



énergie atomique • énergies alternatives

# Estimation conjointe des aérosols et du CO<sub>2</sub> dans un panache par imagerie hyperspectrale



A. Deschamps<sup>1</sup>, X. Briottet<sup>2</sup>, R. Marion<sup>1</sup>, P.Y. Foucher<sup>2</sup> et C. Lavigne<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA/DAM  
<sup>2</sup> ONERA/DOTA

## Cadre de l'étude (1/2)

---



energie atomique • energies alternatives

- **Collaboration CEA/ONERA pour l'études des effluents atmosphériques par imagerie hyperspectrale**

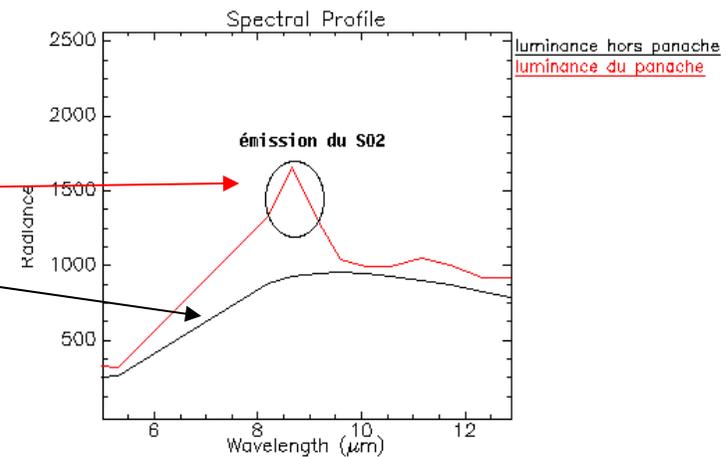
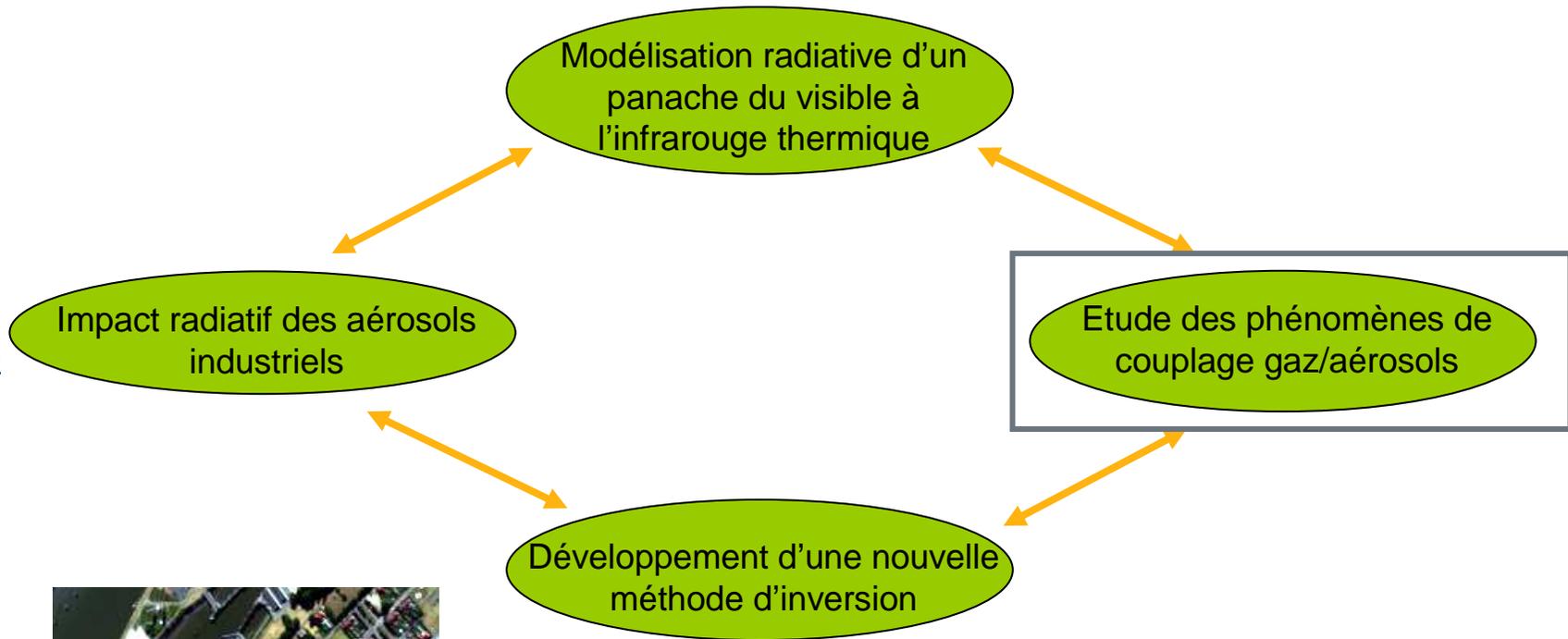
- **Thèse (oct. 2009 – sept. 2012) :**



Caractérisation de panaches industriels par imagerie hyperspectrale aéroportée du visible à l'infrarouge thermique

- **Comité :**
  - > **X. Briottet (ONERA)**
  - > **R. Marion (CEA)**
  - > **J. Chanussot (Gipsa-Lab)**
  - > **M. Mallet (OMP)**
  - > **C. Crevoisier (LMD)**

# Cadre de l'étude (2/2)



# Estimation conjointe des aérosols et du CO<sub>2</sub>

---



energie atomique • énergies alternatives

- **Introduction**

- > **Impact radiatif des constituants d'un panache**
- > **Phénomènes de couplage gaz/aérosols**
- > **Objectifs et démarche**



- **Méthodologie**

- > **Approche globale proposée**
- > **Estimation du CO<sub>2</sub>**
- > **Estimation des aérosols**

- **Application sur une image de feu de végétation**

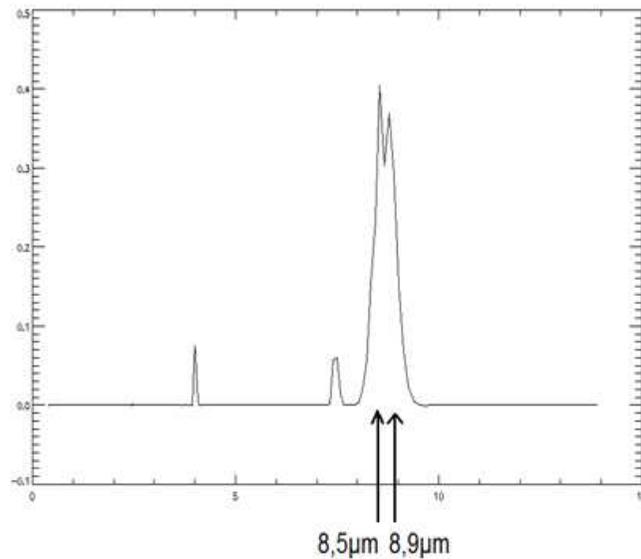
- > **Présentation des données**
- > **Résultats**

- **Bilan et Perspectives**

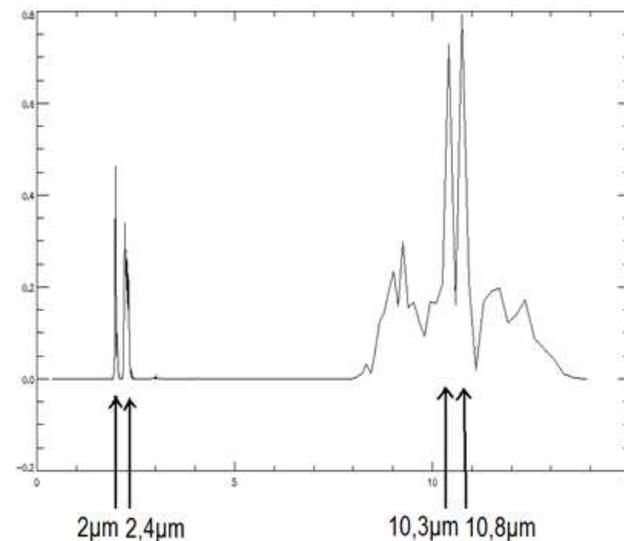
# Impact radiatif des constituants d'un panache (1/2)

- **Gaz :**

- > **Molécule sensible à des longueurs particulières (correspondant aux modes des liaisons intra-moléculaires qu'elle contient)**
- > **Pics d'absorption sur le spectre de transmission**
- > **Principalement dans l'infrarouge**



Spectre d'absorption du SO<sub>2</sub>



Spectre d'absorption du NH<sub>3</sub>

## Impact radiatif des constituants d'un panache (2/2)



energie atomique • energies alternatives

### • Aérosols :

- > Absorbent et/ou diffusent les rayonnements selon leur indice de réfraction et leur taille (théorie de Mie)
- > Epaisseur optique lentement variable avec la longueur d'onde
- > Impact radiatif fort dans les faibles longueurs d'ondes



THE FRENCH AEROSPACE LAB

Extinction :

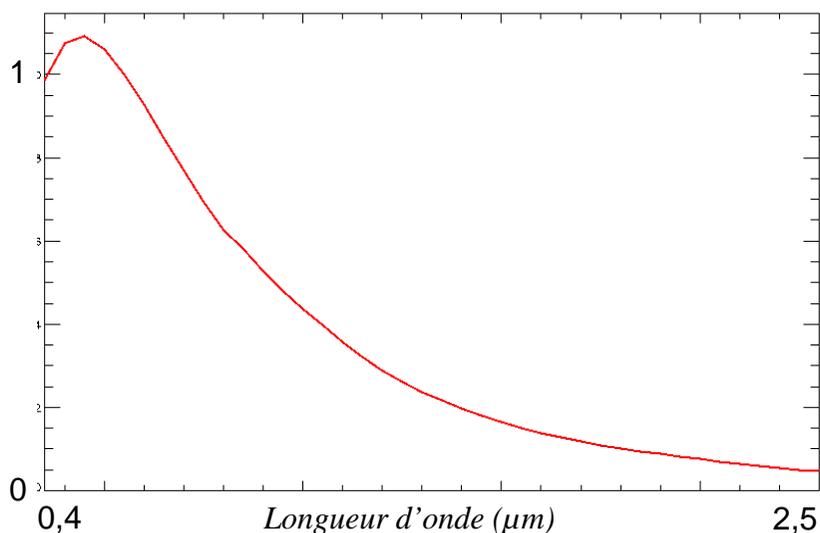
$$K_{ext} = K_{abs} + K_{dif}$$

Albédo :

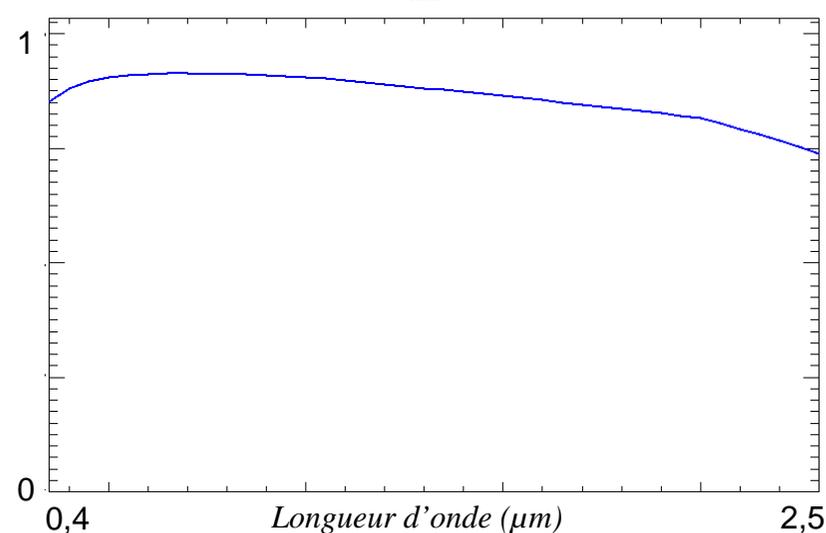
$$\omega = \frac{K_{dif}}{K_{ext}}$$

Epaisseur optique :

$$\tau = \int_{z_{min}}^{z_{max}} K_{ext}(z) dz$$



Extinction normalisée d'aérosol de feu de végétation



Albédo d'aérosol de feu de végétation

# Phénomènes de couplage

---



energie atomique • énergies alternatives



- **L'impact des aérosols peut modifier la profondeur des pics d'absorption des gaz**
- **Ce phénomène de couplage n'est pas pris en compte dans les techniques actuelles d'estimation d'abondance gazeuse**
- **Modèles standards utilisés pour représenter les aérosols : peu adaptés aux aérosols de panache**

→ **biais dans les concentrations de gaz retrouvées**

- **Objectifs :**
  - > **Quantifier ce biais**
  - > **Proposer une méthode permettant de le corriger**
  - > **Appliquer cette méthode pour estimer le CO<sub>2</sub> dans un panache de feu de végétation en utilisant la bande d'absorption à 2,0 µm**

# Méthodologie



energie atomique • énergies alternatives

- **Algorithme en 2 étapes :**

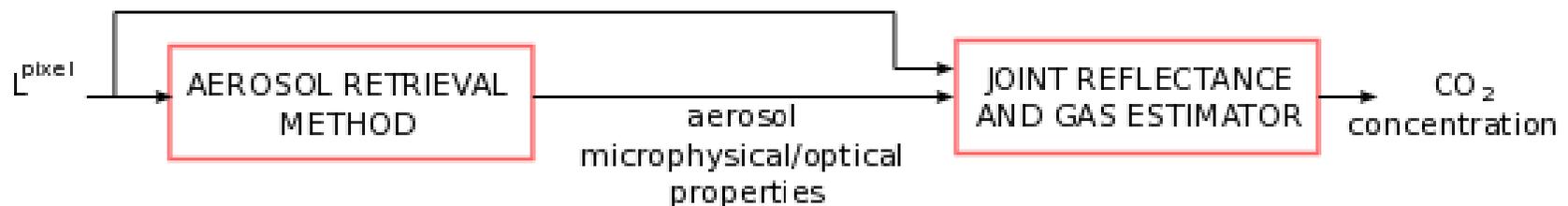
- > **Estimation des propriétés des aérosols**

- Utilisation des luminances des pixels en-dehors des bandes d'absorption gazeuses pour déterminer les propriétés microphysiques et optiques des aérosols du panache



- > **Estimation des concentration gazeuses**

- Exploitation des propriétés estimées des aérosols pour simuler leur impact radiatif dans la bande d'absorption du gaz
    - Utilisation de la luminance des pixels dans la bande d'absorption pour déterminer la concentration en gaz



# Estimation des aérosols (1/2)

---



- **Modèle optique d'un mélange d'aérosols de feu de végétation**
  - > **Sphères constituées d'un noyau de carbone et d'une enveloppe de matières organiques (mélange interne)**
  - > **Distribution en taille : loi lognormale monomodale**
  - > **Indice de réfraction : Maxwell-Garnett**



- **Constitution de 3 LUTs interconnectées**
  - > **LUT microphysique  $\{r_m, \sigma_m, N, f_{BC}\}$** 
    - ↕ *Théorie de Mie*
  - > **LUT optique  $\{\omega(\lambda), \tau(\lambda), g(\lambda)\}$** 
    - ↕ *Code de transfert radiatif*
  - > **LUT atmosphérique  $\{L_{atm}, T_{atm}, S_{atm}\}$**

## Estimation des aérosols (2/2)

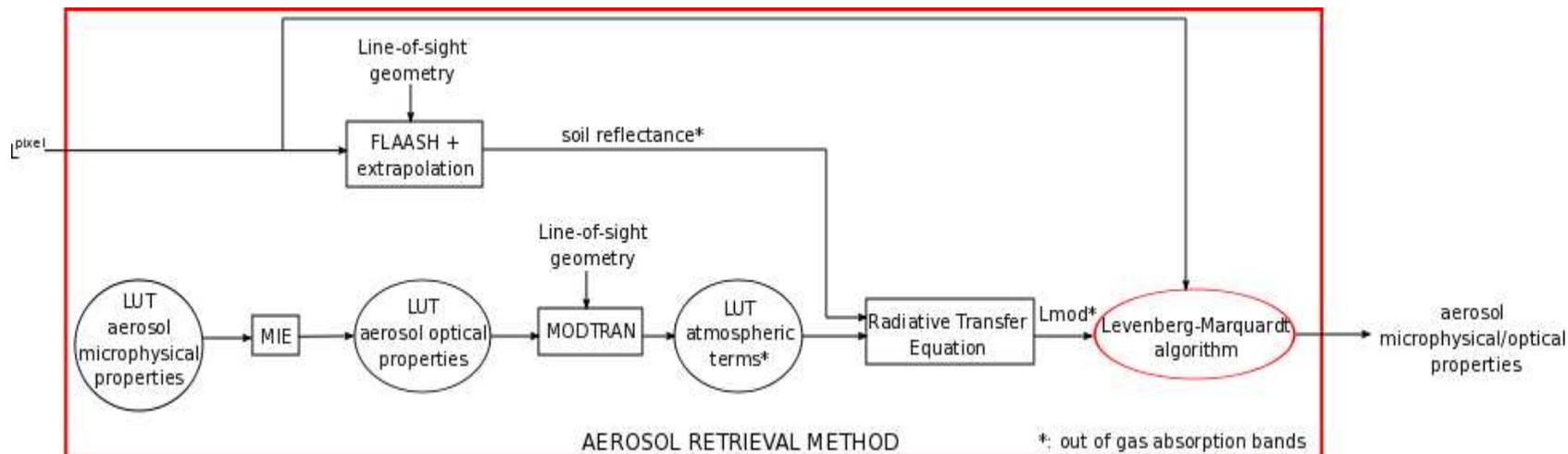
- **Inversion (inspirée de L-APOM)**

- > **Estimation du sol sous le panache :  $\rho_{\text{sol}}$  (FLAASH)**

- > **Calcul de  $L_{\text{mod}}$  à partir de  $\{L_{\text{atm}}, T_{\text{atm}}, S_{\text{atm}}\}$ ,  $\rho_{\text{sol}}$  et des conditions d'acquisition**

$$L_{\text{mod}}(\lambda) = L_{\text{atm}}(\lambda) + \frac{\cos \Theta_s \cdot E_s(\lambda)}{\pi} \frac{T_{\text{atm}}(\lambda) \rho_{\text{sol}}(\lambda)}{1 - S_{\text{atm}}(\lambda) \rho_{\text{sol}}(\lambda)} \quad E.T.R.$$

- > **Estimation, pour chaque pixel, du meilleur jeu de paramètres  $\{L_{\text{atm}}, T_{\text{atm}}, S_{\text{atm}}\}$  par l'algorithme de Levenberg-Marquardt**



# Estimation de la concentration en CO<sub>2</sub> (1/2)

---



energie atomique • énergies alternatives

- **Principe du JRGE : Joint Reflectance and Gas Estimator**

- > **Retrouve les concentrations en gaz et estime la réflectance du sol**

- *intéressant pour les panaches peu denses*

- > **Création d'une LUT de termes atmosphériques pour différentes concentrations de CO<sub>2</sub>**

- > **Estimation de la réflectance du sol d'après l'E.T.R. (pour une concentration en CO<sub>2</sub> donnée)**

- *une sous-estimation de la concentration en CO<sub>2</sub> entraîne une sous-estimation de la réflectance dans la bande d'absorption*

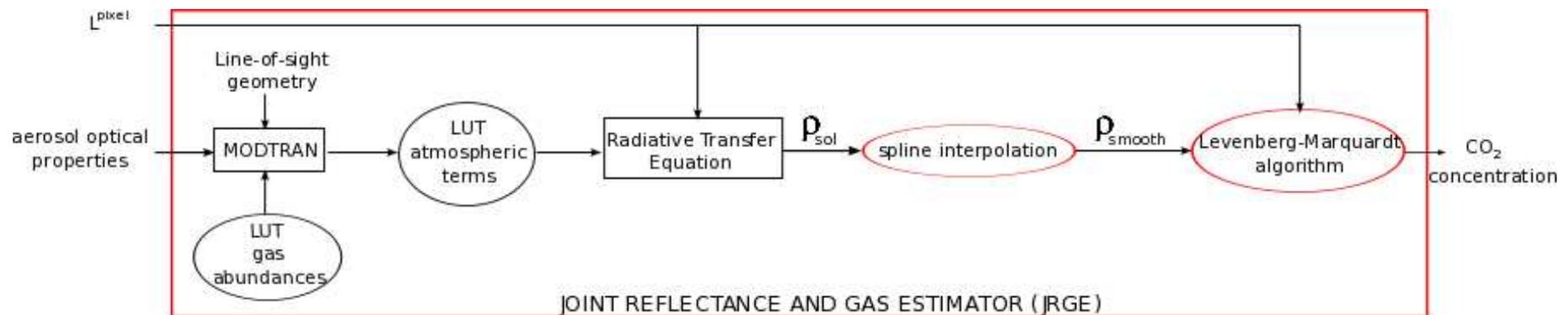


# Estimation de la concentration en CO<sub>2</sub> (2/2)

- **Inversion**

- > **Interpolation (spline) de la réflectance dans la bande d'absorption en s'appuyant sur des canaux « de référence »**

- > **Estimation, pour chaque pixel, du meilleur jeu de paramètres  $\{L_{atm}, T_{atm}, S_{atm}\}$  par l'algorithme de Levenberg-Marquardt**



# Application sur une image de feu de végétation

---



energie atomique • energies alternatives

- **Présentation des données**

- > **Capteur aéroporté AVIRIS**

- 224 bandes spectrales de 0,4 à 2,5 $\mu$ m
    - 10nm de résolution spectrale
    - 20m de résolution spatiale pour un vol à 20km d'altitude



THE FRENCH AEROSPACE LAB

- > **Image du feu de Quinault**



- Acquis le 21 septembre 1994 (campagne Scar-C) en Californie
    - Mesures de CO<sub>2</sub> *in situ*
    - Mesures Lidar
      - altitude du panache et épaisseur optique
    - Prélèvements d'échantillons d'aérosols
      - granulométrie et composition

# Application sur une image de feu de végétation (1/4)



energie atomique • energies alternatives

- **Première estimation du CO<sub>2</sub>**

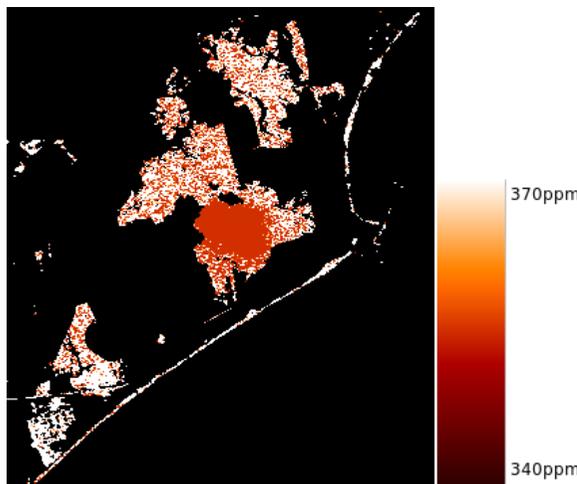
- > **Création d'une LUT atmosphérique**

- Colonne de CO<sub>2</sub> : entre 200 et 400 ppm
    - Aérosol : modèle standard (rural)

- > **Inversion de la concentration en CO<sub>2</sub>**

- Masque des pixels pour lesquels  $\rho_{sol}(2,0\mu m) > 0.1$
    - Estimation de la teneur en CO<sub>2</sub> pour les pixels du masque

- > **Résultat**



- Estimations cohérentes avec les mesures terrain pour les pixels hors panache
    - Sous-estimation de la teneur en CO<sub>2</sub> pour les pixels sous le panache ou proches du foyer (environ 5,35%)



THE FRENCH AEROSPACE LAB

# Application sur une image de feu de végétation (2/4)



energie atomique • energies alternatives



THE FRENCH AEROSPACE LAB

## • Estimation des aérosols

### > Création des 3 LUTs

- Domaines de variations :

	Intervalle de variation	Pas
$f_{BC}$ (%)	0 - 12	1
$r_m$ ( $\mu\text{m}$ )	0,03 - 0,25	0,01
$\sigma_m$	1,3 - 2	0,1
$\tau(550\text{nm})$	0 - 5	0,5

- Concentration en  $\text{CO}_2$  : 345ppm (mesures *in situ*)

### > Estimation du sol sous le panache



- Bonne reconstruction de la réflectance sauf pour les pixels d'eau (réflectance nulle dans l'IR) ou proches du foyer (impact thermique)
- Pas de problème pour l'inversion

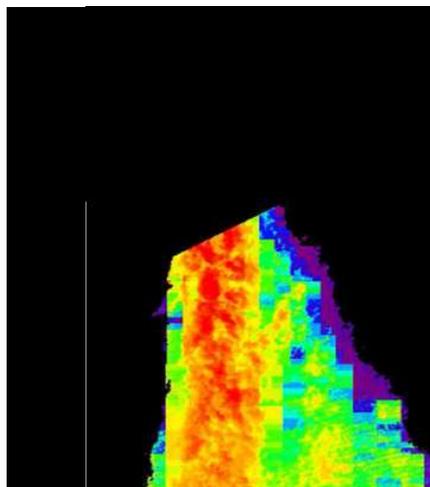
# Application sur une image de feu de végétation (3/4)

## • Estimation des aérosols

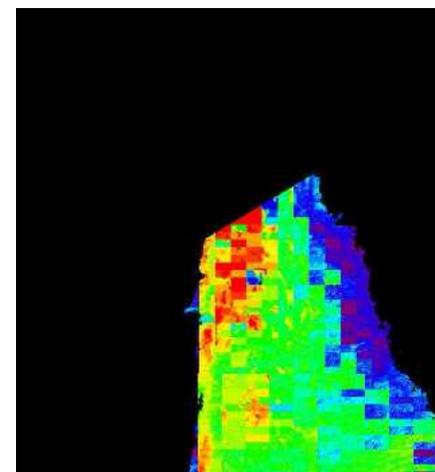
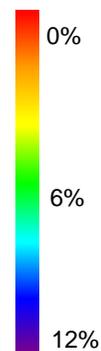
### > Résultats



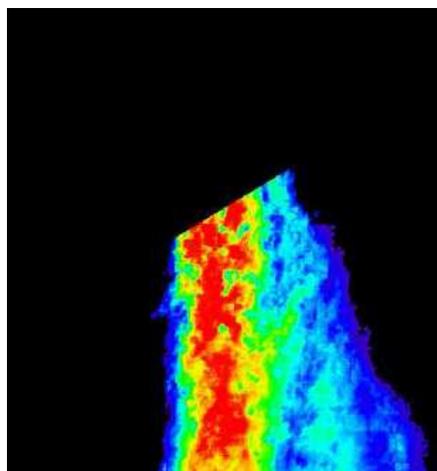
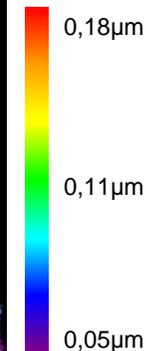
Image AVIRIS



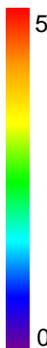
Teneur en suie



Rayon modal



Épaisseur optique à 550nm



- Épaisseur optique : cohérence avec les données lidar pour  $\tau > 0,2$  (au-delà, lidar peu fiable)
- Teneur en suie : mesure *in situ* =  $8 \pm 2\%$   
estimation : entre 1 et 6%
- Rayon modal : mesure *un situ* :  $0,09\mu\text{m}$   
estimation : entre  $0,09$  et  $0,14\mu\text{m}$

# Application sur une image de feu de végétation (4/4)

---



energie atomique • énergies alternatives

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

- **Seconde estimation du CO<sub>2</sub>**

- > **Démarche**

- Les propriétés estimées des aérosols du panache sont utilisées pour générer les termes atmosphériques
    - La même méthode JRGE (estimation de la réflectance puis interpolation spline) est utilisée pour obtenir une nouvelle carte de concentration en CO<sub>2</sub>

- > **Résultat**

- Les concentrations estimées pour les pixels du panache sont désormais cohérentes avec les mesures *in situ*
    - Une erreur d'estimation importante subsiste pour les pixels proches du foyer (impact thermique non pris en compte)

Pour les pixels du panache, le biais induit par la mauvaise connaissance des aérosols dans l'estimation du CO<sub>2</sub> a été corrigé !

# Conclusion

---



- **Bilan**

- > **Dans le cas de l'étude d'un panache, il est nécessaire de connaître l'impact radiatif des aérosols avant d'estimer une concentration en gaz (surtout dans le proche IR)**
- > **Approche proposée : consiste à coupler une méthode d'estimation des aérosols (~L-APOM) avec une méthode d'estimation d'abondance gazeuse (JRGE)**
- > **Validation grâce à des données terrain**

- **Perspectives**

- > **Appliquer cette méthode à des panaches industriels :**
  - Manque de données
  - Modélisation plus difficile des aérosols
  - Panaches moins denses optiquement
- > **Prendre en compte l'impact thermique**
  - Exploitation de bandes du LWIR (8-12 $\mu$ m)