et le panache plus fin (épaisseur optique plus faible, rayon petit, plus forte teneur en suie). Ces zones sont délimitées par des traits blancs sur les cartes de la figure 4.13. Pour calculer les LUT atmosphériques nécessaires à l'application de JRGE, les paramètres microphysiques des aérosols ont été fixés aux valeurs moyennes retrouvées sur ces trois zones.

Estimation du CO₂

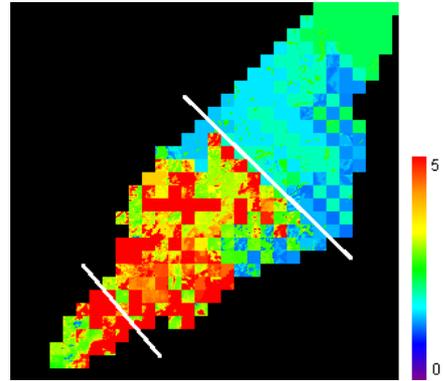
Nous avons donc estimé le CO₂ pour tous les pixels de l'image dont la réflectance est supérieure à 0,1 à 2,0μm, en utilisant quatre LUT atmosphériques (une pour chaque zone précitée et une pour les pixels hors panache). Le résultat est présenté figure 4.14(a) (la ligne rouge délimite le panache d'aérosols). Les plus fortes valeurs de CO₂ estimées atteignent 700ppm (ce qui correspond à un excès de 370ppm), ce qui est trois fois plus que pour l'image de Quinault. La valeur moyenne est de 376ppm. A titre de comparaison, nous présentons figure 4.14(b) la carte du CIBR pour le CO₂, qui est défini par

$$\text{CIBR} = \frac{L(\lambda_m)}{0,666L(\lambda_1) + 0,334L(\lambda_2)}, \quad (4.3)$$

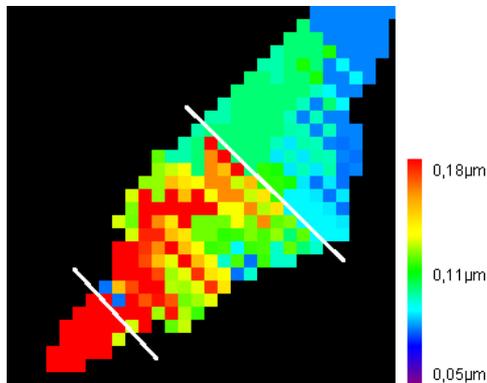
où $L(\lambda_m)$, $L(\lambda_1)$ et $L(\lambda_2)$ sont respectivement les valeurs de la luminance à 2,008μm, 1,988μm et 2,038μm. Ce rapport est souvent utilisé pour l'estimation des concentrations en CO₂ car il est sensible à la profondeur du pic d'absorption. Mais, comme l'a montré *Dennison* [80], ce rapport est en fait plus sensible à la température qu'à la concentration en CO₂. En effet les pixels rouges de la figure 4.14(b) sont situés près du foyer du feu.



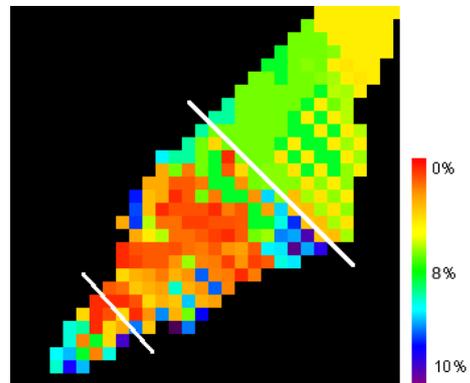
(a) Image AVIRIS avec les trois régions d'intérêt.



(b) AOT à 550nm.

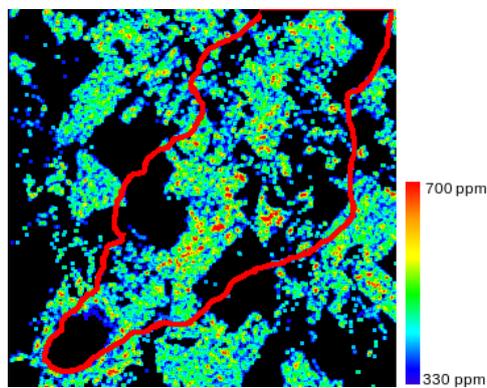


(c) Rayon modal.

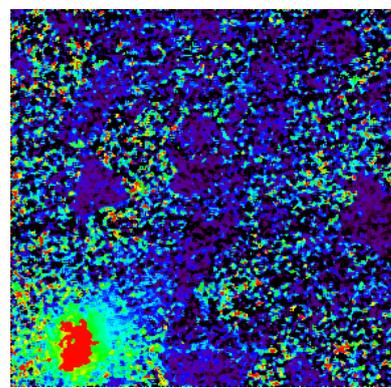


(d) Teneur en suie.

FIGURE 4.13 – Résultats de l'estimation des aérosols sur l'image du feu d'Aberdeen.



(a) Méthode proposée.



(b) Carte du CIBR.

FIGURE 4.14 – Résultats de l'estimation du CO_2 sur l'image du feu d'Aberdeen.

Afin d’analyser plus finement les résultats de notre méthode sur cette image, nous avons examiné trois régions d’intérêt (colorées sur l’image de la figure 4.13(a)) : une zone de roche nue près du foyer (ROI rouge, 619 pixels), une zone de roche nue sous le panache dense (ROI verte, 1657 pixels) et une zone de roche nue sous le panache fin (ROI bleue, 1083 pixels). Les résultats obtenus pour ces trois régions sont présentés dans le tableau 4.8. Sans mesure *in situ*, il est difficile d’évaluer la pertinence de ces résultats. On peut cependant les comparer entre eux et à ceux obtenus pour l’image de Quinault. La concentration de CO₂ moyenne est de 35ppm supérieure sous le panache dense que sous le panache fin, ce qui semble cohérent car la distance au foyer augmente. Cependant, près du foyer, la concentration moyenne retrouvée est de 20ppm inférieure à celle du panache dense. Il semble donc que, là encore, on sous-estime le CO₂ du fait de l’émission thermique. En ce qui concerne la distribution spatiale des concentrations retrouvées, la carte obtenue semble également cohérente : les plus fortes valeurs de CO₂ sont bien obtenues pour les pixels au centre du panache et les valeurs estimées décroissent globalement avec la distance au centre du panache (ce qui n’est pas du tout le cas pour la carte de CIBR).

	Colonne moyenne estimée (ppm)	Écart-type des estimations (ppm)	Erreur RMS moyenne de reconstruction du signal de luminance (%)
Roche sous panache dense	455	63,9	3,80
Roche sous panache fin	420	47,0	3,80
Roche proche du foyer du feu	436	55,0	2,96

TABLE 4.8 – Résultats de l’estimation du CO₂ sur trois régions d’intérêt.

4.6 Conclusion

La caractérisation de panaches optiquement denses par imagerie hyperspectrale dans le réflectif, soulève un certain nombre de problèmes, en particulier du fait des fortes interactions entre les gaz et les aérosols dans le VNIR et le SWIR. La qualité de l’estimation du CO₂, par exemple en utilisant la bande d’absorption à 2,0 μ m, est fortement dépendante de la description des aérosols présents dans le panache, et, dans une moindre mesure, d’autres paramètres comme la température, la géométrie du panache ou la vapeur d’eau. L’étude présentée dans ce chapitre a mis en évidence ces interactions et a proposé une méthode permettant l’estimation conjointe du CO₂ et des propriétés des aérosols dans un panache dense.

A l’aide de données simulées par MODTRAN, une étude de sensibilité a été conduite. Elle a permis de montrer, notamment, que l’utilisation d’un modèle physique d’aérosols non adapté pouvait entraîner une erreur de plus de 9% dans l’estimation des concentrations en CO₂, soit une erreur bien plus importante que celle induite par une mauvaise connaissance de la température ou du contenu en vapeur d’eau.

La méthode développée consiste à coupler une méthode d’estimation des aérosols et une méthode d’estimation de gaz qui utilisent des domaines spectraux différents. D’abord, les propriétés des aérosols sont retrouvées grâce aux longueurs d’onde du VNIR. Puis, les propriétés optiques de ces aérosols sont simulées dans le SWIR. Enfin, les concentrations en gaz sont estimées grâce à des bandes d’absorption du SWIR. Cette méthode a été appliquée sur deux images AVIRIS de feux de biomasse, dont une pour laquelle des mesures *in situ* étaient disponibles. Cela a permis de montrer que les

résultats obtenus étaient très satisfaisants pour les zones où l'épaisseur optique était de l'ordre de 1 ou 2. Pour des épaisseurs optiques plus fortes, la concentration en gaz reste sous-estimée. Cependant, les distributions spatiales des concentrations retrouvées sont cohérentes partout (les valeurs les plus fortes étant retrouvées pour les pixels au centre du panache).

Une limitation a cependant été soulevée : la méthode proposée n'est pas valable pour les zones où la température (du sol ou du panache) est supérieure à 500K, comme les foyers de feu par exemple. L'intérêt majeur, en revanche, réside dans le fait que cette méthode est applicable à la caractérisation de n'importe quel type de panache, pourvu que son épaisseur optique soit assez forte (une AOT supérieure à 1). Le cas des panaches optiquement fins est traité dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Estimation du type d'aérosols dans un panache industriel : la méthode EARTH

5.1 Introduction

La méthode présentée dans le chapitre précédent permet l'estimation conjointe du CO₂ et des aérosols dans un panache à partir d'images hyperspectrales. Cependant, elle présente deux inconvénients qui rendent son application difficile sur des fumées industrielles. Tout d'abord, elle n'est valable que pour des panaches optiquement denses (AOT supérieure à 1). Ensuite, elle requiert une connaissance *a priori* sur la nature des aérosols qui constituent le panache. Or, comme nous l'avons expliqué dans les premiers chapitres, les aérosols émis par les industries sont de natures extrêmement variables et, du fait des nombreuses interactions qu'ils subissent avec les gaz atmosphériques et les aérosols naturels, leurs propriétés changent significativement en fonction de la distance à la source d'émission.

Nous avons donc souhaité développer une nouvelle méthode, spécifiquement adaptée aux panaches industriels, et permettant d'estimer à partir d'une image hyperspectrale, sans aucune connaissance *a priori*, le type de particules constituant un panache. Cette méthode, que nous avons appelée EARTH, pour *Estimation of AeRosol Type using Hyperspectral data*, est présentée dans ce chapitre. Après une description du fonctionnement de la méthode, nous présentons une analyse de ses performances, effectuée sur données simulées. Enfin, les résultats de cette méthode, appliquée sur une image hyperspectrale aéroportée acquise au-dessus d'une usine métallurgique, sont présentés et discutés.

5.2 Principe de la méthode

5.2.1 Démarche globale

Un panache émis par une usine est généralement d'une épaisseur optique inférieure à 1, bien plus faible que les panaches volcaniques ou de feu de végétation (voir l'image de la figure 5.8). La séparation, dans le signal de luminance acquis par un capteur hyperspectral, entre la contribution du sol et des aérosols, qui varient toutes les deux lentement avec la longueur d'onde, est donc difficile. Par ailleurs, les zones industrielles sont constituées de matériaux très hétérogènes (béton, asphalte, végétation, eau), dont les réflectances sont très différentes, et de nombreux bâtiments, qui sont responsables de réflexions multiples. Il est, de plus, très probable qu'un panache industriel passe au-dessus de plusieurs de ces matériaux et de ces bâtiments.

Partant de ces constatations, la méthode EARTH repose sur une hypothèse principale : on suppose qu'il est possible de trouver dans le panache plusieurs couples de pixels adjacents situés i) soit au niveau d'une transition entre deux types de sol pleinement éclairés ii) soit au niveau d'une transition ombre/soleil sur un même sol (ombre d'un bâtiment par exemple). Dans le cas d'un panache industriel, cette hypothèse est tout à fait réaliste. Notons cependant qu'elle requiert l'utilisation d'un capteur possédant une bonne résolution spatiale (de l'ordre du mètre) pour que ces zones de transitions puissent être précisément repérées et que les pixels choisis soient les plus purs possible spectralement. Cette approche s'inspire des travaux de *Thomas et al.* sur les aérosols en zone urbaine à partir d'images multispectrales à haute résolution spatiale [81, 82].

Ces couples de pixels, sélectionnés par l'utilisateur, permettent d'estimer les propriétés optiques des aérosols présents dans le panache à l'aide des équations de transfert radiatif (après avoir préalablement estimé la réflectance du sol et l'atmosphère hors panache). Ensuite, les propriétés estimées sont comparées à une *Look-Up Table* générée avec le code COMPAS pour différents modèles d'aérosols, et différentes propriétés microphysiques pour chacun de ces modèles. Enfin, des scores de dissimilarité sont calculés pour chaque couple de pixels et chaque modèle d'aérosols de la LUT. Le modèle conduisant au score le plus faible pour l'ensemble des couples est finalement choisi comme étant le plus probable. La figure 5.1 présente un schéma synthétisant les différentes étapes de la méthode.

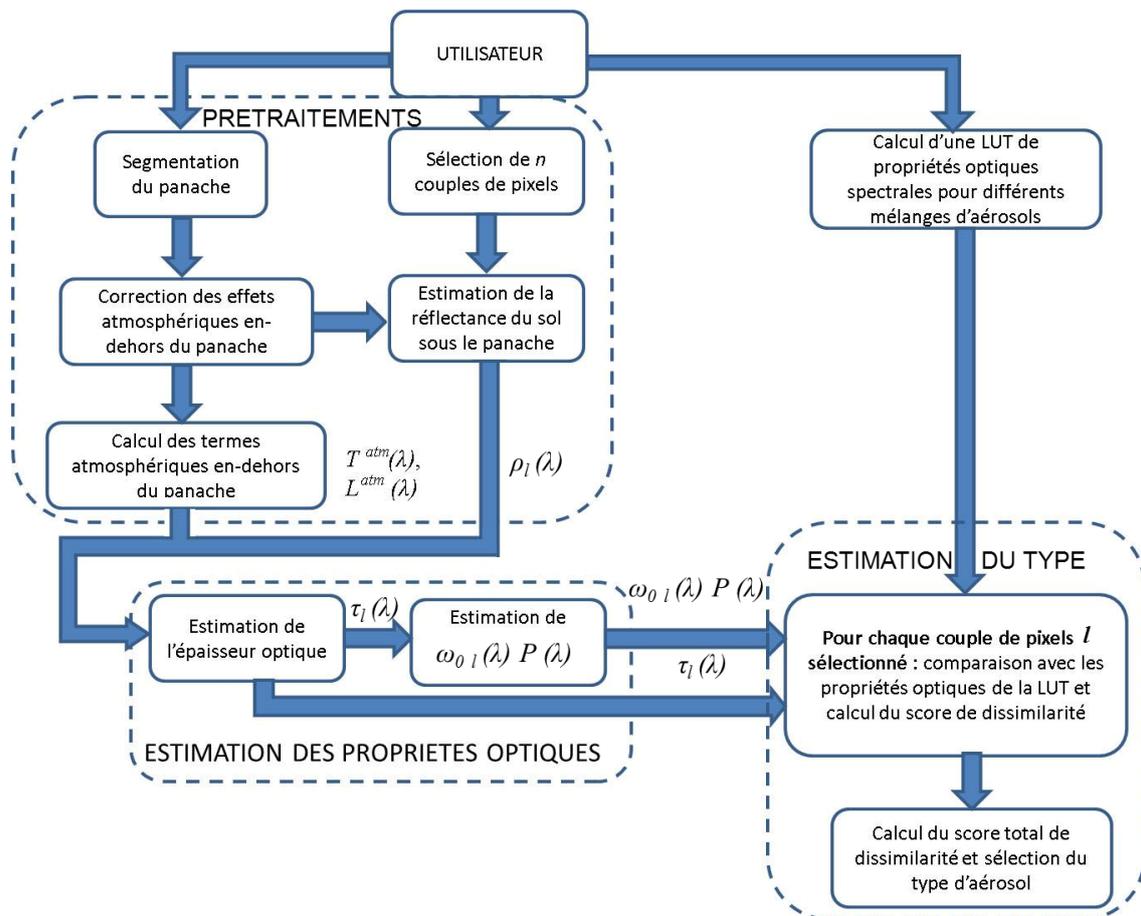


FIGURE 5.1 – Schéma global de fonctionnement de la méthode EARTH.

5.2.2 Modèle de transfert radiatif utilisé

Les équations du transfert radiatif dans le domaine réfléchif, avec et sans panache, ont été données dans le chapitre 2 (équations 2.16 et 2.17). En présence d'un panache, nous rappelons que la luminance enregistrée par le capteur s'écrit

$$L^{capteur}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + L^{panache}(\lambda) + \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \frac{T^{atm}(\lambda) T^{panache}(\lambda)}{[1 - (S^{atm}(\lambda) + S^{panache}(\lambda)) \rho^{sol}(\lambda)]} \rho^{sol}(\lambda). \quad (5.1)$$

Notons que, avec ces notations, $T^{atm}(\lambda)$ et $T^{panache}(\lambda)$ représentent respectivement les transmittances totales de l'atmosphère et du panache (directes et diffuses, montantes et descendantes). Ainsi, on peut écrire

$$T^{atm}(\lambda) = T^{atm,\uparrow}(\lambda) T^{atm,\downarrow}(\lambda), \quad (5.2)$$

où $T^{atm,\uparrow}(\lambda)$ et $T^{atm,\downarrow}(\lambda)$ sont respectivement les transmittances montante et descendante de l'atmosphère (directes et diffuses).

Dans le cas d'un panache peu dense, et si la visibilité hors panache est suffisamment élevée, on peut négliger les réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère. Dans ce cas, l'équation 5.1 se simplifie :

$$L^{capteur}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + L^{panache}(\lambda) + \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T^{atm}(\lambda) T^{panache}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda). \quad (5.3)$$

Par ailleurs, pour un panache peu dense optiquement, l'énergie transmise dans ce panache de manière diffuse est très petite devant l'énergie transmise directement. Ainsi, si l'on néglige la transmittance diffuse due aux aérosols du panache, la transmittance $T^{panache}(\lambda)$ du panache s'écrit

$$\begin{aligned} T^{panache}(\lambda) &= T_{dir}^{panache,\downarrow}(\lambda) T_{dir}^{panache,\uparrow}(\lambda) \\ &= e^{-\frac{\tau(\lambda)}{\mu_s}} e^{-\frac{\tau(\lambda)}{\mu_v}} \\ &= e^{-\frac{(\mu_s + \mu_v)\tau(\lambda)}{\mu_s \mu_v}}, \end{aligned} \quad (5.4)$$

où $\tau(\lambda)$ est l'épaisseur optique spectrale des aérosols du panache et μ_s et μ_v sont respectivement les cosinus de l'angle zénithal solaire et de l'angle de visée du capteur.

La luminance due à la diffusion par le panache s'écrit, elle, après linéarisation [83],

$$L^{panache}(\lambda) = \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \frac{\tau(\lambda) \omega_0(\lambda) P(\lambda)}{4\mu_s \mu_v}, \quad (5.5)$$

où $\omega_0(\lambda)$ et $P(\lambda)$ sont respectivement l'albédo de diffusion simple et la fonction de phase des aérosols du panache. Par ailleurs, cette fonction de phase peut elle-même être approchée par la fonction de Henyey-Greenstein, qui s'écrit

$$P(\lambda) = \frac{1}{4\pi} \frac{(1 - g^2(\lambda))}{(1 + g\check{s}(\lambda) - 2g(\lambda) \cos(\Theta))^{3/2}}, \quad (5.6)$$

où $g(\lambda)$ est le facteur d'asymétrie des aérosols et Θ est l'angle de diffusion, défini par

$$\cos(\Theta) = \mu_s \mu_v - \sin(\Theta_s) \sin(\Theta_v) \sin(\Phi_v - \Phi_s), \quad (5.7)$$

où Θ_s et Θ_v sont respectivement l'angle zénithal solaire et l'angle zénithal de visée, Φ_s et Φ_v l'angle azimutal solaire et l'angle azimutal de visée.

Finalement, on obtient l'expression de la luminance du capteur suivante

$$L^{capteur}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \left(\frac{\tau(\lambda) \omega_0(\lambda) P(\lambda)}{4\mu_s \mu_v} + T^{atm}(\lambda) e^{-\frac{(\mu_s + \mu_v)\tau(\lambda)}{\mu_s \mu_v}} \rho^{sol}(\lambda) \right). \quad (5.8)$$

Développer un algorithme d'estimation de propriétés des aérosols basé sur cette seule équation (en cherchant des triplets $\{\tau(\lambda)\omega_0(\lambda)P(\lambda)\}$ permettant de modéliser au mieux, d'après cette équation, les pixels d'une image) n'est pas possible sans utiliser d'information *a priori*. En effet, plusieurs triplets $\{\tau(\lambda)\omega_0(\lambda)P(\lambda)\}$ peuvent conduire à la même luminance capteur. C'est pourquoi nous proposons d'estimer d'abord $\tau(\lambda)$, à partir de différences de luminances, puis le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$.

Pour cela, nous avons besoin d'extraire des paires de pixels adjacents de deux types : soit situés à une transition entre deux types de sols (pleinement éclairés), soit à une transition ombre/soleil pour le même sol. Nous supposons, dans les deux cas, que les propriétés des aérosols sont identiques pour deux pixels d'une même paire mais peuvent varier d'une paire à l'autre.

Sous cette hypothèse (d'autant plus vérifiée que la résolution spatiale de l'image est haute), pour un couple de pixels au soleil, sur deux sols différents, on peut écrire

$$L_1^{capteur}(\lambda) - L_2^{capteur}(\lambda) = \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T^{atm}(\lambda) e^{-\frac{(\mu_s + \mu_v)\tau(\lambda)}{\mu_s \mu_v}} \left(\rho_1^{sol}(\lambda) - \rho_2^{sol}(\lambda) \right), \quad (5.9)$$

où $L_1^{capteur}(\lambda)$ et $L_2^{capteur}(\lambda)$ sont les luminances capteur des deux pixels et $\rho_1^{sol}(\lambda)$ et $\rho_2^{sol}(\lambda)$ les réflectances des deux sols différents.

Pour un pixel à l'ombre, l'éclairement descendant direct est nul. La luminance du capteur est donc la somme des luminances montantes de l'atmosphère et du panache, et de l'éclairement diffus réfléchi par le sol. L'équation 5.3 devient :

$$L_{ombre}^{capteur}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + L^{panache}(\lambda) + \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} T_{dif}^{atm,\downarrow}(\lambda) T^{atm,\uparrow}(\lambda) T^{panache}(\lambda) \rho^{sol}(\lambda), \quad (5.10)$$

où $T_{dif}^{atm,\downarrow}(\lambda)$ est la transmittance descendante diffuse de l'atmosphère. Ainsi, pour un couple de pixels sur une transition ombre/soleil sur un même sol, la différence des luminances s'écrit

$$L_{soleil}^{capteur}(\lambda) - L_{ombre}^{capteur}(\lambda) = \frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \left(T^{atm,\downarrow}(\lambda) - T_{dif}^{atm,\downarrow}(\lambda) \right) T^{atm,\uparrow}(\lambda) e^{-\frac{(\mu_s + \mu_v)\tau(\lambda)}{\mu_s \mu_v}} \rho^{sol}(\lambda). \quad (5.11)$$

L'écriture de ces différences de luminances (équations 5.9 et 5.11) permet de n'avoir à estimer, dans un premier temps, qu'un unique paramètre dépendant des aérosols : l'épaisseur optique $\tau(\lambda)$.

5.2.3 Correction atmosphérique et estimation de la réflectance du sol sous le panache

Dans la méthode EARTH, l'utilisateur doit fournir, avec l'image qu'il souhaite traiter, plusieurs couples de pixels (situés à des transitions entre deux types de sol ou entre ombre et lumière) et un masque du panache. En effet, la segmentation automatique d'un panache industriel est difficile et nous n'avons donc pas, aujourd'hui, automatisé cette étape. En revanche, tout le reste de l'algorithme est automatique.

Correction atmosphérique

Le code de correction atmosphérique ATCOR [84] (*Atmospheric Topographic Correction*) a été choisi pour corriger les effets atmosphériques. Notons qu'il permet également d'estimer le type des aérosols de fond, la visibilité moyenne en-dehors du panache et la teneur en vapeur d'eau. Ces paramètres sont donc estimés à partir des pixels de l'image hors du panache. Puis, ATCOR est appliqué à l'ensemble de l'image de luminance pour obtenir une image de réflectance (dans et en-dehors du panache). Enfin, à partir des conditions d'acquisition de l'image et des paramètres retrouvés par ATCOR, le code de transfert radiatif MODTRAN est utilisé pour calculer les termes atmosphériques en-dehors du panache : $T^{atm}(\lambda)$, $T^{atm,\uparrow}(\lambda)$, $T^{atm,\downarrow}(\lambda)$, $T_{dif}^{atm,\downarrow}$ et $L^{atm}(\lambda)$. $E_s(\lambda)$ est supposé connu.

Estimation de la réflectance du sol sous le panache

L'estimation du sol sous le panache est effectuée, pour chaque pixel sélectionné, selon la méthode de *Bojinski et al.* [72], déjà utilisée dans le précédent chapitre. Comme nous souhaitons ensuite appliquer notre algorithme sur une image CASI (voir section 5.5) qui ne possède pas de bandes dans le SWIR, nous avons ajouté une option permettant de ne considérer que les bandes du VNIR (nous avons dû, pour cela, modifier légèrement l'algorithme). Par ailleurs, comme nous souhaitons travailler avec des images ayant une très bonne résolution spatiale (donc un très grand nombre de pixels), nous avons ajouté une étape (calcul des indices de pureté) permettant de diminuer le temps de calcul.

Finalement, les différentes étapes de l'algorithme d'estimation du sol sous le panache, tel que nous l'avons utilisé, sont les suivantes :

- Nous déterminons d'abord les 10% des pixels de l'image hors panache qui sont les plus purs spectralement, à l'aide du *Pixel Purity Index* [85].
- Ensuite, pour chaque pixel du panache sélectionné par l'utilisateur, nous comparons, au sens des moindres carrés, la réflectance de ce pixel et celles des pixels purs en-dehors du panache. Un coefficient de pondération α , dépendant de la longueur d'onde, est utilisé.
- Enfin, le pixel pur hors du panache dont la réflectance pondérée est la plus proche de celle du pixel du panache est sélectionné. On impose alors à la réflectance du pixel du panache d'être égale à celle du pixel pur sélectionné pour toutes les longueurs d'onde inférieures à $0,7\mu\text{m}$.

L'ajout du coefficient α de pondération dans la comparaison des réflectances est nécessaire pour tenir compte de l'information portée par les premières bandes spectrales. En effet, l'algorithme de *Bojinski et al.* a été développé pour des images acquises simultanément par deux capteurs, l'un dans le VNIR, l'autre dans le SWIR. Ce n'est pas le cas des images CASI qui ne disposent pas de bandes spectrales au-delà de $1,1\mu\text{m}$. Or, l'utilisation des seules bandes comprises entre $0,7$ et $1,1\mu\text{m}$ ne permet pas d'identifier précisément la nature d'un matériau et peut induire des erreurs dans l'estimation de la réflectance.

Par ailleurs, comme les panaches industriels sont de faibles épaisseurs optiques, la contribution du sol dans le signal de luminance enregistré par le capteur n'est pas négligeable, même aux faibles longueurs d'onde. Ainsi, aux longueurs d'onde où le panache est transparent, ce coefficient α est fixé à 1, et plus l'épaisseur optique des aérosols croît, plus ce coefficient diminue. Ici, nous avons fixé ce coefficient à λ^2 (avec λ exprimée en μm) pour les longueurs d'onde inférieures à $0,7\mu\text{m}$. Ainsi, il croît avec la longueur d'onde à une vitesse comparable à celle avec laquelle l'épaisseur optique des aérosols décroît.

5.2.4 Estimation des propriétés optiques des aérosols

Algorithme d'inversion

Pour chaque couple de pixel sélectionné, l'utilisateur indique s'il s'agit d'un couple situé à une transition ombre/soleil ou entre deux types de sol. Selon cette information, l'une des équations 5.9 ou 5.11 est utilisée pour retrouver l'épaisseur optique spectrale. Afin de diminuer la sensibilité au bruit, la forme spectrale de l'AOT est imposée. Nous utilisons une forme généralisée de la loi d'Angström, proposée par *King et Byrne* [86] :

$$\tau(\lambda) = \exp \left(a_0 + a_1 \ln \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) + a_2 \ln^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) \right), \quad (5.12)$$

où λ_0 est une longueur d'onde de référence que nous avons choisie à $0,55\mu\text{m}$. Pour estimer l'épaisseur optique, nous utilisons donc un algorithme de type Levenberg-Marquardt qui trouve le triplet $\{a_0, a_1, a_2\}$ qui minimise la différence entre les deux termes des équations 5.9 ou 5.11.

Une fois l'épaisseur optique estimée, elle est utilisée pour estimer les autres propriétés optiques des aérosols pour ce même couple de pixels. Les équations 5.6 et 5.8 sont utilisées pour trouver l'albédo de diffusion simple ω_0 et le facteur d'asymétrie g . Nous excluons cependant, pour l'estimation de ces propriétés, les bandes d'absorption des gaz. De la même manière, nous imposons une forme spectrale à ces deux coefficients :

$$\omega_0(\lambda) = \exp\left(b_0 + b_1 \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) + b_2 \ln^2\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)\right), \quad (5.13)$$

$$g(\lambda) = c_0 + c_1(\lambda - \lambda_0). \quad (5.14)$$

L'algorithme de Levenberg-Marquardt est à nouveau utilisé pour trouver le 5-uplet $\{b_0, b_1, b_2, c_0, c_1\}$ qui minimise la différence, pour les deux pixels du couple, entre les deux termes de l'équation 5.8.

Non-unicité des solutions

L'estimation des propriétés radiatives $\tau(\lambda)$, $\omega_0(\lambda)$ et $g(\lambda)$ du panache à partir des luminances capteur est un problème dégénéré : plusieurs triplets $\{\tau(\lambda), \omega_0(\lambda), g(\lambda)\}$ peuvent conduire au même signal observé. L'estimation en deux temps de ces propriétés optiques (d'abord $\tau(\lambda)$ puis $\omega_0(\lambda)$ et $g(\lambda)$ simultanément) permet en partie de lever cette ambiguïté. En effet, il existe un unique $\tau(\lambda)$ (et donc un unique triplet $\{a_0, a_1, a_2\}$) qui permet de vérifier les équations 5.9 et 5.11.

En revanche, pour une AOT $\tau(\lambda)$ donnée, plusieurs couples $\{\omega_0(\lambda), g(\lambda)\}$ peuvent conduire à la même luminance du panache $L^{panache}(\lambda)$ (voir équation 5.5) et donc l'équation 5.8 ne permet pas d'estimer sans ambiguïté $\omega_0(\lambda)$ et $g(\lambda)$. En effet, le terme de cette équation permettant l'estimation de $\omega_0(\lambda)$ et $g(\lambda)$ est le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$, où $P(\lambda)$ est la fonction de phase calculée à partir de l'équation 5.6. Ainsi, suivant les conditions initiales de l'algorithme d'optimisation et les valeurs réelles des propriétés optiques, il est possible qu'un des deux termes du produit soit sous-estimé et l'autre sur-estimé. En revanche, le produit est toujours estimé sans biais. Donc, pour ne pas risquer d'appuyer la détermination du type d'aérosols sur des propriétés optiques mal estimées, il a été décidé de comparer à la LUT l'AOT spectrale $\tau(\lambda)$ normalisée par sa valeur à $0,55\mu\text{m}$ et le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$. La normalisation de l'AOT permet de s'affranchir de la concentration totale de particules. Ainsi, l'AOT normalisée ne dépend que de la distribution en tailles des aérosols et du type de particules.

5.2.5 Calcul des scores de dissimilarité et détermination du type d'aérosols

Pour chaque couple l de pixels sélectionné, l'AOT normalisée $\widehat{\tau_{norm,l}}(\lambda)$ et le produit $\widehat{\omega_{0,l}}(\lambda)\widehat{P_l}(\lambda)$ estimés sont comparés à ceux des éléments de la LUT. Pour chaque élément n_i de la LUT, deux scores de dissimilarité sont calculés :

$$D_{l,n_i}^1 = \sum_{k=1}^{N_\lambda} \sqrt{\widehat{\tau_{norm,l}}(k)^2 - \tau_{norm,n_i}(k)^2}, \quad (5.15)$$

et

$$D_{l,n_i}^2 = \sum_{k=1}^{N_\lambda} \sqrt{\left(\widehat{\omega_{0,l}}(k)\widehat{P_l}(k)\right)^2 - \left(\omega_{0,n_i}(k)P_{n_i}(k)\right)^2} \quad (5.16)$$

où N_λ est le nombre de bandes spectrales considérées, τ_{norm,n_i} , ω_{0,n_i} et P_{n_i} sont respectivement l'AOT normalisée, l'albédo de diffusion simple et la fonction de phase de l'élément n_i de la LUT calculée avec le code COMPAS.

Pour chaque modèle d'aérosol m considéré pour la génération de la LUT, on peut calculer des scores de dissimilarité totaux pour les L couples de pixels sélectionnés

$$D_{tot,m}^1 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(\min_{n_i \in [n_1; n_n]} D_{l,n_i}^1 \right), \quad (5.17)$$

$$D_{tot,m}^2 = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \left(\min_{n_i \in [n_1; n_n]} D_{l,n_i}^2 \right), \quad (5.18)$$

où $n_1 \dots n_n$ sont les éléments de la LUT correspondant au modèle m , c'est-à-dire les jeux de propriétés optiques calculées pour un même type d'aérosol, mais pour différentes granulométries et différentes proportions des constituants dans le mélange.

Le type d'aérosol est, théoriquement, le modèle de la LUT qui conduit aux scores $D_{tot,m}^1$ et $D_{tot,m}^2$ les plus faibles. Nous verrons, en pratique, par la suite (paragraphe 5.5.5), que le score $D_{tot,m}^2$ seul sera finalement utilisé pour déterminer le type des aérosols. Nous examinerons cependant ces deux scores dans l'étude qui suit.

5.3 Génération de la *Look-Up Table*

5.3.1 Modèles d'aérosols choisis

Pour générer la LUT de propriétés optiques utilisée par la suite, nous avons choisi quatre modèles d'aérosols. Chacun d'entre eux est détaillé ci-après.

- **Modèle 1 : particules de feu de végétation.** Le modèle d'aérosols représentant des particules de feu de végétation a été décrit dans le chapitre précédent, au paragraphe 4.2.2. Il s'agit d'un mélange interne de suie et de matières organiques. La fraction volumique en suie est donnée par le paramètre f_{BC} . La distribution en taille suit une loi lognormale monomodale de moyenne r_m et d'écart-type σ_m .
- **Modèle 2 : aérosols urbains.** Ce modèle décrit des aérosols principalement anthropiques, représentant un mélange d'aérosols urbains et industriels, loin de leurs sources d'émission. Il est issu des mesures de la campagne ESCOMPTE [11], présentée au chapitre 2, paragraphe 2.2.5. Il s'agit d'un mélange externe de suie, de matières organiques et de sulfates. La distribution en taille suit une loi lognormale à quatre modes.
- **Modèle 3 : aérosols industriels métalliques.** L'étude présentée au chapitre 3 a permis d'établir un modèle d'aérosols représentant des particules présentes dans un panache émis par une usine métallurgique. Il s'agit d'un mélange externe de particules métalliques, d'aluminosilicates, de suie, de matières solubles et de matières insolubles (voir paragraphe 3.7.1). Les variations des différents paramètres de ce modèle ont été choisies pour représenter le mélange des aérosols à plusieurs distances de la source d'émission. La distribution en taille suit une loi lognormale à 5 modes. Les indices de réfraction utilisés pour décrire les particules métalliques et les mélanges métalliques/aluminosilicates sont ceux issus du chapitre 3 pour les échantillons collectés dans les cheminées de refroidissement et de cuisson (tableau 3.2).
- **Modèle 4 : particules émises par la combustion d'un dépôt de pétrole.** Afin d'ajouter un autre modèle d'aérosols anthropiques à notre LUT, nous avons choisi d'utiliser les mesures de *Mather et al.* [53] qui décrivent les particules présentes dans le panache émis par l'explosion d'un dépôt de pétrole. Il s'agit d'un mélange interne de grosses particules de suie et de gouttelettes d'eau (avec une fraction volumique en suie bien plus importante que dans le cas des feux de végétation).

Pour chacun de ces modèles, nous avons calculé, à l'aide du code COMPAS, les propriétés optiques des aérosols entre 0,4 et 1,1 μ m, en faisant varier les paramètres de granulométrie et la proportion des principaux constituants du mélange. Le tableau 5.1 synthétise les données utilisées pour la génération de cette LUT.

	Modèle 1 (particules de feu de végétation)	Modèle 2 (aérosols urbains)	Modèle 3 (aérosols industriels métalliques)	Modèle 4 (particules émises par la combustion d'un dépôt de pétrole)
Suie	$r_m=[0,05;0,15;0,25]$, $\sigma_m=[1,4;1,6;1,8;2,0]$, $f_{BC}=[0;3;6;9;12]$	$r_1=[0,15;0,20;0,25;0,30;0,35]$, $\sigma_1=[1,4;1,6;1,8;2,0]$, $f_{BC}=[5;10;15;20;25]$	$r_1=0,08$, $\sigma_1=2,2$, $f_1=2$	$r_m=[0,4;0,6;0,8]$, $\sigma_m=[1,3;1,5]$, $f_{BC}=[50;60;70;80]$
Matières organiques	Même granulométrie que la suie (mélange interne)	$r_{fin}=0,027$, $\sigma_{fin}=1,86$, $f_{fin}=45$, $r_{grossier}=0,29$, $\sigma_{grossier}=1,95$, $f_{grossier}=0,01$	-	-
Sulfates	-	$r_{sul}=0,04$, $\sigma_{sul}=1,74$, $f_{sul}=35$	-	-
Refroidissement	-	-	$r_2=[0,01;0,03;0,05]$, $\sigma_2=[2,0;2,2;2,4]$, $f_2=[30,45,60]$	-
Cuisson	-	-	$r_3=0,07$, $\sigma_3=1,3$, $f_3=[9,13,17]$	-
Matière soluble	-	-	$r_4=0,047$, $\sigma_4=1,6$, $f_4=15$	-
Matière insoluble	-	-	$r_5=0,08$, $\sigma_5=1,2$, $f_5=7$	-
Gouttelettes d'eau	-	-	-	Même granulométrie que la suie (mélange interne)

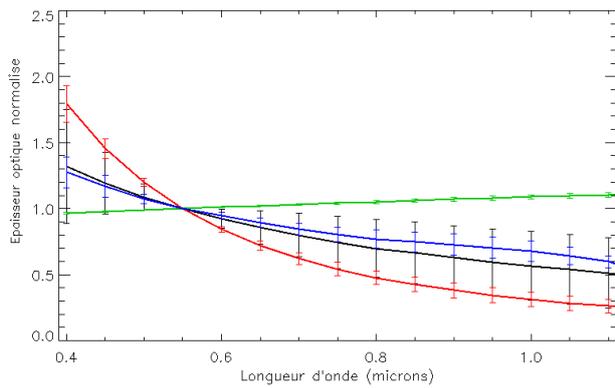
TABLE 5.1 – Description des paramètres choisis, pour les quatre modèles d'aérosols, pour le calcul de la LUT des propriétés optiques (les rayons r sont exprimés en μm , les fractions f en % et les écarts-types σ sont sans unité).

5.3.2 Analyse des propriétés optiques des aérosols

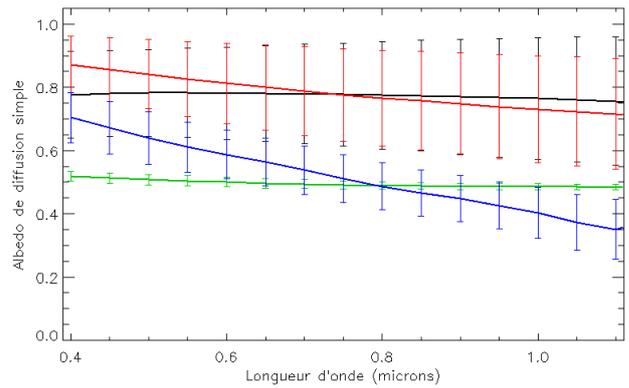
Pour chaque jeu de propriétés microphysiques du tableau 5.1, les propriétés optiques $\tau(\lambda)$ et $\omega_o(\lambda)$ et $g(\lambda)$ ont été calculées. La figure 5.2 présente les moyennes et les écarts-types des différentes propriétés optiques pour chacun des modèles de la LUT.

On remarque que l'estimation de l'AOT seule permet déjà de différencier plusieurs types d'aérosols. Les aérosols du modèle 4, qui sont de grosses particules, ont une épaisseur optique spectrale très différente des autres modèles, car c'est la seule qui ne décroît pas avec la longueur d'onde. Les particules du modèle 1 semblent également avoir une AOT spectrale qui les distinguent des autres modèles car, au contraire, leur AOT décroît très rapidement avec la longueur d'onde. En revanche, il n'est pas possible de différencier les aérosols des modèles 2 et 3 en observant seulement l'épaisseur optique. Cela justifie donc l'estimation des autres propriétés optiques.

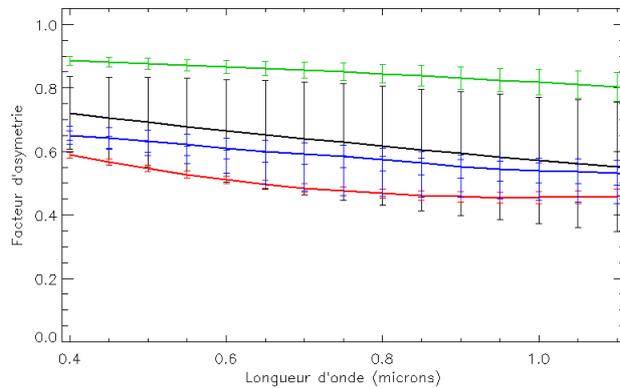
L'observation de l'albédo de diffusion simple et du facteur d'asymétrie permet de remarquer que ces deux paramètres diffèrent bien d'un modèle à l'autre (les différences étant plus significatives pour l'albédo de diffusion simple). Comme notre algorithme n'estime pas, sans biais, ces deux paramètres, nous avons également tracé le produit $\omega_o(\lambda)P(\lambda)$. On obtient des allures spectrales relativement similaires aux courbes des albédos de diffusion simple. En particulier, les modèles 2 et 3, qui ont une AOT spectrale similaire, possèdent des albédos très différents. L'estimation du produit $\omega_o(\lambda)P(\lambda)$ permettrait donc bien de différencier ces deux types d'aérosols.



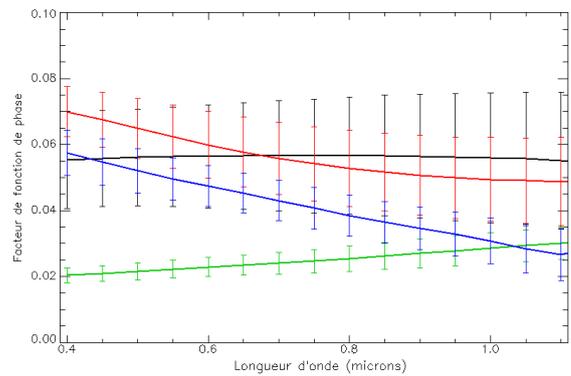
(a) Épaisseur optique normalisée.



(b) Albédo de diffusion simple.



(c) Facteur d'asymétrie.



(d) Produit de l'albédo et de la fonction de phase, pour un angle zénithal solaire de 30° et un capteur visant au nadir.

FIGURE 5.2 – Moyennes et écarts-types des propriétés optiques des différents modèles d'aérosols de la LUT (rouge : modèle 1, noir : modèle 2, bleu : modèle 3, vert : modèle 4).

5.4 Étude de sensibilité

5.4.1 Les principales sources d'erreurs

Afin d'analyser les performances de la méthode EARTH, une étude de sensibilité a été menée sur des données simulées. L'erreur totale dans l'estimation des propriétés des aérosols par l'algorithme proposé peut être décomposée en cinq erreurs distinctes :

- **L'erreur de modélisation.** C'est l'erreur induite par l'utilisation des équations présentées au paragraphe 5.2.2. En effet, comme nous l'avons indiqué, l'équation 5.3 néglige les réflexions multiples des photons entre le sol et l'atmosphère. Les équations 5.4 et 5.5 négligent, elles, les réflexions multiples dans le panache. Ces différentes simplifications entraînent des différences entre les luminances mesurées et les luminances modélisées.
- **L'erreur algorithmique.** L'erreur algorithmique est l'erreur due uniquement à l'algorithme d'inversion. L'utilisation des coefficients $a_0, a_1, a_2, b_o, b_1, b_2, c_o$ et c_1 dans les équations 5.12, 5.13 et 5.14 ainsi que l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour les estimer peut effectivement conduire à des propriétés optiques estimées différentes des propriétés optiques réelles des aérosols.
- **L'erreur due au bruit instrumental.** Tout capteur fournit des luminances mesurées qui contiennent un bruit propre à l'instrument. Bien que ce bruit soit généralement faible, particulièrement pour les bandes spectrales du VNIR, il convient d'en évaluer l'impact sur notre algorithme.
- **L'erreur due à la réflectance du sol.** La qualité de l'estimation de la réflectance du sol sous le panache est un facteur important dans l'analyse des performances de la méthode EARTH. Si celle-ci est mal estimée, ces erreurs se répercutent sur l'estimation des propriétés optiques des aérosols, ce qui peut fausser la détermination de leur type.
- **L'erreur due à l'atmosphère hors panache.** Le dernier paramètre qui peut influencer sur les performances de la méthode EARTH est l'estimation des termes atmosphériques de l'équation du transfert radiatif. Nous évaluerons donc également l'impact d'une erreur dans l'estimation de ces termes.

5.4.2 Méthode d'analyse

Pour évaluer l'erreur de modélisation, des luminances et transmittances simulées avec MODTRAN (en insérant un panache d'aérosols métalliques, modèle 3 de la LUT, dans un modèle d'atmosphère standard, et en tenant compte des diffusions multiples) ont été comparées aux luminances et transmittances fournies par le modèle de transfert radiatif simplifié, présenté au paragraphe 5.2.2.

Pour estimer les autres postes d'erreurs (algorithmique, bruit instrumental, réflectance du sol et atmosphère hors panache), des luminances issues de notre modèle de transfert radiatif simplifié, et calculées toujours pour des aérosols métalliques, ont été fournies à l'algorithme d'estimation des propriétés optiques des aérosols. Les propriétés ainsi estimées ont ensuite été comparées à celles utilisées dans le calcul des luminances d'entrée.

Pour chaque simulation, un panache d'aérosols métalliques (modèle 3 de la LUT), compris entre 0 et 400m a été ajouté à une atmosphère hors panache, représentée par le modèle *mid-latitude summer* de MODTRAN.

Le cas des transitions entre deux types de sol et celui des transitions ombre/soleil ont été considérés. Les réflectances choisies pour les sols sont issues de la librairie spectrale JHU. Nous avons choisi le spectre du béton (*concrete*) pour les transitions à l'ombre et ceux du béton et du goudron (*tar*) pour les transitions entre deux types de sol.

Les principaux paramètres d'entrée pour les simulations sont indiqués dans le tableau 5.2.

Réfectances des sols	<i>Concrete, tar</i> (béton, goudron)
Altitude du capteur (km)	2,0
Angle azimutal de visée (°)	0
Angle zénithal de visée (°)	0 (nadir)
Angle azimutal solaire (°)	180
Angle zénithal solaire (°)	30
Modèle atmosphérique	Mid-latitude summer (cf. Modtran report [18])

TABLE 5.2 – *Principaux paramètres utilisés pour les simulations visant à quantifier, pour la méthode EARTH, les différentes sources d'erreurs.*

5.4.3 Erreur de modélisation

Pour évaluer l'erreur de modélisation, nous avons donc simulé des luminances (en utilisant MODTRAN avec l'option DISORT 16 flux pour la prise en compte des diffusions multiples), pour des valeurs d'épaisseur optique variant entre 0,1 et 2,0 puis nous les avons comparées aux luminances modélisées par les équations précédemment présentées.

Pour le calcul des termes atmosphériques hors panache de l'équation du transfert radiatif, une simulation MODTRAN a été effectuée dans les mêmes conditions (avec les paramètres du tableau 5.2), mais sans panache d'aérosols.

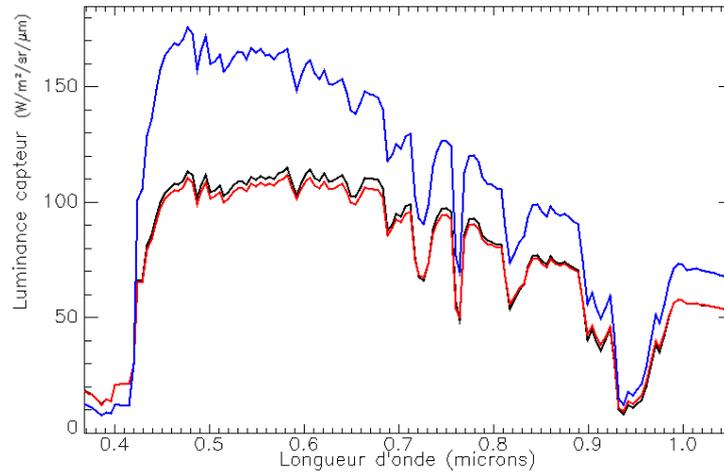
Notons, dès à présent, que les simplifications qui conduisent aux équations utilisées dans le paragraphe 5.2.2 sont d'autant plus vérifiées que l'épaisseur optique du panache est faible. En effet, les phénomènes de diffusion multiples sont dus à la présence des aérosols et plus leur concentration est faible, plus il est légitime de négliger ces phénomènes.

Par ailleurs, les différents tests que nous avons effectués nous ont permis de conclure que l'erreur de modélisation dépend très peu du type d'aérosols et du type de sols choisis pour les simulations.

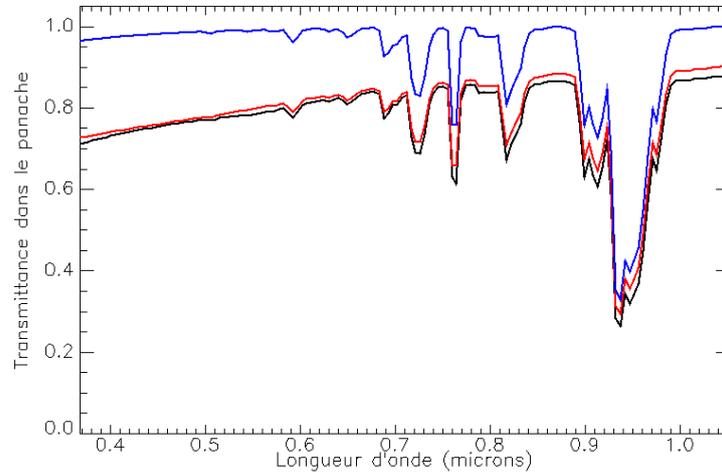
La figure 5.3 présente, pour différentes composantes radiatives, le résultat de la simulation avec aérosols (en noir), celle de la simulation sans aérosols (en bleu), et le résultat obtenu avec les équations présentées au paragraphe 5.2.2 pour une AOT de 0,5 à 550nm. Sur cette figure, la transmittance calculée est le produit de la transmittance atmosphérique (hors panache) et de la transmittance du panache, et la luminance montante est la somme de la luminance atmosphérique (hors panache) et de la luminance du panache.

On remarque une légère sous-estimation de la luminance montante au-delà de $0,5\mu\text{m}$, mais une bonne adéquation entre les transmittances simulées et modélisées. Cela entraîne une légère différence dans la luminance capteur, inférieure tout de même à 0,55% pour une AOT de 0,5 à 550nm.

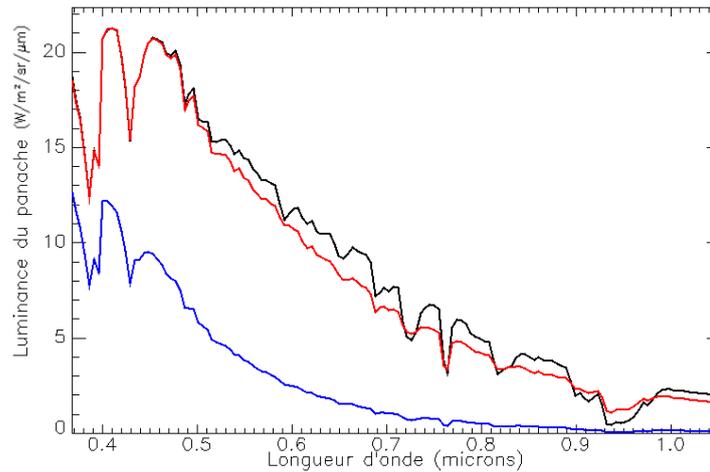
Comme nous le prévoyions, les différences entre simulations et modélisations augmentent avec l'épaisseur optique du panache. Ainsi, la différence observée sur la luminance du panache est inférieure à 1% pour une AOT de 0,1 à 550nm, vaut 5% pour une AOT de 1 et atteint près de 13% pour une AOT de 2. Pour ces épaisseurs optiques, l'erreur sur la transmittance du panache vaut respectivement 2,5%, 6% et 12%. Ces résultats nous ont amené à définir une gamme d'AOTs à 550nm, optimale pour l'utilisation de notre méthode : [0,2 - 1,5]. En effet, la méthode EARTH, qui repose sur des équations du transfert radiatif simplifiées en négligeant les diffusions multiples, n'est pas adaptée aux panaches optiquement denses. Par ailleurs, des AOTs trop faibles rendent difficile l'estimation des propriétés des aérosols du fait de leur très faible contribution dans le signal de luminance enregistré par le capteur.



(a) Luminance capteur.



(b) Transmittance du panache.



(c) Luminance du panache.

FIGURE 5.3 – Estimation de l'erreur de modélisation : signaux simulés et modélisés pour une épaisseur optique du panache de 0,5 à 550nm (noir : simulation avec aérosols, bleu : simulation sans aérosols, rouge : résultat issu de l'équation du transfert radiatif). a) Luminance capteur, b) Transmittance, c) Luminance montante.

5.4.4 Erreur algorithmique

L'erreur algorithmique a été estimée en fournissant à l'algorithme d'inversion des luminances modélisées à l'aide des équations du transfert radiatif (et de propriétés optiques d'aérosols, simulées par le code COMPAS), puis en comparant les propriétés retrouvées à celles fournies en entrée. Pour nos simulations, nous avons à nouveau utilisé le modèle 3 de la LUT pour générer les propriétés optiques des aérosols et nous avons fait varier l'épaisseur optique à 550nm. Pour chaque simulation, nous avons calculé l'erreur dans l'estimation de $\tau(\lambda)$ et du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$, au sens des moindres carrés.

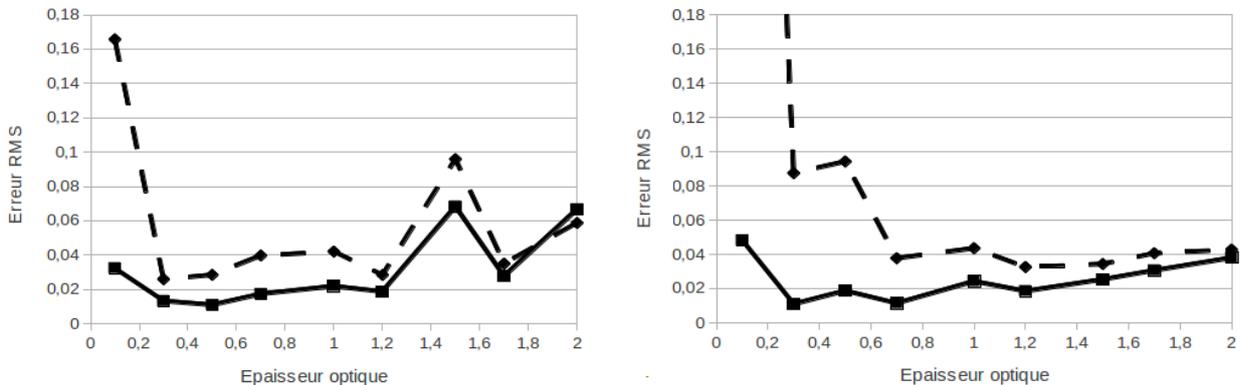
La figure 5.4 présente les résultats obtenus pour des transitions sol1/sol2 et ombre/soleil (une erreur RMS de 0,05 représente une erreur d'environ 4,5%). Notons que les différences observées ont deux causes distinctes.

La première est le choix d'un nombre restreint de paramètres pour décrire la forme spectrale des propriétés optiques et l'utilisation des équations 5.12, 5.13 et 5.14. Cependant, des tests sur données simulées (générées pour un grand nombre de propriétés microphysiques différentes) ont montré que l'erreur induite par ces équations sur les propriétés optiques étaient généralement inférieures à 1%.

La seconde source d'erreur est l'algorithme d'inversion lui-même. En effet, nous avons utilisé un algorithme d'optimisation de type Levenberg-Marquardt, qui est donc sensible aux conditions d'initialisation. Comme nous n'avons pas souhaité injecter des connaissances *a priori* sur les propriétés optiques, les valeurs d'initialisation des paramètres $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_o$ et c_1 ont été arbitrairement fixées au centre des intervalles de variation. Ceci peut, dans certains cas, entraîner l'algorithme d'optimisation à converger vers un minimum local et expliquer des erreurs dans l'estimation de ces paramètres.

Pour les deux types de transition, on remarque, sur la figure 5.4, que les erreurs obtenues sont faibles (inférieures à 4% en moyenne), sauf pour les très faibles épaisseurs optiques (AOT de 0,1 à 550nm). Avec une trop faible concentration d'aérosols, l'impact des aérosols sur les signaux observés est très faible et l'algorithme d'optimisation peut converger plus facilement vers un jeu de paramètres différent de celui utilisé pour la simulation des luminances. A partir d'une épaisseur optique de 0,3 à 550nm, l'impact des aérosols est assez fort pour que l'algorithme converge vers la bonne solution.

On note cependant une erreur plus forte, dans le cas d'une transition entre deux types de sol, pour une AOT de 1,5 que pour une AOT de 1,7. En effet, pour cette simulation, l'algorithme d'optimisation a convergé vers un minimum local.



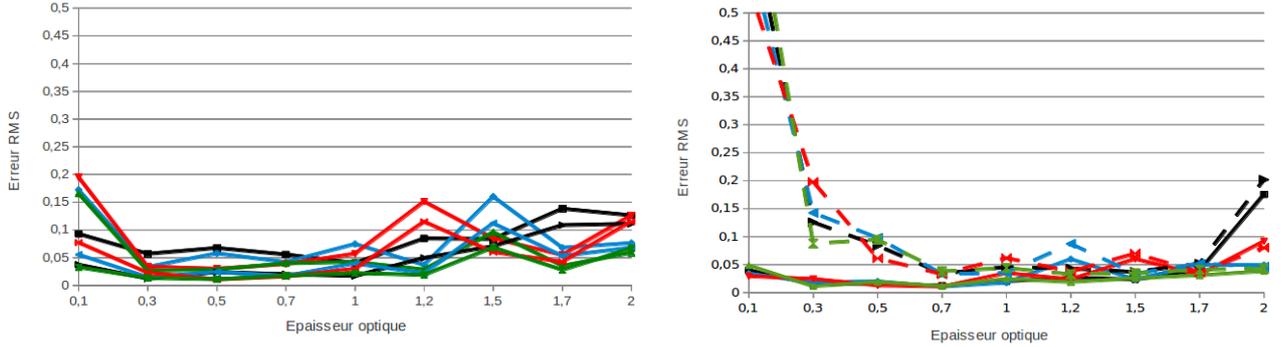
(a) Erreurs observées pour des transitions entre deux types de sol.

(b) Erreurs observées pour des transitions ombre/soleil.

FIGURE 5.4 – Erreurs algorithmiques (Root Mean Square Errors) dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).

5.4.5 Erreur due au bruit instrumental

Pour estimer l'erreur due au bruit instrumental, nous avons appliqué le même protocole que celui décrit dans le paragraphe précédent, en ajoutant un bruit gaussien aux luminances fournies à l'algorithme. Ce bruit additif a été modélisé par une moyenne nulle (comme le sont, en général, les bruits instrumentaux des spectro-imageurs si l'on néglige l'erreur d'étalonnage) et pour différentes valeurs d'écart-type, variant de 0,02 à 0,1 (correspondant environ à un SNR de, respectivement, 1000 et de 200, ordre de grandeur des SNR des capteurs hyperspectraux actuels dans le VNIR). Les résultats sont présentés figure 5.5.



(a) Erreurs observées pour des transitions entre deux types de sol. (b) Erreurs observées pour des transitions ombre/soleil.

FIGURE 5.5 – Erreurs dues au bruit instrumental (Root Mean Square Errors) dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).

On remarque que les erreurs obtenues sont supérieures aux erreurs algorithmiques mais du même ordre de grandeur. Par ailleurs, dans la gamme d'épaisseur optique [0,2-1,5], qui est, telle que nous l'avons précédemment définie, la gamme de fonctionnement optimal de la méthode EARTH, les erreurs obtenues restent inférieures à 10%. La robustesse au bruit de l'algorithme d'inversion est donc satisfaisante. Par ailleurs, hormis pour de trop faibles épaisseurs optiques (inférieures à 0,3 à 550nm), les performances obtenues pour des couples de pixels à des transitions entre deux types de sol et à des transitions ombre/soleil sont très comparables.

5.4.6 Erreur due à la réflectance du sol

Afin d'évaluer l'impact d'une erreur sur la réflectance du sol, nous avons appliqué à nouveau le même protocole, en introduisant cette fois un bruit dans les réflectances utilisées pour estimer les propriétés optiques des aérosols. Pour être réaliste, ce bruit a été choisi décroissant avec la longueur d'onde (comme l'algorithme d'estimation de la réflectance du sol consiste à extrapoler entre 0,4 et 0,7 μm une réflectance retrouvée, après correction atmosphérique, entre 0,7 et 1,1 μm , il est légitime d'attendre une plus forte erreur dans les faibles longueurs d'ondes).

Nous avons donc modélisé l'erreur sur la réflectance du sol par un bruit gaussien de moyenne $m(\lambda)$ et d'écart-type σ , où $m(\lambda) = \kappa(\lambda - 0,7)$ pour les longueurs d'ondes comprises entre 0,4 et 0,7 μm et $m(\lambda) = 0$ pour les longueurs d'ondes supérieures à 0,7 μm . Cette expression permet effectivement d'avoir un biais décroissant avec la longueur d'onde. Le coefficient κ est tiré aléatoirement entre 0,05 et 0,2. Un coefficient κ positif représente un biais négatif, mais des tests effectués avec un coefficient négatif conduisent à des résultats très similaires. L'écart-type, lui, a été choisi constant spectralement, et compris entre 0,02 et 0,1.

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'estimation de la réflectance du sol sous le panache est un des points déterminants dans les performances de la méthode EARTH. En effet, nous utilisons

des réflectances obtenues pour des pixels hors panache pour simuler la réflectance des pixels sous le panache. Bien qu'ils aient été identifiés comme étant de même type, leur réflectance peut être cependant différente.

Les résultats montrent que l'erreur RMS induite sur l'estimation de $\tau(\lambda)$ et du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ reste inférieure à 15%, quel que soit le type de transitions considéré. En revanche, si les biais introduits dans les réflectances diffèrent, l'utilisation d'un couple de pixels situé à une transition entre deux types de sol entraînent des erreurs deux fois plus importantes que pour un couple ombre/soleil (15% d'erreur dans le premier cas contre 7% dans le deuxième). En effet, pour un couple de type sol1/sol2, cette différence factice dans les réflectances se répercute dans l'estimation de $\tau(\lambda)$, qui elle-même se répercute dans l'estimation du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$.

5.4.7 Erreur due à l'atmosphère hors panache

La dernière source d'erreur potentiellement importante est celle due à l'estimation de l'atmosphère hors panache. Pour la quantifier, nous avons à nouveau appliqué le même protocole (simulation de luminances à partir des équations de notre modèle et de propriétés optiques d'aérosols pré-calculées puis inversion de ces propriétés optiques), mais en ajoutant un bruit aux termes atmosphériques de l'équation du transfert radiatif ($T^{atm}(\lambda)$, $T^{atm,\uparrow}(\lambda)$, $T^{atm,\downarrow}(\lambda)$, $T_{dif}^{atm,\downarrow}$ et $L^{atm}(\lambda)$). Ce bruit a été choisi gaussien, de moyenne nulle et d'écart-type compris entre 0,02 et 0,1.

L'estimation de ces termes atmosphériques est obtenue, d'après la méthode EARTH, à partir de simulations exécutées par le code de transfert radiatif MODTRAN. Pour cela, le contenu total en vapeur d'eau, le type d'aérosol de fond et la visibilité hors panache sont retrouvés lors de la correction atmosphérique par le code ATCOR. Les autres conditions thermodynamiques de l'atmosphère sont celles du modèle *mid-latitude summer* de MODTRAN [18].

Comme nous excluons, pour l'estimation des propriétés des aérosols, les bandes d'absorption des gaz, une erreur dans le profil d'un gaz atmosphérique a peu d'impact sur notre algorithme. Cependant, la mauvaise prise en compte de la diffusion de Rayleigh ou du continuum de vapeur d'eau peut entraîner des différences dans les luminances modélisées, en-dehors des bandes d'absorption des gaz. Nous avons donc souhaité évaluer l'impact d'éventuelles erreurs dans le calcul de ces termes atmosphériques.

Les résultats que nous obtenons montrent que les erreurs induites sur $\tau(\lambda)$ et sur le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ sont inférieures à 7% pour des épaisseurs optiques à 550nm comprises entre 0,3 et 1,5.

5.4.8 Bilan des différents postes d'erreurs

Les paragraphes précédents ont présenté des résultats de simulations, permettant de quantifier les principales erreurs pouvant affecter l'estimation des propriétés optiques des aérosols par la méthode EARTH.

Il en résulte que (dans l'ordre d'importance décroissant des erreurs) :

- une erreur dans l'estimation des réflectances dégrade les performances de l'algorithme, particulièrement dans le cas des transitions entre deux types de sol (erreur induite, dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols, de 15% pour des transitions sol1/sol2, et 7% pour des transitions ombre/soleil) ;
- l'ajout d'un bruit blanc gaussien, simulant le bruit instrumental, dans les luminances des pixels induit également des erreurs, dans les propriétés des aérosols estimées, inférieures cependant à 8% ;
- l'algorithme est également sensible à une erreur dans l'estimation des termes atmosphériques de l'équation du transfert radiatif, une erreur de 10% dans ces composantes radiatives induisant une erreur de 7% dans les propriétés des aérosols ;

- la modélisation radiative proposée, qui néglige les diffusions multiples dues au panache, permet de simuler, de manière satisfaisante (erreurs inférieures à 7%) la luminance et la transmittance du panache pour des AOT, à 550nm, comprises entre 0,2 et 1,5 ;
- les erreurs, dans l'estimation des propriétés optiques, dues uniquement à l'algorithme d'optimisation utilisé, sont inférieures à 4%.

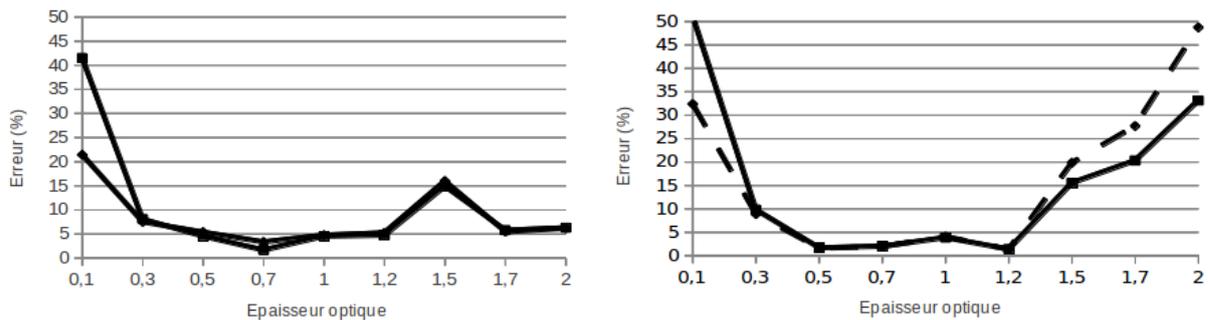
5.4.9 Influence de l'erreur totale dans l'estimation du type

Les différentes erreurs, évaluées indépendamment dans les paragraphes précédents, ne peuvent s'additionner car certaines se compensent. Il est donc nécessaire, pour terminer cette étude de sensibilité, d'appliquer notre algorithme d'inversion en tenant compte simultanément de ces différentes erreurs.

Pour cela, des luminances ont été simulées avec MODTRAN pour représenter les luminances mesurées pour différents pixels de panache (selon le protocole décrit au paragraphe 5.4.4), puis bruitées pour tenir compte du bruit instrumental. De plus, les termes atmosphériques et les réflectances des sols utilisées pour les simulations ont été également bruitées. Notre algorithme d'inversion a été appliqué sur ces données pour estimer les propriétés optiques des aérosols et enfin déterminer leur type.

La figure 5.6 présente les erreurs totales, en pourcentage, commises par notre algorithme dans l'estimation des propriétés optiques, pour différentes valeurs d'épaisseurs optiques. On remarque que, pour une AOT à 550nm comprise entre 0,3 et 1,3, les erreurs sont inférieures à 10%. En deçà de 0,3, l'impact des aérosols sur les signaux de luminance mesurés est trop faible pour estimer correctement les propriétés des particules. A l'inverse, au-dessus de 1,5, l'hypothèse de diffusion simple utilisée dans les équations du transfert radiatif que nous avons présentées ne semble plus être valide.

En revanche, entre ces valeurs d'épaisseur optique, la précision de notre méthode est acceptable pour la détermination du type d'aérosols. Pour en avoir confirmation, nous avons appliqué la dernière partie de notre algorithme (la reconnaissance du type), à partir de différents jeux de propriétés optiques $\tau(\lambda)$, $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ différemment bruités. Nous avons ensuite additionné les scores $D_{tot,m}^1$ et $D_{tot,m}^2$ obtenus. Les résultats sont présentés figure 5.7.

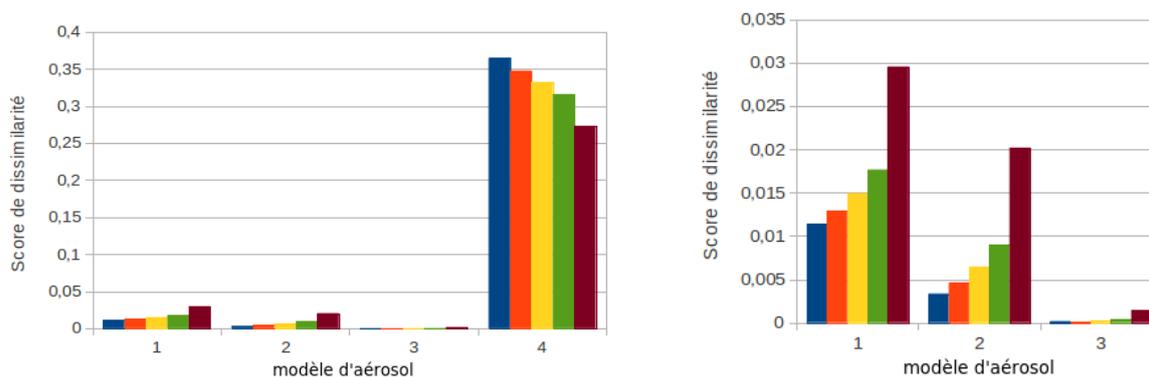


(a) Erreurs observées pour des transitions entre deux types de sol.

(b) Erreurs observées pour des transitions ombre/soleil.

FIGURE 5.6 – Erreurs totales, en pourcentage, dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).

On remarque que le modèle 4 de la LUT, qui a des propriétés optiques très différentes des autres modèles, obtient un score de dissimilarité très supérieur aux trois autres modèles. Si l'on ne considère que ces trois premiers modèles, celui qui obtient le score le plus bas, quel que soit le niveau de bruit ajouté aux propriétés optiques, est le modèle 3, c'est-à-dire celui qui a servi au calcul des luminances (donc celui qu'on cherchait à retrouver). Son score est même 4 à 8 fois plus faible que ceux obtenus



(a) Scores obtenus pour les 4 modèles d'aérosols de la LUT.

(b) Scores obtenus pour les 3 premiers modèles uniquement.

FIGURE 5.7 – Scores de dissimilarité obtenus pour les différents modèles d'aérosols, et pour différents niveaux de bruit dans les propriétés optiques (bleu : 2,5% d'erreur, orange : 5% d'erreur, jaune : 7,5% d'erreur, vert : 9% d'erreur, marron : 14% d'erreur).

par les modèles 1 et 2. Il semble donc que ces scores permettent de retrouver le type de particules. Pour le confirmer, nous avons appliqué notre méthode à une image hyperspectrale réelle.

5.5 Application sur une image CASI

5.5.1 Présentation des données

La méthode EARTH a été appliquée à une image aéroportée acquise le 28 octobre 2010, au-dessus d'une usine métallurgique à Fos-sur-Mer (Bouches du Rhône), par le capteur hyperspectral CASI-1500, dans le cadre de la campagne EUFAR (*EUropean Facility for Airborne Research*) ValCalHyp 2010. La figure 5.8(a) présente la partie de cette image géoréférencée, constituée de 1100 lignes et 1700 colonnes, sur laquelle nous avons travaillé.

Le capteur CASI-1500 acquiert des images dans le VNIR. Avec la configuration choisie pour ce vol, les données obtenues possèdent 144 bandes spectrales entre $0,367\mu\text{m}$ et $1,052\mu\text{m}$, avec une résolution spectrale de $4,8\text{nm}$. L'avion volant à 1950m d'altitude, la résolution spatiale est, après géoréférencement, de $1,58\text{m}$ dans la direction de la trajectoire de l'avion et $0,96\text{m}$ dans la direction perpendiculaire.

L'image a été acquise à 14h40 UTC, soit 16h40 heure locale. L'angle zénithal solaire est fort (73°), ce qui correspond à une faible élévation. Dans cette configuration, le trajet optique des photons émis par le soleil, du sommet de l'atmosphère au sol, est particulièrement grand et très différent d'un trajet vertical. Ainsi la luminance d'un pixel de l'image est également influencée par les aérosols qui ne se situent pas « au-dessus » de ce pixel. Comme l'hétérogénéité spatiale des propriétés des aérosols peut être importante, cela peut induire des erreurs dans leur estimation.

Aucune mesure *in situ* n'a été effectuée pendant cette campagne. Nous ne disposons donc pas de données permettant de valider quantitativement les résultats de notre algorithme. En revanche, nous connaissons la nature du site industriel imagé : il s'agit d'une usine métallurgique, qui est un des principaux émissaires industriels français de PM₁₀. Le mode de fonctionnement de cette usine de production d'acier présente quelques analogies avec le site étudié au chapitre 3. Le minerai de fer est d'abord préparé dans des ateliers d'agglomération puis est chauffé dans un haut fourneau, grâce à la chaleur produite par la combustion de la coke. Enfin, la fonte en fusion passe dans un convertisseur à oxygène pour devenir de l'acier, puis l'acier liquide est transformé en métal solide dans l'atelier de coulée.

Le panache visible sur l'image de la figure 5.8(a) provient d'une cheminée de l'atelier d'agglomération. Il est donc probable que les aérosols composant ce panache soit un mélange d'oxydes de fer et d'autres types de particules (particules carbonées et calcaires principalement, du fait de l'utilisation de chaux dans le procédé d'agglomération). Ainsi, les propriétés de ce mélange d'aérosols peuvent être différentes de celles présentées au chapitre 3, car les propriétés physico-chimiques ne sont pas identiques (en particulier, il n'y a certainement pas de manganèse dans les particules émises par l'usine de Fos-sur-Mer). Cependant, comme le composant principal est probablement l'oxyde de fer, on peut s'attendre à avoir plus de similitudes entre les propriétés des aérosols de cette usine et celles du modèle 3 de notre LUT qu'avec celles des autres modèles d'aérosols.

5.5.2 Prétraitements

Segmentation du panache et correction atmosphérique

Le panache a d'abord été segmenté manuellement à partir de l'image de la figure 5.9, qui a été obtenue par égalisation d'histogramme sur la bande 8 (à 0,4 μ m) de l'image. A cette longueur d'onde, la diffusion des aérosols est maximum donc le panache est particulièrement visible, et l'égalisation d'histogramme permet d'accentuer les contrastes. Le contour du panache obtenu est indiqué par une ligne rouge sur la figure 5.8(a).

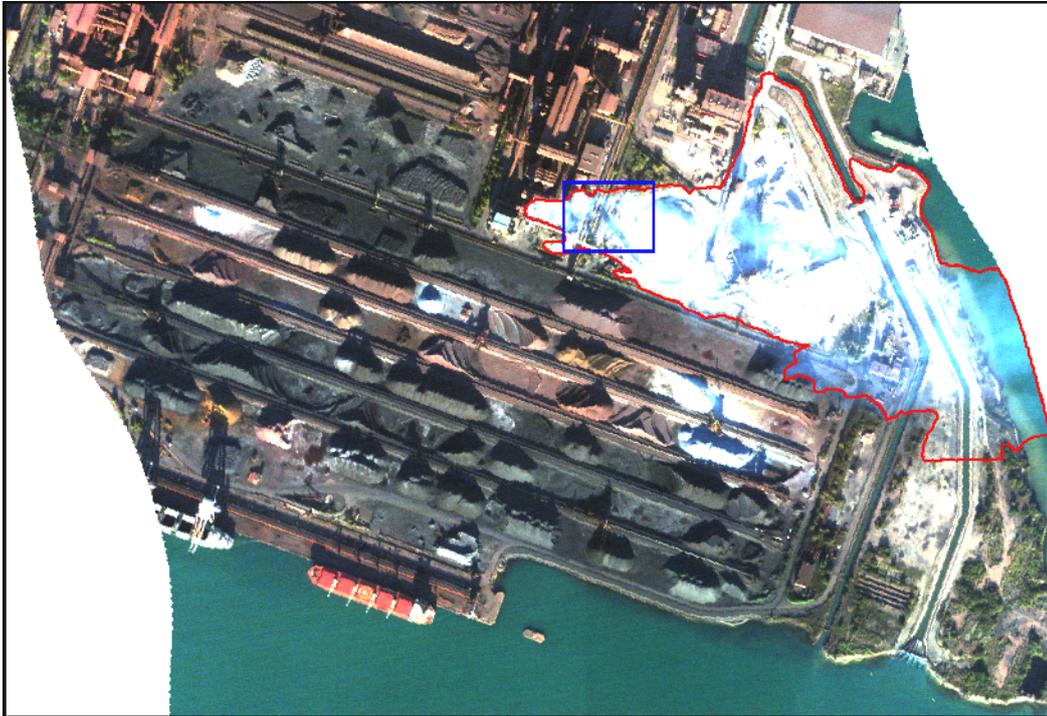
La correction atmosphérique a ensuite été effectuée avec ATCOR. Les paramètres tels que le modèle d'aérosol de fond, la visibilité et le contenu en vapeur d'eau sont estimés à partir de l'image en luminance (en ayant appliqué un masque sur le panache pour ne pas tenir compte de l'impact des aérosols du panache dans ces estimations). Ensuite, à partir de ces paramètres et des conditions d'acquisition de l'image, les effets atmosphériques sont corrigés sur la totalité des pixels (y compris les pixels du panache) et une image en réflectance est obtenue.

Sélection des couples de pixels et estimation de la réflectance du sol sous le panache

Plusieurs couples de pixels ont ensuite été manuellement sélectionnés. Nous avons retenu dix couples sur des transitions entre deux types de sols (pleinement éclairés) et dix couples sur des transitions ombre/soleil pour un même type de sol. Pour chaque couple, les pixels choisis ne sont pas nécessairement adjacents mais sont situés à moins de 5m l'un de l'autre. Les couples de pixels ont été choisis à différentes distances du point d'émission (de 100 à 700m). A titre d'illustration, les 3 couples ombre/soleil les plus proches du point d'émission sont indiqués sur la figure 5.8(b). Pour chaque couple sélectionné, les réflectances des deux pixels sont ensuite estimées à l'aide de l'algorithme présenté au paragraphe 5.2.3.

Exclusion des couples pour lesquels l'estimation de la réflectance conduit à des équations aberrantes

L'application de notre algorithme sur les 20 couples initialement sélectionnés nous a permis de remarquer que, pour de nombreux couples, les réflectances estimées conduisaient à des équations aberrantes. En effet, pour les couples situés à des transitions entre deux types de sol, l'équation 5.9 ne pouvait être vérifiée car la différence $L_1^{capteur}(\lambda) - L_2^{capteur}(\lambda)$ n'avait pas toujours le même signe que $\rho_1^{sol}(\lambda) - \rho_2^{sol}(\lambda)$, ou encore $L_1^{capteur}(\lambda) - L_2^{capteur}(\lambda)$ était inférieure à $\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} (\rho_1^{sol}(\lambda) - \rho_2^{sol}(\lambda)) T^{atm}(\lambda)$, ce qui ne peut être dû qu'à une mauvaise estimation des réflectances $\rho_1^{sol}(\lambda)$ et $\rho_2^{sol}(\lambda)$. De la même manière, pour certains couples de pixels situés à des transitions ombre/soleil, la différence $L_{soleil}^{capteur}(\lambda) - L_{ombre}^{capteur}(\lambda)$ (dans l'équation 5.11) pouvait être inférieure à $\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} (T^{atm,\downarrow}(\lambda) - T_{dif}^{atm,\downarrow}(\lambda)) \rho^{sol}(\lambda) T^{atm,\uparrow}(\lambda)$, du fait d'une sous-estimation de la réflectance $\rho^{sol}(\lambda)$.



(a) Composition colorée de l'image CASI (bleu : bande 20 à 0,458 μm , vert : bande 39 à 0,549 μm , rouge : bande 58 à 0,640 μm). La ligne rouge indique le contour du panache étudié et le rectangle bleu, l'emplacement du zoom ci-dessous.



(b) Zoom et localisation des couples de pixels sélectionnés (marqués en rouge, vert et bleu).

FIGURE 5.8 – Image CASI acquise le 28 octobre 2010, sur le site d'une industrie métallurgique, à Fos-sur-Mer.

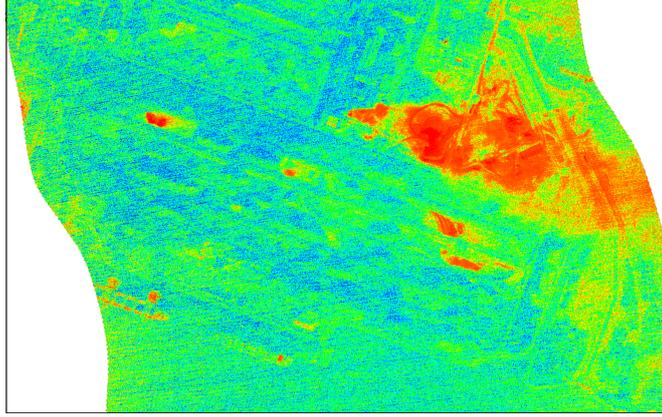


FIGURE 5.9 – Image en fausses couleurs, permettant la segmentation du panache (obtenue après égalisation d’histogramme de la bande 8 (à $0,4\mu\text{m}$) de l’image).

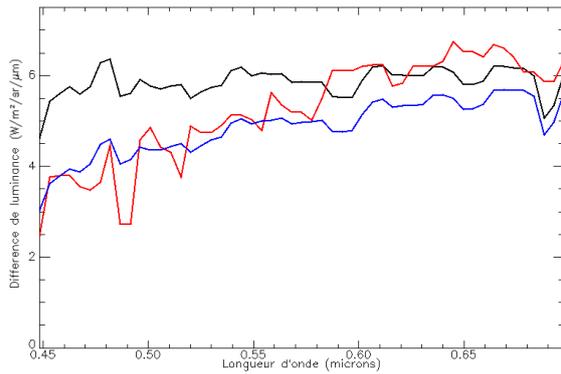
Ainsi, pour ne pas tenir compte des pixels sélectionnés pour lesquels les réflectances étaient mal estimées, nous avons exclu les couples conduisant à des équations aberrantes, d’après les critères mentionnés ci-dessus. Il est apparu que la plupart des couples situés à des transitions entre deux types de sol devaient finalement être exclus de l’algorithme. En effet, pour ces couples, l’estimation de l’épaisseur optique $\tau(\lambda)$ dépend de la différence $\rho_1^{sol}(\lambda) - \rho_2^{sol}(\lambda)$. Une petite erreur dans l’estimation de cette différence peut entraîner un biais important sur $\tau(\lambda)$ (qui se répercute sur le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$). Compte-tenu de la très faible épaisseur optique du panache étudié (et donc de la forte importance de la réflectance du sol dans le signal de luminance), nous avons donc conclu que notre algorithme d’estimation des réflectances sous le panache n’était pas suffisamment performant pour permettre d’exploiter, sur cette image, les couples de pixels situés à des transitions entre deux types de sol.

En revanche, pour les couples ombre/soleil, l’estimation de $\tau(\lambda)$ est moins sensible à une erreur sur la réflectance du sol sous le panache (car c’est la réflectance $\rho_1^{sol}(\lambda)$ qui intervient dans l’équation 5.11 et non une différence de réflectances). Ainsi, nous avons gardé trois couples de pixels ombre/soleil qui ne conduisent à aucune équation aberrante. Il s’agit des trois couples situés les plus proches du point d’émission (à une centaine de mètres) et indiqués sur la figure 5.8(b).

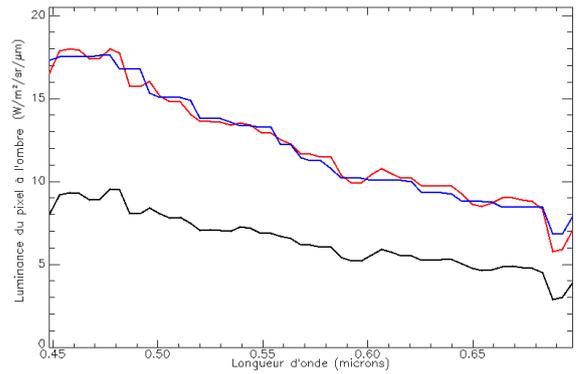
5.5.3 Estimation des propriétés optiques

Pour chacun de ces couples, les propriétés optiques des aérosols ont donc été estimées par notre algorithme. La figure 5.10 présente les différents termes des équations 5.10 et 5.11 qui ont permis l’estimation de $\tau(\lambda)$ et du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ pour un des couples ombre/soleil sélectionné. Sur la figure 5.10(a), on remarque que la différence des luminances des deux pixels du couple (en bleu) ne correspond pas au terme $\frac{\mu_s E_s(\lambda)}{\pi} \left(T^{atm,\downarrow}(\lambda) - T_{dif}^{atm,\downarrow}(\lambda) \right) \rho^{sol}(\lambda) T^{atm,\uparrow}(\lambda)$ (en noir), particulièrement pour les faibles longueurs d’ondes. Lorsqu’on ajoute la transmittance du panache à ce terme (avec l’épaisseur optique estimée par la méthode EARTH), on obtient la courbe rouge qui, pour les faibles longueurs d’ondes (donc là où les aérosols ont le plus grand impact radiatif), correspond mieux à la différence des luminances observées. On observe cependant un biais entre $0,6$ et $0,7\mu\text{m}$.

Sur la figure 5.10(b), la correspondance entre le modèle et le signal observé est plus grande. En effet, l’équation du transfert radiatif, sans panache, pour un pixel à l’ombre, conduit à la luminance représentée par la courbe noire. On remarque une forte sous estimation, lorsqu’on la compare à la luminance du pixel de l’image (en rouge). Lorsqu’on introduit les termes dus au panache dans l’équation du transfert (avec les propriétés optiques estimées par la méthode EARTH), on obtient la courbe bleue, très similaire à la luminance observée sur l’image. Ces résultats sont donc très satisfaisants.



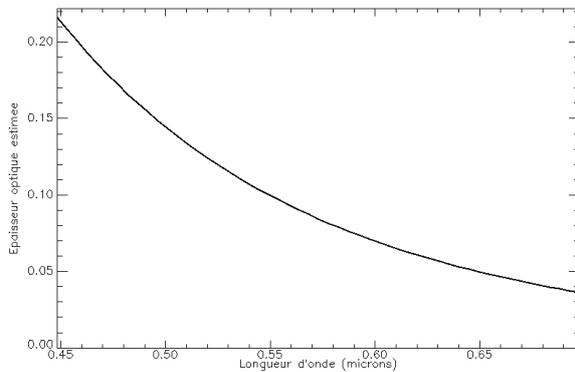
(a) Estimation de la différence des luminances.



(b) Estimation de la luminance du pixel à l'ombre.

FIGURE 5.10 – *Reconstruction des signaux de luminances pour un couple de pixels du panache de l'image CASI (bleu : signal mesuré sur l'image, noir : modélisation sans prise en compte du panache, rouge : modélisation avec les propriétés du panache estimées par la méthode EARTH).*

La figure 5.11 présente les propriétés optiques estimées du panache, pour ce même couple de pixels. On remarque une épaisseur optique assez faible (0,11 à 0,55 μm) et décroissant rapidement avec la longueur d'onde. Nous sommes donc à la limite du domaine de validité de la méthode EARTH, tel qu'il a été déterminé d'après la validation sur données simulées (voir figure 5.6(b) en particulier). Compte-tenu de la faible épaisseur optique estimée et des simulations précédemment effectuées, on peut donc s'attendre à des erreurs importantes (supérieures à 30%) sur les propriétés optiques retrouvées, et particulièrement sur l'épaisseur optique. Un panache plus dense conduirait, en revanche, à des erreurs beaucoup plus faibles.



(a) Épaisseur optique estimée.

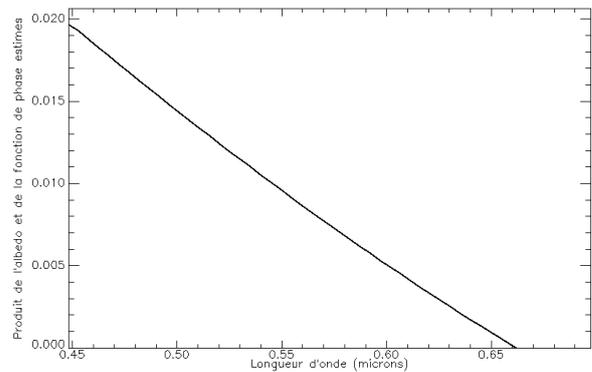
(b) Produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ estimé.

FIGURE 5.11 – *Résultats de l'estimation des propriétés optiques du panache pour un couple de pixels de l'image CASI.*

Concernant le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ estimé, on remarque une décroissance avec la longueur d'onde. Ce comportement spectral est similaire à celui observé pour le modèle d'aérosol 3 de notre LUT (voir figure 5.2(d)). Notons, par ailleurs, que les valeurs du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ dépendent du cosinus de l'angle zénithal solaire μ_s . Or ce paramètre a été fixé à 0,866 pour les courbes de la figure 5.2(d) et vaut 0,342 pour notre image, ce qui explique les différences de valeurs dans le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ pour les courbes des figures 5.2(d) et 5.11(b).

5.5.4 Estimation du type d'aérosols

A partir des propriétés optiques estimées pour les trois couples de pixels sélectionnés, la dernière étape de la méthode EARTH a été appliquée pour déterminer le type d'aérosols présents dans le panache. Ainsi, les scores de dissimilarité calculés pour les quatre modèles de notre LUT et pour les trois couples de pixels sont présentés figure 5.12.

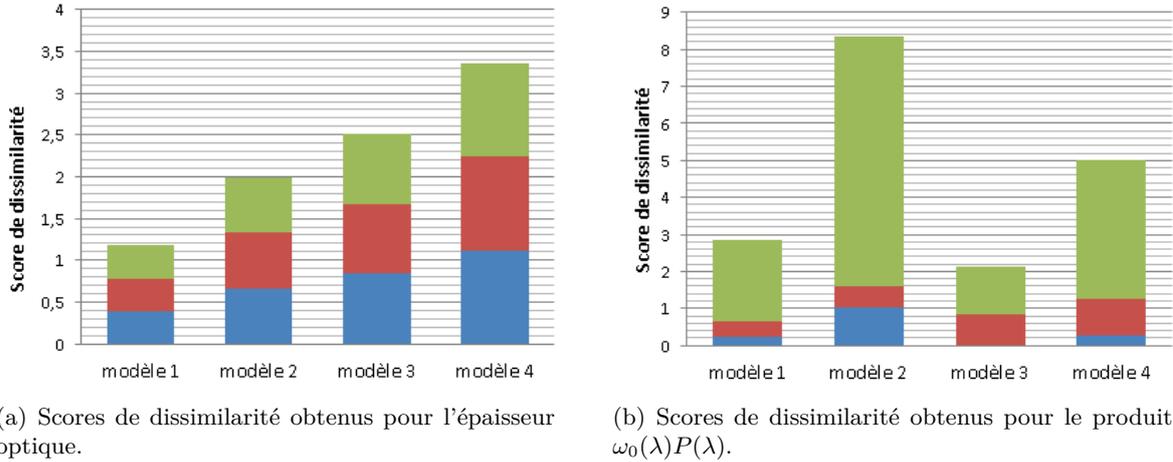


FIGURE 5.12 – Résultats de l'estimation du type d'aérosols à partir de trois couples de pixels de l'image CASI. Les scores associés à chaque couple sont représentés en bleu, vert et rouge.

On remarque que, pour tous les couples sélectionnés, les scores de dissimilarité calculés, selon les équations 5.15 et 5.16, à partir de l'épaisseur optique estimée sont minimaux pour le modèle 1, c'est-à-dire pour les aérosols de feu de biomasse. En revanche, pour les scores calculés à partir du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$, le score total minimal est obtenu pour le modèle 3, soit les aérosols métalliques.

5.5.5 Discussions

D'après les résultats précédents, il semble donc que, si l'estimation de l'épaisseur optique est une étape préalable indispensable à l'estimation des autres propriétés optiques des aérosols, il ne soit pas judicieux de s'appuyer uniquement sur cette estimation pour déterminer le type des aérosols. En effet, d'une part, les tests effectués sur données simulées ont montré que, dans le cas des très faibles épaisseurs optiques (inférieures à 0,2 à 550nm), les erreurs dans l'estimation de $\tau(\lambda)$ étaient particulièrement importantes (supérieures à 30%). D'autre part, l'épaisseur optique spectrale est, certes, dépendante du type d'aérosols, mais également fortement liée à la distribution en taille des particules. Ainsi, l'AOT de la LUT la plus similaire à l'AOT estimée risque d'être celle pour laquelle la granulométrie choisie est la plus proche de celles des particules étudiées, même si les types d'aérosols sont différents.

C'est très vraisemblablement ce qui explique les scores de dissimilarité de la figure 5.12(a). Il est en effet probable que les particules émises par l'usine de Fos-sur-Mer soient de taille plus petites que celles de l'usine de Dunkerque étudiée dans le chapitre 3 (du fait, peut-être, de filtres différents installés dans les cheminées). Ainsi, les épaisseurs optiques spectrales estimées à partir de l'image CASI sont plus rapidement décroissantes avec la longueur d'onde que les épaisseurs optiques simulées à partir des mesures effectuées à Dunkerque. Cela induit de plus forts scores de dissimilarité pour le modèle 3 que pour les modèles 1 et 2, qui sont constitués de plus petites particules.

En revanche, le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ est principalement sensible au type d'aérosols et moins à la distribution en taille. Son estimation, à partir des pixels de l'image CASI, montre une décroissance avec la longueur d'onde et conduit à des scores de dissimilarité plus faibles pour le modèle 3 que

pour les autres modèles. Ce résultat est satisfaisant car nous savons que les aérosols de ce panache sont en partie constitués de particules métalliques, et nous avons montré, au chapitre 3, que ces particules conduisaient à un albédo de diffusion simple des aérosols faible, et décroissant avec la longueur d'onde. Il semble donc que, à partir de ce paramètre, il soit possible d'identifier le type d'aérosol présent dans un panache industriel, même si celui-ci est de faible épaisseur optique, et en particulier de reconnaître la présence d'aérosols anthropiques métalliques.

Remarquons, enfin, que l'image CASI sur laquelle a été appliquée notre méthode représente un jeu de données particulièrement difficile à traiter. En effet, l'absence de bandes spectrales dans le SWIR rend l'estimation de la réflectance du sol sous le panache particulièrement ardue. Or l'analyse de sensibilité a montré que cette estimation du sol pouvait être l'une des principales sources d'erreur de notre méthode. Par ailleurs, le fort angle zénithal solaire (73°) induit de relativement faibles signaux de luminances et rend imparfaite la simulation de l'impact radiatif des aérosols. Ainsi, bien que nous ne disposions pas de beaucoup d'autres images hyperspectrales acquises au-dessus de sites industriels, l'application de notre méthode sur d'autres jeux de données, acquis dans des conditions plus favorables et avec d'autres capteurs, donnerait très probablement de meilleurs résultats que ceux présentés dans les paragraphes précédents.

5.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une nouvelle méthode permettant l'estimation du type d'aérosols présents dans un panache. La méthode EARTH est particulièrement adaptée aux panaches peu denses optiquement. Elle consiste en l'estimation de deux propriétés optiques des aérosols : l'épaisseur optique $\tau(\lambda)$ et le produit de l'albédo de diffusion simple et de la fonction de phase $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$, à partir de couples de pixels situés dans le panache, sur des transitions entre deux types de sol ou entre une surface à l'ombre et la même surface au soleil. A partir de ces propriétés estimées, le type d'aérosols est déterminé par comparaison avec des propriétés préalablement calculées pour différents types d'aérosols et stockées dans une *Look-Up Table*.

Après avoir présenté les modèles physiques sur lesquels s'appuie cette méthode et les différentes étapes algorithmiques qu'elle comporte, nous avons établi un bilan d'erreurs de cette méthode afin d'en analyser ses performances. Les différentes sources d'erreurs ont été listées, leur impact sur les résultats de la méthode ont été quantifiés, d'abord séparément puis en cumulant les différentes erreurs, et discutés à l'aide de données simulées. Cette analyse de sensibilité a permis de montrer que l'estimation des propriétés optiques conduisait à des résultats satisfaisants, particulièrement lorsque l'AOT du panache à 550nm était comprise entre 0,2 et 1,5 (moins de 10% d'erreur en moyenne et moins de 5% pour une AOT comprise entre 0,5 et 1,2). La détermination du type d'aérosols à partir de ces propriétés optiques estimées est, bien-sûr, très dépendant de la LUT utilisée mais conduit également à des résultats satisfaisants pour les simulations que nous avons effectuées.

La méthode EARTH a ensuite été appliquée sur une image hyperspectrale aéroportée, acquise au-dessus d'une usine métallurgique de Fos-sur-Mer, sur laquelle un panache, émis par une cheminée de l'usine, était visible bien que de faible épaisseur optique. Lors de l'étape d'estimation des propriétés optiques, il a été montré que, pour cette image, les réflectances de sol estimées pour les pixels du panache n'étaient pas estimées avec une précision suffisante pour pouvoir traiter la majorité des couples de pixels initialement sélectionnés. Ainsi, les couples situés à des transitions entre deux types de sol, pour lesquels l'estimation de la réflectance est particulièrement importante, ont été exclus de l'algorithme, ainsi qu'une partie des couples ombre/soleil qui conduisaient à des équations de transfert radiatif aberrantes.

Pour les trois couples ombre/soleil restants, l'estimation des propriétés optiques des aérosols a conduit à des luminances modélisées assez proches des luminances observées (moins de 5% d'erreur en moyenne). L'estimation du type d'aérosols à partir des éléments de la LUT a ensuite montré que, si l'épaisseur optique estimée ressemblait plus aux AOT calculées pour des aérosols de feu de

biomasse, il était possible de mettre en évidence la présence de particules métalliques dans le mélange d'aérosols grâce à l'estimation du produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$.

Finalement, la méthode EARTH donne des résultats très encourageants dans l'estimation du type de particules présentes dans un panache industriel. Cependant, pour valider complètement cette méthode, il serait intéressant de l'appliquer sur plusieurs images de sites industriels, et si possible pour lesquelles des prélèvements d'aérosols auraient été effectués. Le manque actuel de telles données ne nous a malheureusement pas permis de le faire dans le cadre de cette thèse. Par ailleurs, il semble qu'il soit également préférable, pour l'application de la méthode, de disposer de bandes spectrales dans le SWIR pour améliorer l'estimation de la réflectance du sol sous le panache, qui est un des points importants de l'algorithme.

Cette méthode de détermination du type d'aérosols présents dans un panache, et particulièrement adaptée aux effluents industriels, ouvre donc de nouvelles perspectives, notamment pour le contrôle de pollution par télédétection. De plus, cette méthode peut, par la suite, être couplée avec une autre méthode d'inversion, telle que celle utilisée dans le chapitre 4, pour obtenir, une fois le modèle de d'aérosol connu, des cartes de propriétés microphysiques.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont permis à la fois d'améliorer les connaissances des propriétés physiques et optiques des aérosols industriels et conduit au développement de nouvelles méthodes de caractérisation de panaches par imagerie hyperspectrale.

L'étude, présentée au chapitre 3, et fruit d'une collaboration entre le Laboratoire de Télédétection, Surveillance, Environnement du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, le Département d'Optique Théorique et Appliquée de l'ONERA et le Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère de l'Université de Littoral Côte d'Opale, a permis de caractériser les propriétés optiques d'aérosols émis par une industrie métallurgique. Ces aérosols anthropiques, dont les propriétés physiques et radiatives étaient largement méconnues et donc absentes des bases de données actuelles, ont été prélevés en différents points d'un site industriel et analysés en laboratoire. Cela a permis d'estimer leur indice de réfraction complexe dans le visible, d'établir un modèle de mélange adapté à ces aérosols particuliers et d'étudier leur impact radiatif. Nous avons ainsi pu mettre en évidence, par exemple, que la forte proportion d'oxydes métalliques dans le mélange d'aérosols induisait une forte absorption du panache, et un albédo de diffusion simple du mélange décroissant avec la longueur d'onde entre 0,4 et 0,8 μm .

Cependant, la méthodologie et les moyens mis en œuvre pour estimer les indices de réfraction complexes des particules pourraient être améliorés. En effet, seuls des indices de réfraction équivalents, pour les mélanges prélevés, ont été estimés. On pourrait envisager, pour des études ultérieures, de caractériser séparément les différents types de particules présentes dans le mélange. Par ailleurs, ces estimations n'ont pu être effectuées qu'à quatre longueurs d'onde du visible. Les évolutions envisagées pour le banc de mesure MELOPEE devraient permettre de l'utiliser, dans l'avenir, pour estimer des indices de réfraction en de nombreuses longueurs d'onde simultanément, et avec une plus grande précision.

La méthode d'estimation conjointe des aérosols et du CO_2 , qui est l'objet du chapitre 4, a été développée pour la caractérisation de panaches optiquement denses. Pour des fortes concentrations d'aérosols, nous avons montré que la diffusion des aérosols était non-négligeable jusqu'à 2,0 μm , et pouvait induire d'importantes erreurs (jusqu'à 9%) dans l'estimation de gaz tel que le CO_2 par les algorithmes classiquement utilisés. Nous avons donc proposé une méthode, reposant sur deux algorithmes préalablement existants (L-APOM et JRGE), permettant d'estimer conjointement les propriétés des aérosols et la concentration de CO_2 dans un panache afin de s'affranchir des biais, dans l'estimation du CO_2 , dus à l'impact radiatif des aérosols.

Comme nous ne disposions pas d'images comportant un panache industriel assez dense pour que l'utilisation de notre méthode d'estimation conjointe soit justifiée, nous l'avons appliquée à des images de feux de biomasse. Les résultats obtenus montrent que, pour les zones où le panache n'est pas trop dense (AOT comprise entre 1 et 2 à 550nm), l'estimation préalable des propriétés des aérosols diminue le biais dans l'estimation du CO_2 d'un facteur 2. Pour les zones où le panache est optiquement très épais (AOT comprise entre 3 et 5 à 550nm), ce biais n'est diminué que de 20%.

La méthode proposée dans ce chapitre semble donc convenir à la caractérisation de tels panaches. Notons toutefois que la méthode L-APOM utilisée ici pour l'estimation des propriétés des aérosols requiert une connaissance *a priori* du type d'aérosol présent.

Cependant, il est difficile de connaître *a priori* le type de particules présent dans des panaches industriels. Et, par ailleurs, il est fréquent que les panaches émis par les industries soient d'épaisseur optique assez faible (AOT inférieure à 1 à 550nm). Il nous a donc semblé nécessaire de développer une nouvelle méthode de caractérisation des aérosols, spécifiquement adaptée aux panaches industriels. C'est l'objet du chapitre 5 qui présente la méthode EARTH.

Cette méthode repose sur l'estimation des propriétés optiques des aérosols d'un panache, à partir d'équations du transfert radiatif simplifiées, et s'appuie sur des couples de pixels situés à des transitions entre deux types de sol ou entre un sol à l'ombre et le même sol pleinement éclairé. Les propriétés optiques estimées sont ensuite comparées à des propriétés optiques pré-calculées et stockées dans une LUT et des scores de dissimilarité sont calculés. Enfin, le modèle d'aérosol correspondant aux particules du panache est choisi en minimisant des scores de dissimilarité totaux, pour l'ensemble des couples de pixels sélectionnés.

Cette méthode a été appliquée sur des données simulées et une image hyperspectrale acquise dans le VNIR, au-dessus d'une usine métallurgique. Nous avons ainsi montré que l'erreur dans l'estimation de l'épaisseur optique $\tau(\lambda)$ et du produit de l'albédo de diffusion simple avec la fonction de phase $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ était inférieure à 5% pour une AOT à 550nm comprise entre 0,4 et 1,2. L'application sur l'image réelle a mis en évidence l'importance d'une bonne estimation préalable de la réflectance du sol pour l'estimation des propriétés des aérosols (et l'utilité de disposer de bandes dans le SWIR pour améliorer cette estimation).

Par ailleurs, il est apparu que, si l'estimation de l'épaisseur optique spectrale seule ne suffisait pas à la détermination du type d'aérosols, le produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$ permettait de reconnaître la présence de particules d'oxydes métalliques dans le mélange d'aérosols, grâce, en particulier, au comportement spectral spécifique de l'albédo de diffusion simple de ces particules dans le visible, mis en évidence dans le chapitre 3.

Pour confirmer les résultats de ces travaux, il est nécessaire d'appliquer la méthode EARTH à différentes images de panaches industriels, et de confronter les résultats retrouvés à des mesures *in situ*. En particulier, il serait intéressant d'organiser une campagne d'acquisition d'images hyperspectrales sur un site industriel, en prévoyant des mesures lidar pour l'estimation de l'épaisseur optique des aérosols, des mesures de réflectances des sols au spectromètre et des prélèvements d'aérosols. Une campagne de ce type était initialement envisagée dans le cadre de cette thèse mais n'a malheureusement pas encore pu être organisée.

En ce qui concerne les améliorations à apporter à la méthode EARTH, la plus importante est certainement l'étape d'estimation des réflectances du sol sous le panache. Il serait par exemple possible d'ajouter des contraintes spatiales à l'estimation de ces réflectances ou bien encore d'ajouter une étape de classification, basée sur les bandes spectrales peu affectées par les aérosols, avant l'estimation des réflectances.

Il semble également judicieux d'améliorer la représentativité de la LUT, sur laquelle s'appuie la méthode EARTH. Dans le cadre de ces travaux, nous n'avons généré qu'une LUT restreinte, avec quatre modèles seulement d'aérosols. On pourrait envisager de construire d'autres modèles d'aérosols industriels et d'étendre les plages de variations des modèles actuels. *A fortiori*, si l'on souhaite étudier d'autres types de panaches que les panaches industriels, il est nécessaire d'inclure, par exemple, des modèles représentant des particules désertiques ou volcaniques.

A moyen terme, on pourrait, par ailleurs, coupler la méthode EARTH à une méthode d'estimation de gaz, en utilisant des bandes spectrales dans l'infrarouge, afin de détecter un grand nombre d'espèces chimiques. En effet, de plus en plus de capteurs hyperspectraux, qui acquièrent des données simultanément dans les domaines réflectif et émissif, sont développés (AHS [87], Telops Hyper-Cam [27], Sisyphé). Cela pourrait permettre de caractériser, de manière très complète, les

effluents industriels, à la fois en termes de constituants solides et gazeux.

Il semble aussi très important d'évaluer l'impact de la résolution spatiale des images pour les performances de la méthode EARTH. En effet, la sélection de plusieurs couples de pixels à l'intérieur du panache nécessite une résolution spatiale au moins décimétrique, surtout pour les panaches industriels qui sont de taille réduite. Or, parmi les différents projets de satellites embarquant des spectro-imageurs dans le VNIR-SWIR, certains prévoient des résolutions spatiales inférieures au décimètre (comme le projet spatial français Hypxim [88]). A cette résolution, on peut envisager d'appliquer la méthode EARTH, ce qui ouvrirait d'intéressantes perspectives, notamment pour le contrôle des pollutions atmosphériques à une échelle locale, mais avec une couverture globale.

Annexe A

Acronymes

- 4A : *Automatized Atmospheric Absorption Atlas*
- 6S : *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*
- AERONET : *AERosol RObotic NETwork Sun-photometers*
- AIRS : *Adaptative Infrared Spectroradiometer*
- AMARTIS : *Advanced Modeling of the Atmospheric Radiative Transfer for Inhomogeneous Surfaces*
- AOT : *Aerosol Optical Thickness*
- APDA : *Atmospheric Precorrected Differential Absorption*
- ATCOR : *Atmospheric Topographic CORrection*
- AVHRR : *Advanced Very High Resolution Radiometer*
- AVIRIS : *Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer*
- BRDF : *Bidirectional Reflectance Distribution Function*
- CATSI : *Compact Atmospheric Sounding Interferometer*
- CIBR : *Continuum Interpolated Band Ratio*
- COMANCHE : *COde de Modélisation pour l'ANalyse des Cibles Hyperspectrales vues en Entrée instrument*
- COMPAS : *COde de Modélisation d'un Panache d'AéroSols*
- DISORT : *DIScrete Ordinates Radiative Transfer*
- EARLINET : *European Aerosol Research LIdar NETwork*
- EARTH : *Estimation of AeRosol Type using Hyperspectral data*
- EOSP : *Earth Observing Scanning Polarimeter*
- E-PRTR : *European Pollutant Release and Transfer Register*
- ESCOMPTE : *Expérience sur Site pour COntreindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Emissions*

- FLAASH : *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*
- GEISA : *Gestion et Études des Informations Spectroscopiques Atmosphériques*
- GOME : *Global Ozone MonitorinG Experiment*
- HITRAN : *High Resolution TRANsmission*
- IASI : *Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*
- IMG : *Interferometric Monitor for Greenhouse Gases*
- INERIS : *Institut National de l'EnviRonnement Industriel et des riSques*
- JHU : *John Hopkins University*
- JPL : *Jet Propulsion Laboratory*
- JRGE : *Joint Reflectance and Gas Estimator*
- L-APOM : *LUT - Aerosol Plume Optical Model*
- LITMS : *Laboratory for Information Technologies and Mathematical Simulations*
- LPCA : *Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère*
- LUT : *Look-Up Table*
- LWIR : *LongWave InfraRed*
- MATISSE : *Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement*
- MISR *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*
- MODIS : *MODerate resolution Imaging Spectrometer*
- MODTRAN : *MODerate resolution atmospheric TRANsmission*
- MOPITT : *Measurements Of Pollution In The Troposphere*
- MWIR : *MidWave InfraRed*
- OPAC : *Optical Properties of Aerosols and Clouds*
- POLDER : *POLarization and Directionnaly of the Earth's Reflectance*
- SCAR-A : *Sulfate Cloud and Radiation - Atlantic*
- SCAR-C : *Sulfate Cloud and Radiation - California*
- SOS : *Succesive Order of Scattering*
- SWIR : *ShortWave InfraRed*
- TARFOX : *Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational eXperiment*
- TES : *Tropospheric Emission Spectrometer*
- TOMS : *Total Ozone Monitoring Spectrometer*
- VNIR : *Visible, Near-InfraRed*

Annexe B

Principaux codes de transfert radiatif dans l'atmosphère

La simulation des effets atmosphériques est un problème crucial pour l'utilisation des données de télédétection. Ainsi, depuis plusieurs années, des codes ont été développés et améliorés pour simuler l'absorption, la diffusion et l'émission des différents constituants de l'atmosphère (gaz, vapeur d'eau, aérosols), en fonction de leurs profils atmosphériques, de la température, de l'angle d'azimut, etc. L'objectif de cette annexe est de recenser et de brièvement décrire les plus utilisés d'entre eux.

Principaux codes fonctionnant du visible à l'infrarouge thermique

MODTRAN

MODTRAN, pour *MODerate resolution atmospheric TRANsmission*, est certainement l'un des codes de transfert radiatif les plus utilisés. C'est également celui qui a été choisi dans le cadre de nos travaux. Conçu en 1987 par *Spectral Sciences Inc.* et l'*US Air Force*, il est régulièrement modifié pour être amélioré et en est aujourd'hui à sa version 5. Il permet de simuler une luminance au niveau d'un capteur (satellitaire ou aéroporté) en fonction des paramètres atmosphériques, des conditions de prise de vue et de la réflectance du sol, pour des longueurs d'onde comprises entre 0,2 et 100 μm , avec une résolution spectrale de 1 ou 15 cm^{-1} .

L'atmosphère est découpée en couches planes et parallèles. Des modèles atmosphériques standard fournissent des profils types de température, de pression et de concentrations moléculaires pour différentes saisons et différentes latitudes.

L'absorption moléculaire est calculée à partir des données spectroscopiques de la base HITRAN. La diffusion particulaire multiple peut être simulée par deux algorithmes : ISAAC et DISORT [74]. Au cours de la thèse, l'algorithme DISORT a été préféré car il fournit des résultats plus précis, bien que son temps de calcul soit plus important.

Le code COMANCHE est une surcouche IDL, développée par l'ONERA et complétée dans le cadre de cette thèse, permettant une utilisation simplifiée et rapide de MODTRAN.

MATISSE

MATISSE (Modélisation Avancée de la Terre pour l'Imagerie et la Simulation des Scènes et de leur Environnement) [89] est un simulateur développé par l'ONERA. Conçu à l'origine pour modéliser les transferts radiatifs dans l'infrarouge, il a été étendu au domaine réflectif et couvre maintenant les longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 14 μm avec une résolution de 1 cm^{-1} .

Utilisant lui aussi un algorithme k-corrélé pour les diffusions multiples, il permet, de plus, de calculer l'émission du sol et des nuages ainsi que la transmission à haute résolution spectrale pour la propagation des radiations des sources chaudes. Pour la modélisation des sols, des modèles de textures de 10 m de résolution sont utilisés.

Codes ne fonctionnant que dans une partie du spectre électromagnétique

6S

Le code de transfert radiatif 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) [90] a été créé par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique en 1992. C'est un code qui permet de générer des Look-Up Tables dans l'algorithme de correction atmosphérique MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer). Il prend en compte le relief et les sols non-lambertiens.

Il a, de plus, la particularité, depuis sa version vectorielle en 2005, de modéliser la polarisation de la radiation dans l'atmosphère. La diffusion de Rayleigh et des aérosols est calculée par un algorithme de type SOS (*Succesive Order of Scattering*). Conçu pour être utilisé pour des images MODIS, il a été validé pour des longueurs d'ondes appartenant au domaine réfléchissant mais pas thermique. Sa résolution spectrale est de 2,5nm.

4A

Développé par le Laboratoire de Météorologie Dynamique et NOVELTIS, 4A, pour *Automatized Atmospheric Absorption Atlas* [91], permet la détermination de l'absorption atmosphérique dans l'infrarouge, par une méthode raie par raie. Cette méthode consiste à sommer toutes les contributions de toutes les raies d'absorption de tous les gaz, dans des intervalles spectraux très proches, le long du chemin optique.

Ce code, qui ne s'intéresse qu'au domaine spectral compris entre 10 et 3250cm^{-1} (soit des longueurs d'ondes comprises entre 3 et $1000\mu\text{m}$) permet d'obtenir les transmittances atmosphériques et les luminances dans l'infrarouge, avec une excellente résolution spectrale ($5\cdot 10^{-4}\text{cm}^{-1}$).

AMARTIS

L'algorithme AMARTIS [92] (*Advanced Modeling of the Atmospheric Radiative Transfer for Inhomogeneous Surfaces*), développé par l'ONERA en 2000, a pour objectif de simuler les transferts radiatifs dans le domaine réfléchissant en tenant compte de l'hétérogénéité du sol (contrairement à 6S) et avec un temps de calcul bien inférieur à celui nécessaire pour l'utilisation des simulations Monte Carlo [93].

Annexe C

COMPAS : COde de Modélisation d'un Panache d'AéroSols

Fonctionnement général

COMPAS (COde de Modélisation d'un Panache d'AéroSols), est un outil développé pour les besoins de cette thèse, reposant sur la théorie de Mie [7] et permettant de calculer les propriétés optiques d'un mélange d'aérosols. A partir d'une description microphysique des particules, il simule leurs propriétés optiques sur l'ensemble du domaine optique (ultra-violet, visible, infrarouge). Le fichier de sortie contenant ces propriétés optiques est généré sous le format requis par MODTRAN et permet donc de modéliser l'impact radiatif d'un panache d'aérosols.

Les calculs sont effectués à l'aide de la fonction « *bhmi.pro* »¹ [8], en supposant les particules sphériques (cadre de la théorie de Mie). Par ailleurs, la distribution en taille des particules est décrite par une loi lognormale, mono ou multi-modale.

Les propriétés optiques des aérosols peuvent être calculées pour deux types de mélange : interne et externe. Selon le type choisi, les équations 2.8 2.9 2.10 2.11 ou 2.12, présentées au chapitre 2, sont utilisées.

Pour chaque constituant du mélange, l'utilisateur renseigne son indice de réfraction complexe et les paramètres de ses modes granulométriques (N_i , r_{mi} et σ_{mi} de l'équation 2.1). Il indique également le domaine de longueur d'onde et le pas d'échantillonnage avec lequel il souhaite effectuer les calculs.

Prise en compte de l'humidité relative

S'il le souhaite, l'utilisateur peut également indiquer l'humidité relative des aérosols. Ce paramètre a pour effet de modifier les rayons et les indices de réfraction de certains types d'aérosols. En effet, pour les aérosols dits hydrophiles, *Hänel* [94] a établi les relations suivante :

$$r_h = r(1 - H)^{-e}, \quad (\text{C.1})$$

$$n_h = n_{H_2O} + (n - n_{H_2O}) \left(\frac{r_h}{r} \right)^{-3}, \quad (\text{C.2})$$

où r_h et n_h sont respectivement le rayon d'une particule humide et son indice de réfraction, r et n , le rayon et l'indice de cette même particule à l'état sec, H le taux d'humidité, n_{H_2O} l'indice de réfraction de l'eau et e un coefficient dépendant du type d'aérosol considéré. Il vaut par exemple 0,285 pour les aérosols dits *water soluble*, les sulfates et les embruntes marins, et 0,25 pour les matières organiques [95].

¹<http://www.met.tamu.edu/class/ATMO689-LC/bhmi.pro>

Ainsi, si le paramètre H est renseigné, les propriétés des particules de type *water soluble*, sulfates, embruntes marins ou matières organiques sont modifiées suivant les équations ci-dessus. Dans le cadre de nos travaux, tous les calculs ont été effectués pour une humidité relative de 50%.

Indices de réfraction

Associée au code COMPAS, une petite base de données d'indices de réfraction a été construite pour les besoins des différentes simulations effectuées dans le cadre de cette thèse. Elle comprend les indices des types d'aérosols suivants, du visible au proche-infrarouge :

- matières organiques (*Shettle et Fenn* [96])
- suies (*Shettle et Fenn* [96])
- sulfates (*Toon et al.* [97])
- embruntes marins (*Shettle et Fenn* [96])
- particules minérales (*Carlson et Benjamin, Sokolik et al.* [98, 99])
- aérosols métalliques (étude présentée au chapitre 3)
- eau (*Kou et al.* [100])
- *water soluble* (*Shettle et Fenn* [96])
- *insoluble* (*Shettle et Fenn* [96])

Annexe D

Études complémentaires menées sur la détection de gaz

En complément des études menées sur la caractérisation des aérosols, nous nous sommes penchés sur la détection de plusieurs gaz, dans différents domaines spectraux. Il nous a paru intéressant de présenter, dans ce manuscrit, quelques-uns des résultats obtenus pour souligner le potentiel de l'imagerie hyperspectrale pour la caractérisation des effluents industriels.

Cette annexe présente donc, dans une première partie, les résultats de travaux portant sur la détection de CO₂ et de CH₄ par filtrage adapté dans le réflectif. La seconde partie concerne la détection de SO₂ dans l'infrarouge thermique. On y trouvera une présentation des équations du transfert radiatif dans le domaine émissif, puis des résultats d'une détection de SO₂ par la méthode du CIBR.

D.1 Détection de CO₂ et CH₄ dans le domaine réflectif

Pour la détection du CO₂ et du CH₄, nous nous sommes inspirés des travaux de *Thorpe et al.* [14], qui proposent une méthode de détection par filtrage adapté. Elle consiste à calculer des signatures spectrales de différents gaz, à partir de bases de données spectroscopiques, puis à chercher cette signature dans les signaux de luminance d'une image hyperspectrale.

Nous avons donc implémenté cette méthode, en y ajoutant une étape préalable de classification par l'algorithme K-means [101]. Nous présentons, figures D.1 et D.2, le résultat de cet algorithme de détection appliqué à deux images AVIRIS, l'une acquise au-dessus d'une centrale électrique, l'autre sur une zone littorale de Californie, près de Santa Barbara.

Sur la figure D.1, du CO₂ est détecté en sortie des cheminées de la centrale (pixels, en rouge sur l'image de détection, qui, après filtrage, ont de fortes valeurs pour la signature du CO₂).

Sur la figure D.2, deux émissions de CH₄ sont détectées au large de la côte. Ces émissions proviennent de deux sources naturelles sous-marines, connues [102].

D.2 Détection de SO₂ dans le domaine émissif

Equation du transfert radiatif dans le domaine émissif

Dans le domaine émissif, les équations du transfert radiatif présentées au chapitre 2 ne sont pas valables. En effet, entre 8 et 14 μ m, la source de rayonnement n'est pas le soleil, mais l'atmosphère et la Terre. Par ailleurs, l'impact radiatif des gaz ne se décrit plus seulement par leur transmittance, mais également par leur émission, qui dépend de leur température. Il convient donc de réécrire ces équations pour ce domaine spectral.

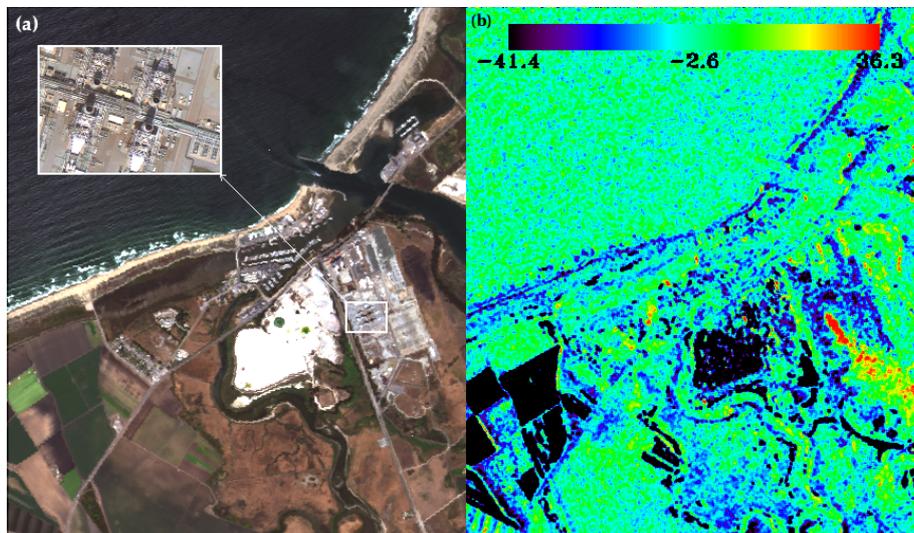


FIGURE D.1 – (a) Image AVIRIS d'une centrale électrique et zoom sur les cheminées principales. (b) Image de détection du CO_2 émis par les cheminées.

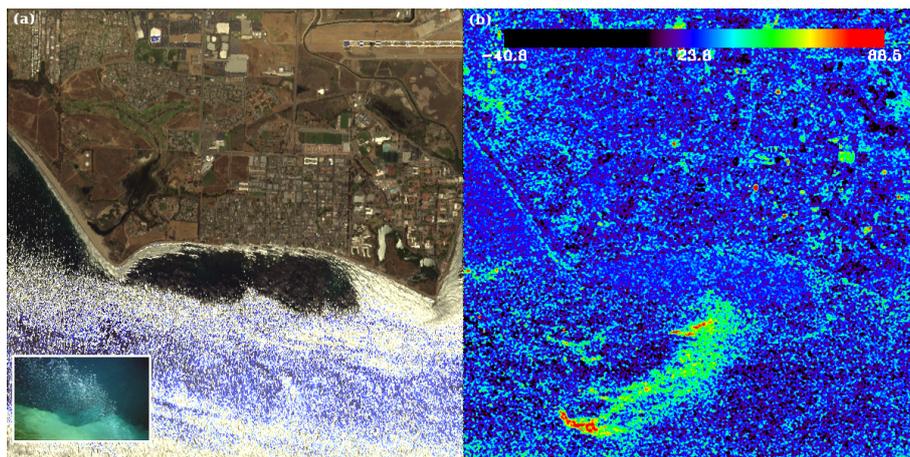


FIGURE D.2 – (a) Image AVIRIS d'une zone littorale en Californie et zoom sur une émission sous-marine de méthane. (b) Image de détection des deux sources principales d'émissions de méthane.

En ciel clair

En ciel clair, l'énergie reçue par le capteur provient donc soit de l'émission descendante de l'atmosphère ($E_{th}^\downarrow(\lambda)$) après réflexion avec le sol (de réflectance $\rho^{sol}(\lambda)$), soit directement de la luminance montante de l'atmosphère ($L_{em}^{atm\uparrow}(\lambda)$), soit encore de l'émission du sol, qui émet comme un corps gris d'émissivité $\epsilon^{sol}(\lambda) = 1 - \rho^{sol}(\lambda)$.

Les diffusions sont négligées car on considère que les aérosols sont de petite taille (rayon moyen inférieur au micromètre) et qu'ils ont donc un pouvoir de diffusion très faible dans ce domaine de longueurs d'onde.

Finalement, l'équation du transfert radiatif dans l'infrarouge thermique s'écrit

$$\begin{aligned} L^{capteur}(\lambda, \Theta_{sol}) &= L_{th}^{atm\uparrow}(\lambda) + \frac{E_{th}^\downarrow(\lambda)}{\pi} \rho^{sol}(\lambda) T^{atm\uparrow}(\lambda) \\ &+ [1 - \rho^{sol}(\lambda)] L^{CN}(\lambda, \Theta_{sol}) T^{atm\uparrow}(\lambda) \end{aligned} \quad (D.1)$$

où $T^{atm\uparrow}(\lambda)$ est la transmittance montante de l'atmosphère et $L^{CN}(\lambda, \Theta_{sol})$, la luminance du corps noir à la température du sol Θ_{sol} .

Celle-ci est donnée par la loi de Planck :

$$L^{CN}(\lambda, \Theta) = \frac{2 h c^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda\Theta}\right) - 1} \quad (D.2)$$

où $h = 6,625510^{-34} J.s$ est la constante de Planck, $c = 2,99610^{-8} m.s^{-1}$ la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide et $k = 1,380510^{-23}$ la constante de Boltzmann.

En présence d'un panache

En présence d'un panache de gaz, l'écriture de l'équation D.1 est modifiée par la transmittance du panache et son émission propre (voir figure D.3).

Cette émission s'écrit :

$$L^{gaz}(\lambda, \Theta_{panache}) = [1 - T^{gaz}(\lambda)] L^{CN}(\lambda, \Theta_{panache}) \quad (D.3)$$

où $L^{CN}(\lambda, \Theta_{panache})$ est la luminance du corps noir à la température du panache de gaz $\Theta_{panache}$ (cf. équation D.2).

La luminance émise par le panache, avant d'atteindre le capteur, traverse la partie de l'atmosphère comprise entre l'altitude maximale du panache z_{max} et le capteur. Dans l'équation du transfert radiatif, on multiplie donc ce terme par $T_{>}^{atm\uparrow}(\lambda)$ qui représente la transmittance atmosphérique montante entre z_{max} et le capteur.

Finalement, l'équation du transfert radiatif dans le domaine émissif, en présence d'un panache s'écrit

$$\begin{aligned} L^{capteur}(\lambda, \Theta_{sol}, \Theta_{panache}) &= L_{th}^{atm\uparrow}(\lambda) + \frac{E_{th}^\downarrow(\lambda)}{\pi} \rho^{sol}(\lambda) T^{atm\uparrow}(\lambda) T^{panache\downarrow}(\lambda) T^{panache\uparrow}(\lambda) \\ &+ [1 - \rho^{sol}(\lambda)] L^{CN}(\lambda, \Theta_{sol}) T^{atm\uparrow}(\lambda) T^{panache\uparrow}(\lambda) \\ &+ [1 - T^{panache}(\lambda)] L^{CN}(\lambda, \Theta_{panache}) T_{>}^{atm\uparrow}(\lambda). \end{aligned} \quad (D.4)$$

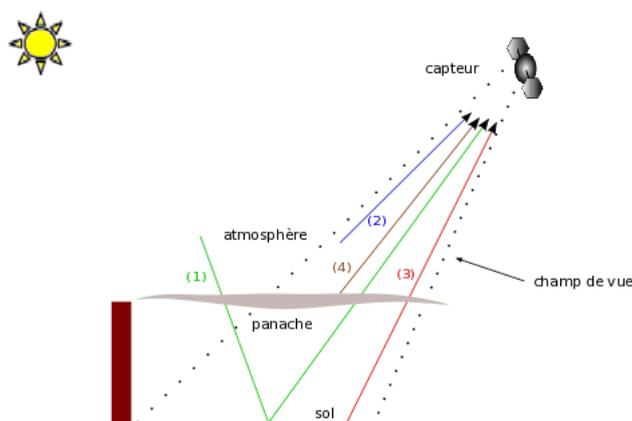


FIGURE D.3 – Schéma des principaux rayonnements reçus par le capteur observant un panache de gaz dans le domaine infrarouge thermique [8-14 μm]. Le rayonnement incident parvient en entrée du capteur en étant (1) émis par l'atmosphère, transmis dans le panache puis réfléchi par le sol, (2) émis par l'atmosphère puis transmis jusqu'au capteur (3) émis par la Terre puis transmis dans le panache et enfin (4) émis par le panache puis transmis jusqu'au capteur.

Détection de SO_2 émis par une raffinerie

Pour la détection de panaches de gaz dans l'infrarouge thermique à partir d'images hyperspectrales, les méthodes développées s'appuient sur les pics d'émission des gaz constituant le panache. En effet, les gaz émis, par exemple, par les industries sont généralement plus chauds que l'air ambiant et leur présence se traduit, dans les signaux de luminance capteur, par un pic d'émission thermique. Pour le SO_2 , ce pic d'émission se situe à 8,7 μm . *Shimoni et al.* [41] ont donc appliqué l'algorithme CIBR [39] sur une image AHS d'une raffinerie rejetant du SO_2 (le capteur AHS acquiert des images hyperspectrales sur l'ensemble du domaine optique, avec une dizaine de bandes dans l'infrarouge thermique). Nous avons, à notre tour, appliqué cet algorithme. Les résultats obtenus sont présentés figure D.4.

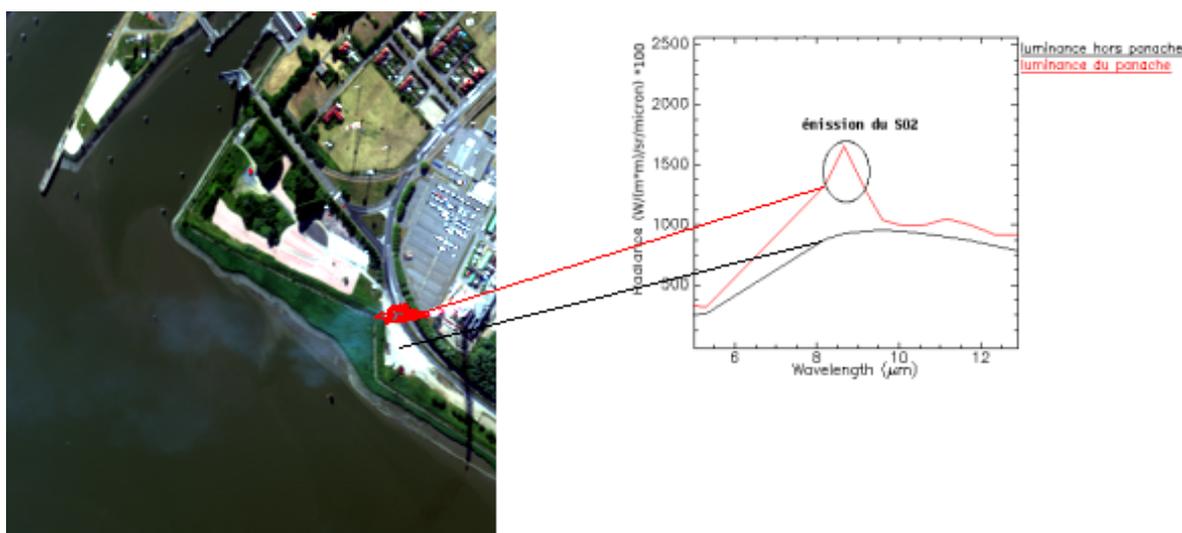


FIGURE D.4 – Détection de SO_2 émis par une raffinerie, à partir d'une image AHS.

Table des figures

1.1	<i>Principe de l'acquisition d'une image hyperspectrale. Les luminances sont enregistrées par le capteur simultanément en de nombreuses bandes spectrales ; elles représentent l'énergie incidente au capteur, provenant du rayonnement solaire, après interactions avec les gaz et aérosols atmosphériques et le sol. A chaque pixel de l'image correspond donc un spectre de luminance finement échantillonné, mettant en évidence certaines caractéristiques spectrales de l'atmosphère et du sol.</i>	16
2.1	<i>Un photon diffusé par une particule aérosol est caractérisé par l'angle de diffusion Θ défini entre la direction qu'aurait le photon sans diffusion et sa direction avec diffusion.</i>	22
2.2	<i>a) Spectres de transmittance des principaux gaz possédant des bandes d'absorption entre 400 et 2500nm. b) Absorption relativement faible du CH_4 entre 2150 et 2450nm. c) Forts pics d'absorption du CO_2 centrés en 1958nm, 2008nm et 2058nm. d) Faibles pics d'absorption du N_2O centrés en 2109 et 2258nm. [Source : Thorpe et al. [14]]. .</i>	26
2.3	<i>Schéma des principaux rayonnements reçus par le capteur observant une scène dans le domaine réflectif [0,4-2,5μm].</i>	28
2.4	<i>Chaîne de modélisation directe développée pour l'étude de panaches.</i>	32
3.1	<i>Répartition des émissions de PM_{10} en France par secteur industriel, d'après les déclarations 2010 (données 2007) [Source : Registre Français des Emissions Polluantes, INERIS].</i>	38
3.2	<i>Site d'étude.</i>	40
3.3	<i>Schéma de fonctionnement de Mélopée Lab.</i>	42
3.4	<i>Distribution en taille des échantillons collectés dans les filtres.</i>	43
3.5	<i>Analyse chimique des échantillons effectuée par le Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère (LPCA).</i>	44
3.6	<i>BRDF mesurées (pointillés) et simulées (traits pleins) pour les particules de la cheminée A (cuisson) par le Département d'Optique Théorique et Appliquée (DOTA) de l'ONERA.</i>	45
3.7	<i>Analyse physico-chimique des aérosols prélevés dans l'environnement [55].</i>	46
3.8	<i>Propriétés radiatives obtenues pour les mélanges d'aérosols issus de l'usine (rouge : sortie de cheminée A (cuisson), vert : sortie de cheminée B (refroidissement), bleu : à 500m en aval, noir : à 1500m en aval).</i>	50
3.9	<i>Comparaison des propriétés radiatives obtenues pour le panache issu de l'usine métallurgique et pour les aérosols mesurés lors de la campagne ESCOMPTE [11] (rouge : données ESCOMPTE, bleu : 500m en aval de l'usine, noir : 1500m en aval de l'usine, vert : en amont de l'usine).</i>	51
4.1	<i>Spectres de luminances dans le SWIR pour différentes teneurs en CO_2. Trait plein : concentration standard (du modèle atmosphérique 1976 US standard, soit 330ppm), pointillé : excès de 150ppm, soit 480ppm.</i>	55

4.2	<i>Image AVIRIS du feu de Quinault, acquise le 21 septembre 1994 en Californie. De gauche à droite : bande 6 (0,42μm), band 68 (1,0μm) et bande 177 (2,04μm).</i>	55
4.3	<i>Schéma global de la méthode proposée.</i>	56
4.4	<i>Schéma du fonctionnement de la méthode d'estimation des aérosols (issue de la méthode L-APOM).</i>	57
4.5	<i>Schéma du fonctionnement de la méthode JRGE pour l'estimation du CO₂.</i>	58
4.6	<i>Impact des propriétés des aérosols, pour une épaisseur optique de 5 à 550nm, sur le signal de luminance autour de la bande d'absorption du CO₂ à 2,0μm. Pointillés : sans aérosols ; trait plein : aérosols de biomasse ; tirets : aérosols maritimes ; traits et croix : aérosols ruraux.</i>	61
4.7	<i>Impact du contenu en vapeur d'eau sur l'estimation du CO₂.</i>	64
4.8	<i>Impact de la température sur l'estimation du CO₂.</i>	64
4.9	<i>Impact de la géométrie du panache sur le signal de luminance autour de la bande d'absorption du CO₂ à 2,0μm. Trait plein : panache homogène entre 0 et 400m ; pointillés : panache avec les aérosols entre 0 et 200m et le CO₂ entre 200 et 400m ; tirets : panache avec le CO₂ entre 0 et 200m et les aérosols entre 200 et 400m.</i>	65
4.10	<i>Résultats de l'estimation du CO₂ sur l'image du feu de Quinault sans estimation préalable des aérosols.</i>	67
4.11	<i>Résultats de l'estimation des aérosols sur l'image du feu de Quinault.</i>	68
4.12	<i>Propriétés optiques d'aérosols de biomasse calculées avec COMPAS pour différentes propriétés microphysiques (trait plein : $f_{BC} = 2\%$, $r_m = 0,21\mu$m ; tirets : $f_{BC} = 8\%$, $r_m = 0,13\mu$m).</i>	69
4.13	<i>Résultats de l'estimation des aérosols sur l'image du feu d'Aberdeen.</i>	71
4.14	<i>Résultats de l'estimation du CO₂ sur l'image du feu d'Aberdeen.</i>	71
5.1	<i>Schéma global de fonctionnement de la méthode EARTH.</i>	76
5.2	<i>Moyennes et écarts-types des propriétés optiques des différents modèles d'aérosols de la LUT (rouge : modèle 1, noir : modèle 2, bleu : modèle 3, vert : modèle 4).</i>	83
5.3	<i>Estimation de l'erreur de modélisation : signaux simulés et modélisés pour une épaisseur optique du panache de 0,5 à 550nm (noir : simulation avec aérosols, bleu : simulation sans aérosols, rouge : résultat issu de l'équation du transfert radiatif). a) Luminance capteur, b) Transmittance, c) Luminance montante.</i>	86
5.4	<i>Erreurs algorithmiques (Root Mean Square Errors) dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).</i>	87
5.5	<i>Erreurs dues au bruit instrumental (Root Mean Square Errors) dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).</i>	88
5.6	<i>Erreurs totales, en pourcentage, dans l'estimation des propriétés optiques des aérosols (trait plein : $\tau(\lambda)$, pointillés : produit $\omega_0(\lambda)P(\lambda)$).</i>	90
5.7	<i>Scores de dissimilarité obtenus pour les différents modèles d'aérosols, et pour différents niveaux de bruit dans les propriétés optiques (bleu : 2,5% d'erreur, orange : 5% d'erreur, jaune : 7,5% d'erreur, vert : 9% d'erreur, marron : 14% d'erreur).</i>	91
5.8	<i>Image CASI acquise le 28 octobre 2010, sur le site d'une industrie métallurgique, à Fos-sur-Mer.</i>	93
5.9	<i>Image en fausses couleurs, permettant la segmentation du panache (obtenue après égalisation d'histogramme de la bande 8 (à 0,4μm) de l'image).</i>	94
5.10	<i>Reconstruction des signaux de luminances pour un couple de pixels du panache de l'image CASI (bleu : signal mesuré sur l'image, noir : modélisation sans prise en compte du panache, rouge : modélisation avec les propriétés du panache estimées par la méthode EARTH).</i>	95

5.11	<i>Résultats de l'estimation des propriétés optiques du panache pour un couple de pixels de l'image CASI.</i>	95
5.12	<i>Résultats de l'estimation du type d'aérosols à partir de trois couples de pixels de l'image CASI. Les scores associés à chaque couple sont représentés en bleu, vert et rouge.</i>	96
D.1	<i>(a) Image AVIRIS d'une centrale électrique et zoom sur les cheminées principales. (b) Image de détection du CO₂ émis par les cheminées.</i>	110
D.2	<i>(a) Image AVIRIS d'une zone littorale en Californie et zoom sur une émission sous-marine de méthane. (b) Image de détection des deux sources principales d'émissions de méthane.</i>	110
D.3	<i>Schéma des principaux rayonnements reçus par le capteur observant un panache de gaz dans le domaine infrarouge thermique [8-14μm].</i>	112
D.4	<i>Détection de SO₂ émis par une raffinerie, à partir d'une image AHS.</i>	112

Liste des tableaux

2.1	<i>Paramètres des différents modes granulométriques des aérosols industriels de Fos-sur-Mer du 23 juin 2001, chaque mode étant représenté par une loi lognormale [source : ESCOMPTE].</i>	24
2.2	<i>Émissions de polluants dans l'air (solides et gazeux) par l'usine d'Arcelor-Mittal à Fos-sur-Mer en 2008 [source : European Pollutant Release and Transfer Register].</i>	26
3.1	<i>Liste des 10 premiers émetteurs nationaux de PM10, d'après les déclarations 2010 (données 2007) [Source : Registre Français des Émissions Polluantes, INERIS].</i>	38
3.2	<i>Indices de réfraction estimés à partir des mesures de BRDF.</i>	45
3.3	<i>Description des modèles utilisés pour décrire les aérosols à différentes distances de leurs sources d'émissions.</i>	48
4.1	<i>Intervalles de variations des propriétés microphysiques des aérosols utilisés pour la base de données de L-APOM.</i>	58
4.2	<i>Principaux paramètres utilisés pour les simulations MODTRAN.</i>	59
4.3	<i>Erreurs de l'algorithme JRGE dues à l'interpolation de la réflectance du sol.</i>	61
4.4	<i>Erreurs de l'algorithme JRGE dues à une erreur de 30% dans l'estimation des propriétés microphysiques des aérosols.</i>	62
4.5	<i>Erreurs de l'algorithme JRGE dues à l'utilisation d'un modèle d'aérosols non adapté.</i>	62
4.6	<i>Erreurs de l'algorithme JRGE sur quatre régions d'intérêt sans prise en compte des aérosols.</i>	68
4.7	<i>Erreurs de l'algorithme JRGE sur quatre régions d'intérêt en utilisant les propriétés des aérosols préalablement retrouvées.</i>	69
4.8	<i>Résultats de l'estimation du CO₂ sur trois régions d'intérêt.</i>	72
5.1	<i>Description des paramètres choisis, pour les quatre modèles d'aérosols, pour le calcul de la LUT des propriétés optiques (les rayons r sont exprimés en μm, les fractions f en % et les écarts-types σ sont sans unité).</i>	82
5.2	<i>Principaux paramètres utilisés pour les simulations visant à quantifier, pour la méthode EARTH, les différentes sources d'erreurs.</i>	85

Bibliographie

- [1] Equipe de rédaction principale, R. Pachauri, and A. Reisinger, “Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse,” Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat, Organisation météorologique mondiale (OMM), Tech. Rep., 2008.
- [2] N. Riemer, M. West, R. Zaveri, and R. Easter, “Simulating the evolution of soot mixing state with a particle-resolved aerosol model,” *J. Geophys. Res.*, vol. 114, 2009.
- [3] J. Seinfeld and S. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics : from air pollution to climate change*. J. Wiley, New York, 1998.
- [4] N. Jacquinet-Husson, E. Arié, J. Ballard, A. Barbe, G. Bjoraker, B. Bonnet, L. R. Brown, C. Camy-Peyret, J. P. Champion, A. Chédin, A. Chursin, C. Clerbaux, G. Duxbury, J. M. Flaud, N. Fourrié, A. Fayt, G. Graner, R. Gamache, A. Goldman, V. I. Golovko, G. Guelachvili, J. M. Hartmann, J. C. Hilico, J. Hillman, G. Lefevre, E. Lellouch, S. N. Mikailenko, O. V. Naumenko, V. Nemtchinov, D. A. Newnham, A. Nikitin, J. Orphal, A. Perrin, D. C. Reuter, C. P. Rinsland, L. Rosenmann, L. S. Rothman, N. A. Scott, J. Selby, L. N. Sinita, J. M. Sirota, A. M. Smith, K. M. Smith, V. G. Tyuterev, R. H. Tippingn, S. Urban, P. Varanasi, and M. Weber, “The 1997 spectroscopic GEISA databank,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 62, pp. 205–254, 1999.
- [5] M. Hess, P. Köpke, and I. Schult, “Optical properties of aerosols and clouds : the software package OPAC,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 79, pp. 831–844, 1998.
- [6] K.-N. Liou, *An introduction to atmospheric radiation*, ser. International Geophysics Series. Academic Press, Inc., 1980, vol. 26.
- [7] G. Mie, “Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen,” *Ann. Phys.*, vol. 25, pp. 377–445, 1908.
- [8] C. F. Bohren and D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Wiley, 1983.
- [9] P. Russel, P. Hobbs, and L. Stowe, “Aerosol properties and radiative effects in the United States East Coast haze plume : An overview of the Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment (TARFOX),” *J. Geophys. Res.*, vol. 104, no. D2, pp. 2213–2222, 1999.
- [10] L. Remer, S. Gasso, D. Hegg, Y. Kaufman, and B. Holben, “Urban/industrial aerosol : Ground-based sun/sky radiometer and airborne in situ measurements,” *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. D14, pp. 16 849–16 859, 1997.
- [11] M. Mallet, R. Van Dingenen, J. Roger, S. Despiiau, and H. Cachier, “In situ airborne measurements of aerosol optical properties during photochemical pollution events,” *J. Geophys. Res.*, vol. 110, 2005.

- [12] M. Mallet, J. Roger, S. Despiau, O. Dubovik, and J. Putaud, “Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during escompte,” *Atmospheric Research*, vol. 69, pp. 73–97, 2003.
- [13] E. McCartney, *Optics of the Atmosphere*. New York : Wiley, 1976.
- [14] A. K. Thorpe, A. Roberts, P. E. Dennison, E. S. Bradley, and C. C. Funk, “Point source emissions mapping using the Airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS),” in *Proc. of SPIE*, 2012, pp. 368–370.
- [15] P.-Y. Deschamps, M. Herman, and D. Tanré, “Modeling of the atmospheric effects and its applications to the remote sensing of ocean color,” *Appl. Opt.*, vol. 22, pp. 3751–3758, 1983.
- [16] D. Antoine and A. Morel, “Relative importance of multiple scattering by air molecules and aerosols in forming the atmospheric path radiance in the visible and near-infrared parts of the spectrum,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 12, pp. 2245–2259, 1998.
- [17] C. Miesch, L. Poutier, V. Achard, X. Briottet, X. Lenot, and Y. Boucher, “Direct and Inverse Radiative Transfer Solutions for Visible and Near-Infrared Hyperspectral Imagery,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 43, pp. 1552–1562, 2005.
- [18] F. X. Kneizys, L. W. Abreu, G. P. Anderson, J. H. Chetwynd, E. P. Shettle, A. Berk, L. S. Bernstein, D. C. Robertson, P. Acharya, L. S. Rothman, J. E. A. Selby, W. O. Gallery, and S. A. Clough, “The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 MODEL,” Prepared by Ontar Corporation for PL/GPOS, Tech. Rep., 1996.
- [19] H. Kobayashi, A. Shimota, K. Kondo, E. Okumara, Y. Kamedo, H. Shimoda, and T. Ogawa, “Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases : A high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation,” *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 6801–6807, 1999.
- [20] J. Drummond and J. Mand, “The Measurements of the Pollution in the Troposphere (MOPITT) instrument : Overall performance and calibration requirements,” *J. Atmos. Oceanic Technol.*, vol. 13, pp. 314–320, 1996.
- [21] T. Pagano, D. Elliot, M. Gunson, H. Aumann, S. Gaiser, N. Dehghani, and K. Overoye, “Operational readiness of the Atmospheric Infrared Sounder on the Earth Observing System Aqua Spacecraft,” in *Proc. of SPIE*, 2001, pp. 4483–04.
- [22] R. Beer, A. Glavich, and D. Rider, “Tropospheric emission spectrometer for the Earth Observing System’ Aura satellite,” *Appl. Opt.*, vol. 40, pp. 2356–2367, 2001.
- [23] G. Chalo, F. Cayla, and D. Diebel, “IASI : An advance Sounder for Operational Meteorology,” in *Proc. of SPIE*, 2001.
- [24] P. S., C. Camy-Peyret, P. Jeseck, T. Hawat, G. Durry, and F. Lefevre, “first direct simultaneous HCl and $ClONO_2$ profile measurements in the Artic vortex,” *Geophys. res. lett.*, vol. 25, pp. 2663–2666, 1998.
- [25] J. P. Laboratory, “Level 2 algorithm theoretical basis document,” Rep. JPL D-16474 (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif.), Tech. Rep., 1999.
- [26] S. Turquety, J. Hadji-Lazaro, C. Clerbaux, D. Hauglustaine, T. Clough, V. Cassé, P. Schlüssel, and G. Mégie, “Operational trace gas retrieval algorithm for the Infrared Atmospheric Sounder Interferometer,” *J. Geophys. Res.*, vol. 109, p. D21301, 2004.

- [27] E. Puckrin, C. S. Turcotte, M.-A. Gagnon, J. Bastedo, V. Farley, and M. Chamberland, “Airborne infrared hyperspectral imager for intelligence, surveillance, and reconnaissance applications,” in *Proc. of SPIE*, vol. 8360, 2012.
- [28] C. Gittins, “Detection and characterization of chemical vapor fugitive emissions by nonlinear optimal estimation : theory and simulation,” *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 23, pp. 4545–4561, 2009.
- [29] P. Heasler, C. Posse, J. Hylden, and K. Anderson, “Nonlinear bayesian Algorithms for Gas Plume detection and Estimation from Hyper-spectral Thermal Image Data,” *Sensors*, vol. 7, pp. 905–920, 2007.
- [30] J.-M. Thériault, P. Lacasse, H. Lavoie, F. Bouffard, Y. Montembeault, V. Farley, L. Belhumeur, and P. Lagueux, “CATSI EDM - A New Sensor for the Real-Time Passive Stand-off Detection and Identification of Chemicals,” in *Proc. of SPIE*, vol. 7665, 2010.
- [31] E. O’Donnell, D. Messinger, C. Savaggio, and J. Schott, “Identification and detection of gaseous effluents from hyperspectral imagery using invariant algorithms,” in *Proc. of SPIE*, vol. 5425, 2004, pp. 573–582.
- [32] A. Vallières, A. Villemaire, M. Chamberland, L. Belhumeur, V. Farley, J. Giroux, and J.-F. Legault, “Algorithms for chemical detection, identification and quantification for thermal hyperspectral imagers,” in *Proc. of SPIE*, vol. 5995, 2005.
- [33] D. Messinger, “Gaseous plume detection in hyperspectral images : a comparison of methods,” in *Proc. of SPIE*, vol. 5425, 2004, pp. 592–603.
- [34] N. Mehta, E. Scharlemann, and C. Stevens, “Quantitative estimation of trace chemicals in industrial effluents with the sticklet transform method,” in *Proc. of SPIE*, vol. 4378, 2001, pp. 10–20.
- [35] G. Jellison and D. Miller, “Validation and calibration of a spectroscopic technique for determination of gas plume temperature,” in *Proc. of SPIE*, vol. 5425, 2004, pp. 244–255.
- [36] J. Kerekes, M. Griffin, J. Baum, and K. Farrar, “Modeling of LWIR hyperspectral system performance for surface object and effluent detection applications,” in *Proc. of SPIE*, vol. 4381, 2001, pp. 348–359.
- [37] M. Griffin, J. Kerekes, K. Farrar, and H. Burke, “Characterization of gaseous effluents from modeling of LWIR hyperspectral measurements,” in *Proc. of SPIE*, vol. 4381, 2001, pp. 360–369.
- [38] P. Tremblay, S. Savary, M. Rolland, A. Villemaire, M. Chamberland, V. Farley, L. Brault, J. Giroux, J.-L. Allard, E. Dupuis, and T. Padia, “Standoff gas identification and quantification from turbulent stack plumes with an imaging Fourier-transform spectrometer,” in *Proc. of SPIE*, vol. 7673, 2010.
- [39] V. Carrere and J. Conel, “Recovery of atmospheric water vapour total column abundance from imaging spectrometer data around 940 nm - sensitivity analysis and application to AVIRIS data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 44, pp. 179–204, 1993.
- [40] C. Spinetti, V. Carrère, M. Buongiorno, A. Sutton, and T. Elias, “Carbon dioxide of Pu‘u‘O‘o volcanic plume at Kilauea retrieved by AVIRIS hyperspectral data,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, 2008.

- [41] M. Shimoni, R. Heremans, F. van der Meer, and F. Acheroy, “Measuring pollutant gases using VNIR and TIR imaging spectroscopy,” in *5th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, 2007.
- [42] R. Marion, R. Michel, and C. Faye, “Measuring trace gases in plumes from hyperspectral remotely sensed data,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 4, pp. 854–864, 2004.
- [43] O. García, A. Díaz, F. Expósito, J. Díaz, O. Dubovik, P. Dubuisson, J.-C. Roger, T. Eck, A. Sinyuk, Y. Derimian, E. Dutton, J. Schafer, B. Holben, and C. García, “Validation of AERONET estimates of atmospheric solar fluxes and aerosol radiative forcing by ground-based broadband measurements,” *J. Geophys. Res.*, vol. 113, p. D21207, 2008.
- [44] U. Wandinger, D. Müller, C. Bockmann, D. Althausen, V. Matthias, J. Bosenberg, V. Weiß, M. Fiebig, M. Wendisch, A. Stohl, and A. Ansmann, “Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements,” *J. Geophys. Res.*, vol. 107, p. D21, 8125, 2002.
- [45] M. King, Y. Kaufman, D. Tanré, and T. Nakajima, “Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space : Past, Present, and Future,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp. 2229–2259, 1999.
- [46] A. Alakian, R. Marion, and X. Briottet, “Retrieval of microphysical and optical properties in aerosol plumes with hyperspectral imagery : L-APOM method,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, pp. 781–793, 2009.
- [47] Y. J. Kaufman, A. Wald, L. Remer, B. Gao, R. Li, and L. Flynn, “The MODIS 2.1- μm channel–correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, pp. 1286–1297, 1997.
- [48] A. Angström, “On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air,” *Geogr. Ann.*, vol. 12, pp. 130–159, 1929.
- [49] D. Tanré, P. Y. Deschamps, C. Devaux, and M. Herman, “Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in Thematic Mapper data,” *J. Geophys. Res.*, pp. 15 955–15 964, 1988.
- [50] Y. Cheng, W. A., H. Eichler, H. Su, T. Gnauk, E. Braggemann, H. Herrmann, J. Heintzenberg, J. Slanina, T. Tuch, M. Hu, and Y. Zhang, “Aerosol optical properties and related chemical apportionment at Xinken in Pearl River Delta of China,” *Atm. Environ.*, vol. 42, pp. 6351–6372, 2008.
- [51] L. Remer and Y. Kaufman, “Dynamic aerosol model : Urban/industrial aerosol,” *J. Geophys. Res.*, vol. 103, no. D12, pp. 13 859–13 871, 1998.
- [52] H. Annegarn, A. Leslie, J. Winchester, and J. Sellschop, “Particle size and temporal characteristics of aerosol composition near coal-fired electric power plants of the eastern transvaal,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 489–498, 1983.
- [53] T. Mather, R. Harrison, V. . Tsanev, D. Pyle, M. Karumudi, A. Bennett, G. Sawyer, and E. Highwood, “Observations of the plume generated by the December 2005 oil depot explosions and prolonged fire at Buncefield (Hertfordshire, UK) and associated atmospheric changes ,” in *Proceedings of the Royal Society*, vol. 463, 2007, pp. 1153–1177.
- [54] R. Moffet, Y. Desyaterik, R. Hopkins, A. Tivanski, M. Gilles, Y. Wang, V. Shutthanandan, L. Molina, R. Abraham, K. Johnson, V. Mugica, M. Molina, A. Laskin, and K. Prather, “Characterization of aerosols containing Zn, Pb, and Cl from an industrial region of Mexico City,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, pp. 7091–7097, 2008.

- [55] H. Marris, K. Deboudt, P. Augustin, P. Flament, F. Blond, E. Fiani, M. Fourmentin, and H. Delbarre, “Fast changes in chemical composition and size distribution of fine particles during the near-field transport of industrial plumes,” *Science of the Total Environment*, vol. 427-428, pp. 126–138, 2012.
- [56] M. Choël, K. Deboudt, and P. Flament, “Development of time-resolved description of aerosol properties at the particle scale during an episode of industrial pollution plume,” *Water Air and Soil Pollution*, vol. 209, no. 1-4, pp. 93–107, 2010.
- [57] R. Ceolato, N. Rivière, B. Biscans, and L. Hespel, “Supercontinuum laser-based instrument to measure hyperspectral polarized BRDF,” in *Proc. of SPIE*, vol. 8189, no. 13, 2011.
- [58] N. Rivière and L. Hespel, “Identification of radiative parameters of dense scattering media,” in *10th International Conference on Light Scattering by Non-spherical Particles*, 2007.
- [59] I. N. Sokolik and O. B. Toon, “J. Geophys. Res.” *Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths*, vol. 108, no. 8, pp. 9423–9444, 1999.
- [60] H. Y. Li, S. M. Zhou, J. Li, Y. L. Chen, S. Y. Wang, Z. Shen, L. Y. Chen, H. Liu, and X. X. Zhang, “Analysis of the Drude Model in Metallic Films,” *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 34, pp. 6307–6311, 2001.
- [61] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell, S. E. Bell, R. R. Bell, R. W. Alexander Jr., and C. A. Ward, “Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 7, pp. 1099–1119, 1983.
- [62] D. Schlöpfer, C. Borel, J. Keller, and K. Itten, “Atmospheric pre-corrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 65, pp. 353–366, 1998.
- [63] A. Heidinger and G. Stephens, “Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part II : Application to remote sensing in the O₂ A band,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 57, pp. 1615–1634, 2000.
- [64] F. Zagolski and R. Santer, “Coupling oxygen absorption at 761.75nm with scattering based on the primary scattering approximation - Potential application for cirrus and cloud detection over ocean,” in *Proceedings of the 2004 Envisat & ERS Symposium, Salzburg*, 2004.
- [65] L. Guanter, L. Gomez-chova, and J. Moreno, “Coupled retrieval of aerosol optical thickness, columnar vapor and surface reflectances maps from ENVISAT/MERIS data over land,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 112, pp. 2898–2913, 2008.
- [66] J. Trentmann, M. Andreae, H. Graf, P. Hobbs, R. Ottmar, and T. Trautmann, “Simulation of a biomass burning plume : Comparison of model results with observations,” *J. Geophys. Res.*, vol. 107, 2002.
- [67] J. Reid, R. Koppmann, T. Eck, and D. Eleuterio, “A review of biomass burning emissions part II : intensive physical properties of biomass burning particles,” *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 4, pp. 5135–5200, 2004.
- [68] G. Stephens and A. Heidinger, “Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part I : theory,” *J. Atmos. Sci.*, vol. 57, pp. 1599–1614, 2000.

- [69] C. Sivaraman, D. Turner, and C. Flynn, “Techniques and methods used to determine the Aerosol Best Estimate Value-Added Product at SGP central facility,” in *Proceedings of the 14th ARM Science Team Meeting, Albuquerque, 2004*, 2004.
- [70] M. Wong, J. Nichol, and K. Lee, “Operational MODIS aerosol retrieval algorithm in high spatial resolution, validation, and application over complex urban regions,” *Atmospheric Research*, vol. 99, no. 3-4, pp. 579–589, 2011.
- [71] G. Anderson, G. Felde, M. Hoke, A. Ratkowski, T. Cooley, J. Chetwynd, J. Gardner, S. Adler-Golden, M. Matthew, A. Berk, L. Bernstein, P. Acharya, D. Miller, and P. Lewis, “MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm : FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes),” in *Proc. of SPIE*, vol. 4725, 2002, pp. 65–71.
- [72] S. Bojinski, D. Schlaepfer, M. Schaepman, and J. Keller, “Aerosol mapping over rugged heterogeneous terrain with imaging spectrometer data,” in *Imaging Spectrometry VIII, Proc. of the SPIE*, vol. 4816, 2002, pp. 108–119.
- [73] D. Marquardt, “An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters,” *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol. 11, pp. 431–441, 1963.
- [74] K. Stamnes, S. Tsay, W. Wiscombe, and K. Jayaweera, “Numerically Stable Algorithm for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Multiple Scattering and Emitting Layered Media,” *Appl. Opt.*, vol. 27, pp. 2502–2509, 1988.
- [75] S. Gasso and D. Hegg, “Comparison of columnar aerosol optical properties measured by the MODIS airborne simulator with in situ measurements : a case study,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 65, pp. 227–248, 1997.
- [76] E. Gimeno-Garcia, V. Andreu, and J. Rubio, “Spatial patterns of soil temperature during experimental fires,” *Geoderma*, vol. 118, pp. 17–38, 2004.
- [77] Y. Kaufman, L. Remer, R. Ottmar, D. Ward, R. Li, and K. R., “Relationship between remotely sensed fire intensity and rate emission of smoke : Scar-c experiment,” in *Biomass Burning and Global Change, Vol.2*. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1996, pp. 685–696.
- [78] P. Hobbs, J. Reid, J. Herring, J. nance, R. Weiss, and J. Ross, “Particle and trace gas measurements in the smoke from prescribed burns of forest products in the pacific northwest,” in *Biomass Burning and Global Change, Vol.2*. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1996, pp. 685–696.
- [79] J. Martins, P. Artaxo, P. Hobbs, C. Lioussse, and H. Cachier, “Particle size distribution, elemental composition, carbon measurements and optical properties of smoke from biomass burning in the pacific northwest,” in *Biomass Burning and Global Change, Vol.2*. Cambridge, Mass. : MIT Press, 1996, pp. 716–732.
- [80] D. P.E., “Fire detection in imaging spectrometer data using atmospheric carbon dioxide absorption,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 12-14, pp. 3049–3055, 2006.
- [81] T. Colin, X. Briottet, and R. Santer, “OSIS : remote sensing code for estimating aerosol optical properties in urban areas from very high spatial resolution images,” *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 28, 2011.
- [82] —, “Remote Sensing of aerosols in urban areas from very high spatial resolution images : application of the OSIS code to multispectral PELICAN airborne data,” *International Journal of Remote Sensing*, pp. 919–937, 2013.

- [83] C. Spinetti, M. F. Buongiorno, V. Lombardo, and L. Merucci, "Aerosol optical thickness of Mt. Etna volcanic plume retrieved by means of the Airborne Multispectral Imaging Spectrometer (MIVIS)," *Annals of Geophysics*, vol. 46, no. 2, pp. 439–449, 2003.
- [84] R. Richter and D. Schläpfer, "Atmospheric/topographic correction for airborne imagery," DLR Report, Wessling, Germany, Tech. Rep., 2011.
- [85] J. W. Boardman, F. A. Kruse, and R. O. Green, "Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data," in *Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop*, J. P. 95-1, Ed., vol. 1, 1995, pp. 23–26.
- [86] M. D. King and D. M. Byrne, "A method for inferring total ozone content from spectral variation of total optical depth obtained with a solar radiometer," *J. Atmos. Sci.*, vol. 33, pp. 2242–2251, 1976.
- [87] A. Fernandez-Renau, J. A. Gomez, and E. De Miguel, "The INTA AHS system," in *Proc. of SPIE*, vol. 5978, 2005, pp. 471–478.
- [88] S. Michel, M. J. Lefevre-Fonollosa, and S. Hosford, "HYPXIM - A hyperspectral satellite defined for science, security and defence users," in *Proc. Hyperspectral 2010 Workshop, Frascati, ESA*, 2010.
- [89] P. Simoneau, R. Berton, K. Caillault, G. Durand, T. Huet, L. Labarre, C. Malherbe, M. Miesch, A. Roblin, and B. Rosier, "MATISSE : Advanced Earth modeling for imaging and scene simulation," in *Proceedings of OPTRO*, 2002.
- [90] E. Vermote, D. Tanré, J.-L. Deuzé, M. Herman, and M. J.-J., "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S : an overview," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 3, pp. 675–686, 1997.
- [91] N. Scott and A. Chedin, "A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations : The Automatized Atmospheric Absorption Atlas," *J. Appl. Meteor.*, vol. 20, pp. 802–812, 1981.
- [92] C. Miesch, X. Briottet, Y. Kerr, and F. Cabot, "Radiative transfer solution for rugged and heterogeneous scene observation," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 36, pp. 6830–6846, 2000.
- [93] ———, "Monte Carlo approach for solving the radiative transfer equation over mountainous and heterogeneous areas," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 36, pp. 7419–7430, 1999.
- [94] G. Hänel, "The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air," *Advances in Geophysics*, vol. 19, pp. 73–188, 1976.
- [95] P. Chazette and C. Lioussé, "A case study of optical and chemical ground apportionment for urban aerosols in Thessaloniki," *Atm. Environ.*, vol. 35, pp. 2497–2506, 2001.
- [96] E. P. Shettle and R. W. Fenn, "Models for the aerosols of the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties," *Environmental Research Paper, AFGL-TR-79-0214*, no. 676, 1979.
- [97] O. B. Toon, J. B. Pollock, and B. N. Khare, "The optical constants of several atmospheric aerosols species : ammonium sulfate, aluminium oxide and sodium chloride," *J. Geophys. Res.*, vol. 81, pp. 5733–5748, 1976.
- [98] T. N. Carlson and S. G. Benjamin, "Radiative heating rates for saharan dust," *J. Atmos. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 193–213, 1980.

- [99] I. N. Sokolik, A. Andronova, and T. C. Johnson, “Complex refractive index of atmospheric dust aerosols,” *Atm. Environ.*, vol. 27A, pp. 2495–2502, 1993.
- [100] L. Kou, D. Labrie, and P. Chylek, “Refractive indices of water and ice in the 0.65 to 2.5 micron range,” *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 3531–3540, 1993.
- [101] G. Chen, S. Jaradat, and N. Banerjee, “Evaluation and comparison of clustering algorithms in analyzing ES. cell gene expression data,” *Statistica Sinica*, vol. 12, pp. 241–262, 2002.
- [102] T. Del Sontro, I. Leifer, B. Luyendyk, and B. Broitman, “Beach tar accumulation, transport mechanism, and sources of variability at Coal Oil Point, California,” *Marine Pollution Bulletin*, vol. 54, 2007.