

Détection de polluants atmosphériques par imagerie hyperspectrale infrarouge : étude du cas de polluants gazeux en zone industrielle à haute résolution spatiale

Ramzi IDOUGHI, Pierre-Yves FOUCHER, Laurent POUTIER, Véronique ACHARD, Xavier BRIOTTET



retour sur innovation

- Contexte de l'étude
- Détection des gaz et aérosols (état de l'art)
- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**
- Validation des outils de simulations
- **Construction d'une scène 3D polluée**
- Conclusion

### Contexte de l'étude

Détection des gaz et aérosols (état de l'art)

- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**
- Validation des outils de simulations
- **Construction d'une scène 3D polluée**
- Conclusion

Thèse (nov. 2011 – oct. 2012) : Caractérisation des polluants atmosphériques par imagerie hyperspectrale aéroportée à haute résolution spatiale.
Encadrée par : Pierre-Yves FOUCHER
Dirigée par : Xavier BRIOTTET

Projet SEPIA : Couplage de l'imagerie hyperspectrale avec des mesures Lidar pour la caractérisation de polluants atmosphériques d'origines industrielle et anthropique.

### Contexte de l'étude

Détection des gaz et aérosols (état de l'art) Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar Validation des outils de simulations Construction d'une scène 3D polluée Conclusion



# Principe de détection des gaz et aérosols par imagerie hyperspectrale



## Détection des gaz et aérosols

### Gaz

- Détection : domaine IR
- Majorité des gaz détectables : (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, COV,...)
- ➢ Quantité détectable : T<sub>nuage</sub>, ∫pdz

# **Aérosols**

- Détection : Visible + proche IR
- Connaissances à priori sur les propriétés optiques des aérosols nécessaires.
- Quantité détectable : propriétés optiques de quelques familles d'aérosols



- Description 3D du panache
- Inversion multi-gaz
- Evolution spatio-temporelle du panache
- Estimation des flux massiques

### **Contexte de l'étude**

- Détection des gaz et aérosols (état de l'art)
- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**
- Validation des outils de simulations
- **Construction d'une scène 3D polluée**
- Conclusion

# **Couplage Hyperspectral-LIDAR**

## Imagerie hyperspectrale

## Lidar multi-λ

THE FRENCH AEROSPACE LAB



## **Outils de simulation et de Validation**

#### **Données sols** :

Base de données ONERA (émissivités pour différents matériaux avec une haute résolution)

Gaz : PNNL/GEISA/HITRAN

#### Aérosols :

Base de données OPAC / mesures LIDAR (estimation d'indice de réfraction) / compagnes de mesures sur des sites industriels (Flamant et al., données ESCOMPTE)

#### **Code de transfert radiatif** :

MATISSE (ONERA) / 4A / MODTRAN

#### Validation sur des images hyperspectrales aéroportées :

- Images existantes : (Telops, SPIM,...)
- Compagne de mesures SEPIA : ONERA (Lidar + hyperspectrale), mesures in-situ (vérité de terrain)

### Contexte de l'étude

- Détection des gaz et aérosols (état de l'art)
- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**

### Validation des outils de simulations

- **Construction d'une scène 3D polluée**
- Conclusion



## **Comparaison MODTRAN / 4A**

Comparaison réalisée sur des profils identiques pour les deux codes :

- Même découpage en couches atmosphériques,
- Mêmes profils de T, P, concentrations.

#### **Données des simulations :**

Bandes spectrales : MWIR (3.2-5µm) et LWIR (8-12.5µm) Altitude Capteur = 3 km émissivité du sol = 0.98 (mer) T(sol) = 295K, P(sol) = 1013.15 mB,  $\rho_{H2O}$  (sol) = 10000 ppmv expansion nuage de gaz = 100m-200m

#### **Profils simulations :**

**REF** : gaz atmosphériques (H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) (MWIR + LWIR) **CH<sub>4</sub> et NO<sub>2</sub>** : Profil REF + Nuage CH<sub>4</sub>/NO<sub>2</sub> (10 ppmv,  $\Delta T = 5K$ ) (MWIR) **NH<sub>3</sub> et SO<sub>2</sub>** : Profil REF + Nuage NH<sub>3</sub>/SO<sub>2</sub> (10 ppmv,  $\Delta T = 5K$ ) (LWIR)

# Différence de « fond » entre MODTRAN et 4A

#### **MWIR**





#### Sources des erreurs

- Différence des interpolations utilisées pour le calcul des concentrations de gaz,
- Différence des méthodes de calcul radiatif : dépendance en température, modèle de bandes, base de données,
- Modélisation du flux solaire en MWIR.

13

## **Comparaison MODTRAN/4A**

### **Différence des signatures : CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> (MWIR - nuit)**

#### Signatures CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>

#### Ecart des signatures CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> entre MODTRAN et 4A



Différence MODTRAN/4A : 0.073K (CH<sub>4</sub>) et 0.061K (NO<sub>2</sub>)



## **Comparaison MODTRAN/4A**

### **Différence des signatures : CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> (MWIR - jour)**

#### Signatures CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>

#### Ecart des signatures CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> entre MODTRAN et 4A



Différence MODTRAN/4A : 0.18K (CH<sub>4</sub>) et 0.1K (NO<sub>2</sub>)



## **Comparaison MODTRAN/4A**

### Différence des signatures : NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> (LWIR)

#### Signatures NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>

#### Ecart des signatures NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> entre MODTRAN et 4A



Différence MODTRAN/4A : 0.24K (NH<sub>3</sub>) et 0.09K (SO<sub>2</sub>)



### Contexte de l'étude

- Détection des gaz et aérosols (état de l'art)
- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**
- Validation des outils de simulations

### **Construction d'une scène 3D polluée**

Conclusion



## **Création d'une scène 3D polluée**



THE FRENCH AEROSPACE LAB

### **Modélisation ciel clair**





## **Modélisation ciel clair**

Comparaison entre une simulation directe (MODTRAN) et recombinaison des différents termes radiatifs calculés séparément



Différences inférieures au bruit instrumental (0.05K)







#### Calcul des transmittances











#### Modélisation de la transmittance d'un panache

#### La transmittance d'un panache dépend de :

- La composition du panache (type de gaz présents)
- La concentration des différents gaz présents
- L'épaisseur du panache

Elle s'exprime ainsi :

$$\begin{aligned} \tau(\lambda) &= \exp(-\alpha(\lambda) \cdot \rho \cdot \Delta l) \\ \tau(\lambda) &= \exp(-\sqrt{\alpha(\lambda)} \cdot \rho \cdot \Delta l) \end{aligned}$$

 $\begin{array}{ll} \mathrm{si} & \alpha(\lambda) \cdot \rho \cdot \Delta l \leq seuil \\ \mathrm{sinon} \end{array}$ 

- Avec :  $\alpha$  : l'absorbance (ppmv<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>)
  - $\rho$  : la concentration (ppmv)
  - ΔI : épaisseur du panache (m)

#### Intérêt de cette approche

Introduction des sections efficaces provenant des mesures en laboratoire (PNNL)

→ Simulation d'une centaine d'espèce.

#### Calcul des Luminances montantes





#### Calcul de l'éclairement descendant



Intérêt de ce calcul

Possibilité de modéliser un panache fini et hétérogène.



Comparaison entre une simulation directe (MODTRAN) et recombinaison des différents termes radiatifs calculés séparément



Différence en température de brillance pour la signature du gaz : 0.08K

# **Modélisation du panache**



#### Hypothèses sur le panache

- Modèle de dispersion gaussien (concentration + T)
- Simulations stationnaire sur une heure
- **Conditions météo** : vent à 2m/s de nord (angle 0), hauteur de couche limite = 1000m
- La source est à 20 m de hauteur , pour 3 m de diamètre,
- Vitesse d'éjection : 10m/s, la température des gaz de sortie est de 100°C
- Expansion verticale : 460m



# Résultats de la scène polluée

#### Visualisation des spectres en température de brillance



Données du panache : Débit = 30kg.s<sup>-1</sup>  $\Delta T_{max} = 100$ K

Spectres de plusieurs pixels de l'image



# Résultats de la scène polluée

### Application d'un filtre SAM (Spectral Angle Mapping)

**Données du panache :**  $Débit = 0.6 \text{ kg.s}^{-1}$  $\Delta T_{max} = 50 K$ 119 ppmv.m **Données du panache :**  $Débit = 30 kg.s^{-1}$  $\Delta T_{max} = 100 K$ 

→ La structure du sol impacte beaucoup le résultat du SAM

ppmv.m

594



### Contexte de l'étude

- Détection des gaz et aérosols (état de l'art)
- **Principe du Couplage Hyperspectral / Lidar**
- Validation des outils de simulations
- **Construction d'une scène 3D polluée**

### Conclusion

# Conclusion

#### Perspectives

- Génération de scènes polluées avec présence de plusieurs gaz.
- Introduction des aérosols.
- Développement d'outils d'inversion.
- Couplage Lidar
- Validation



# Merci pour votre attention...



