

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

DGA

ONERA

THE FRENCH AEROSPACE LAB

Détection et identification par filtrage adapté de panaches d'aérosols industriels en imagerie hyperspectrale

4^{ème} colloque SFPT - GH
Grenoble - 11 au 13 mai 2016



Yannick Philippets
CEA/DGA

Pierre-Yves Foucher
ONERA

Rodolphe Marion
CEA

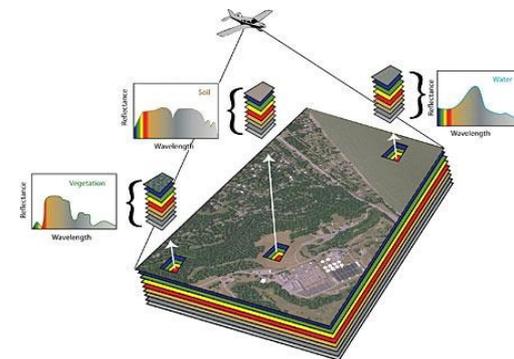
Xavier Briottet
ONERA

Intérêts d'étudier les aérosols :

- Scientifique (impact radiatif sur le climat, pollution de l'air, ...)
- Sécurité & Défense (quantification de rejets atmosphériques, identification d'activités industrielles, ...)

Imagerie hyperspectrale adaptée aux besoins :

- Résolution spatiale (métrique ou décimétrique)
- Domaine 0,4 – 2,5 μm et résolution spectrale de 10 nm (impact prépondérant des aérosols avant 1 μm)
- Nécessité d'un rapport signal sur bruit (SNR) suffisant pour différencier des particules aux propriétés optiques proches



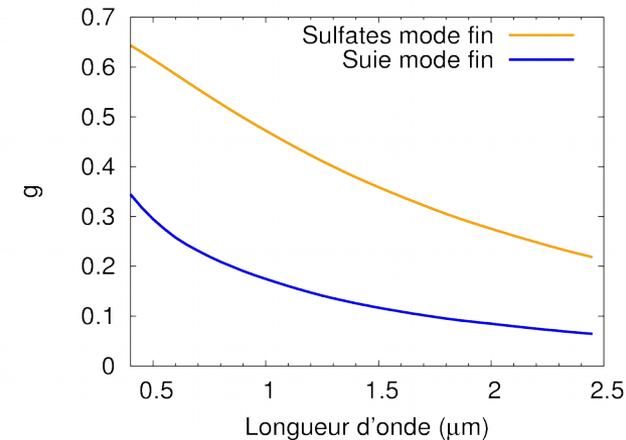
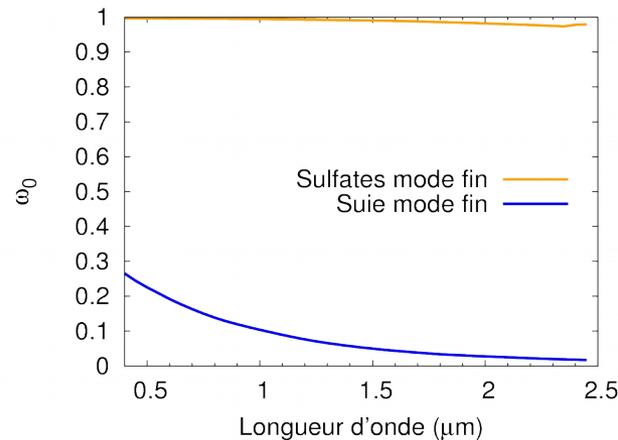
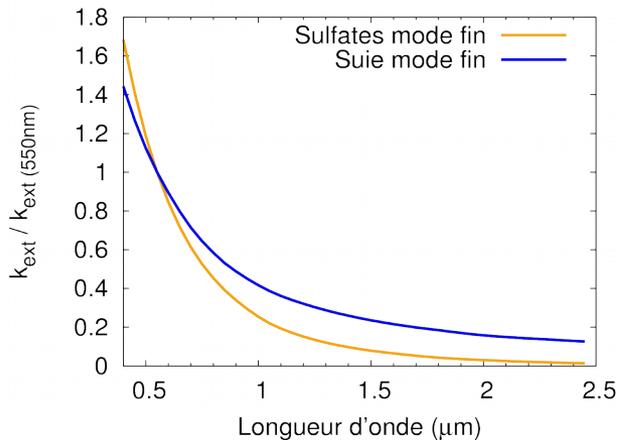
Objectif de l'étude :

- Développer une méthode permettant de détecter et d'identifier des aérosols industriels par imagerie hyperspectrale



Adapter le filtre CTMF aux aérosols

- Variations lentes des spectres en fonction de la longueur d'onde
- Impact radiatif prépondérant dans le visible et proche infrarouge 0,4 – 1,0 μm
- Impact en absorption et en diffusion



Propriétés optiques des aérosols (de g. à dr. : extinction normalisée, albédo et asymétrie) pour deux types de particules (sue mode fin et sulfates mode fin) entre 0,4 et 2,5 μm (à $\tau^{550}=0,25$)

Spécificités des aérosols industriels :

- Natures très diverses, propriétés peu ou mal connues
- Faibles épaisseurs optiques attendues (inférieures à 0,5)
- Modifications rapides de ces propriétés (interactions avec l'atmosphère, réactions chimiques, durée de vie, ...)

Nécessité de déterminer des familles représentatives des principaux aérosols de panaches (proches de la source)

- **Suie (*black carbon*)** : combustion de charbon ou de composés avec une forte concentration de graphite (production d'énergie)
- **Brown carbon** : composés carbonés organiques colorés à forte réfraction, issus de la combustion de matière organique (production d'énergie)
- **Carbone organique** : composés carbonés organiques non réfractants, issus de la combustion de biomasse verte (chauffage, production d'énergie)
- **Sulfates** : soit d'origine primaire, lors de combustion de charbon chargé en soufre, soit d'origine secondaire, après réaction de gaz (type SO_2) et de composés atmosphériques produits de combustibles fossiles (chauffage, raffineries)
- **Métaux** : poussières métalliques de composition très variable (industrie métallurgique)
- **Eau (gouttelettes)** : aéroréfrigérants (sous des conditions atmosphériques permettant la condensation de la vapeur d'eau)

Suie, Centrale à mazout de Fawley, Hampshire (GBR)



Sulfates, raffinerie Sunco Energy, Edmonton (CAN)



Aéroréfrigérants, centrale nucléaire de Tricastin (FRA)



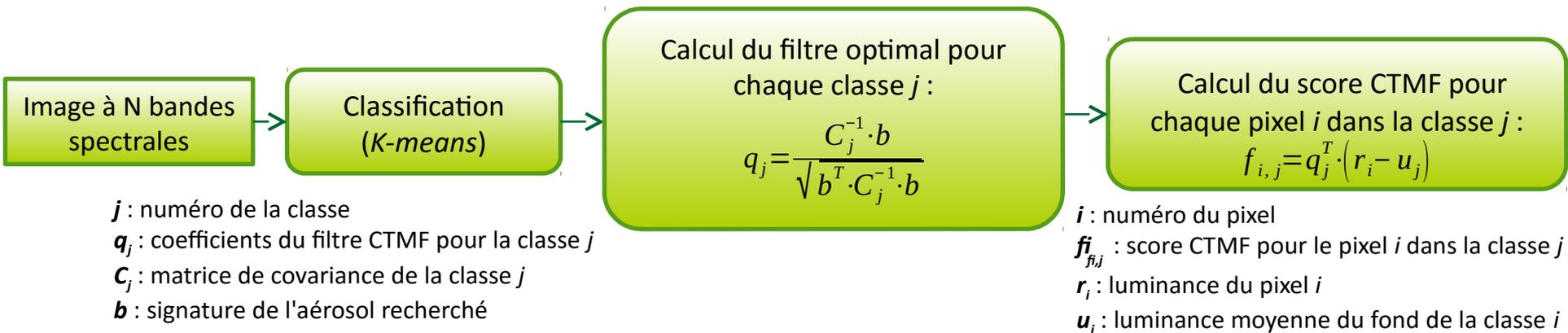
Modèle de luminance

$$r = u + \alpha b + \varepsilon$$

r : luminance modélisée comme une combinaison linéaire du fond et de l'aérosol recherché

u : luminance moyenne du fond
 α : quantité de l'aérosol recherché
 b : signature de l'aérosol recherché
 ε : bruit capteur et « clutter » de la scène

[Funk et al. 2001]



- Méthode déjà utilisée avec succès sur des gaz industriels tels que CO_2 , CH_4 et N_2O
 [Dennison et al. 2013 ; Thorpe et al. 2013 ; Thorpe et al. 2012]

Équation du transfert radiatif

■ Cas d'une atmosphère standard, dans le domaine réfléchitif 0,4 – 2,5 μm :

- Un premier terme exprimant la diffusion du rayonnement dans l'atmosphère
- Un second terme exprimant la réflexion du rayonnement par le sol et sa traversée de l'atmosphère

$$L_{\text{capteur}}(\lambda) = L_{\text{atm}}(\lambda) + \frac{E_{\text{sol}}(\lambda)}{\pi} \cdot \rho_{\text{sol}}(\lambda) \cdot T_{\text{atm}}(\lambda)$$

■ En présence d'un panache d'aérosols :

- Tous les termes radiatifs (composantes directes et diffuses) sont affectés par l'aérosol, en absorption et en diffusion

$$L_{\text{capteur}}^{\text{aéro}}(\lambda) = L_{\text{atm}}^{\text{aéro}}(\lambda) + \frac{E_{\text{dir}}^{\text{aéro}}(\lambda) + E_{\text{dif}}^{\text{aéro}}(\lambda)}{\pi} \cdot \rho_{\text{sol}}(\lambda) \cdot (T_{\text{dir}}^{\text{aéro}}(\lambda) + T_{\text{dif}}^{\text{aéro}}(\lambda))$$

- Pas de modélisation analytique possible pour les termes diffus

Construction de la signature d'une famille d'aérosols pour le filtre CTMF

- Différentiel de luminance entre les cas avec et sans panache d'aérosol :

$$\Delta L(\lambda) = L_{\text{capteur}}^{\text{aéro}}(\lambda) - L_{\text{capteur}}(\lambda)$$

- Modélisation du différentiel de luminance en fonction des différentiels de chaque terme radiatif et de l'épaisseur optique à 550 nm du panache τ^{550} par rapport à une référence (suivant l'atmosphère de référence et le type de sol) :

$$\Delta L(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{\text{ref}}^{550}} \cdot \left[\Delta L_{\text{atm}}(\tau_{\text{ref}}^{550}) + \frac{\rho_{\text{sol}}}{\pi} \cdot \left(\Delta E_{\text{sol}}(\tau_{\text{ref}}^{550}) \cdot T_{\text{atm}} + E_{\text{sol}} \cdot \Delta T_{\text{atm}}(\tau_{\text{ref}}^{550}) \right) \right]$$

Les termes radiatifs dépendent tous de la longueur d'onde, λ n'apparaît pas pour alléger les notations ici

α

b

Modèle de luminance

$$r = u + \alpha b + \varepsilon$$

Reconstruction possible de la signature b à partir d'une base de données de triplets $\{\Delta L_{\text{atm}} ; \Delta E_{\text{sol}} ; \Delta t_{\text{atm}}\}$ valables pour chaque famille d'aérosols dans une atmosphère donnée et à une épaisseur optique à 550 nm de référence τ_{ref}^{550} .

$$\Delta L(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{ref}^{550}} \cdot \left[\Delta L_{atm}(\tau_{ref}^{550}) + \frac{\rho_{sol}}{\pi} \cdot \left(\Delta E_{sol}(\tau_{ref}^{550}) \cdot T_{atm} + E_{sol} \cdot \Delta T_{atm}(\tau_{ref}^{550}) \right) \right]$$

Hypothèse 1 : linéarité des termes radiatifs en présence d'un panache de faible épaisseur optique ($\tau^{550} \ll 1$)

$$L_{atm}^{aéro} = L_{atm} + \Delta L_{atm}$$

$$E_{sol}^{aéro} = E_{sol} + \Delta E_{sol}$$

$$T_{atm}^{aéro} = T_{atm} + \Delta T_{atm}$$

Hypothèse 2 : erreur sur la modélisation de la luminance (signature **b**), en négligeant un terme d'ordre 2

$$\frac{\rho_{sol}}{\pi} \cdot \Delta E_{sol} \cdot \Delta T_{atm} \ll \Delta L$$

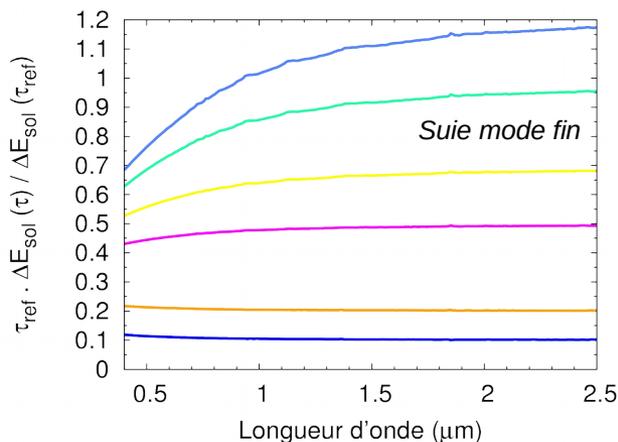
Le terme $\Delta E_{sol} \cdot \Delta T_{atm}$ compte pour moins de 5% de la contribution totale à ΔL .

$$\Delta L(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{ref}^{550}} \cdot \left[\Delta L_{atm}(\tau_{ref}^{550}) + \frac{\rho_{sol}}{\pi} \cdot \left(\Delta E_{sol}(\tau_{ref}^{550}) \cdot T_{atm} + E_{sol} \cdot \Delta T_{atm}(\tau_{ref}^{550}) \right) \right]$$

Hypothèse 3 : linéarité en épaisseur optique des différentiels des termes radiatifs sur un voisinage de τ_{ref}^{550}

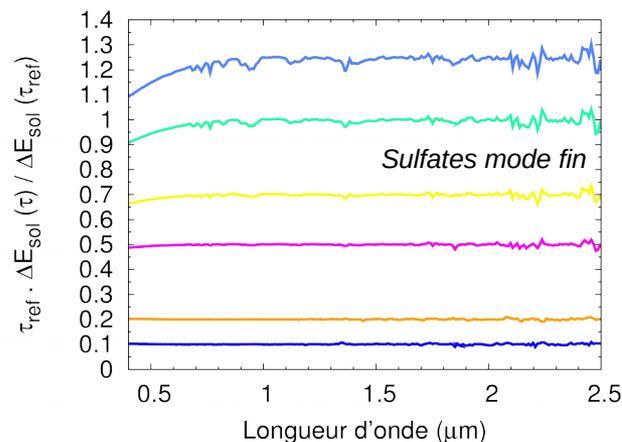
$$\Delta L_{atm}(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{ref}^{550}} \cdot \Delta L_{atm}(\tau_{ref}^{550}) \quad \Delta E_{sol}(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{ref}^{550}} \cdot \Delta E_{sol}(\tau_{ref}^{550}) \quad \Delta T_{atm}(\tau^{550}) = \frac{\tau^{550}}{\tau_{ref}^{550}} \cdot \Delta T_{atm}(\tau_{ref}^{550})$$

Épaisseur optique estimée par le modèle pour ΔE_{sol}



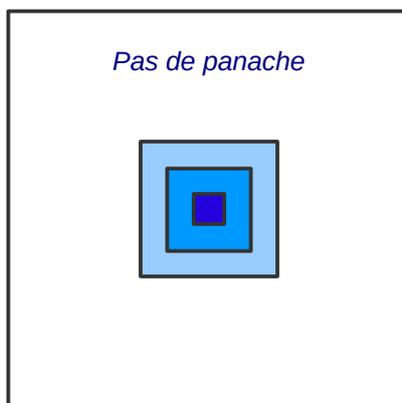
$\tau_{ref}^{550} = 0,3$

- $\tau^{550} = 1,25$ —
- $\tau^{550} = 1,0$ —
- $\tau^{550} = 0,7$ —
- $\tau^{550} = 0,5$ —
- $\tau^{550} = 0,2$ —
- $\tau^{550} = 0,1$ —



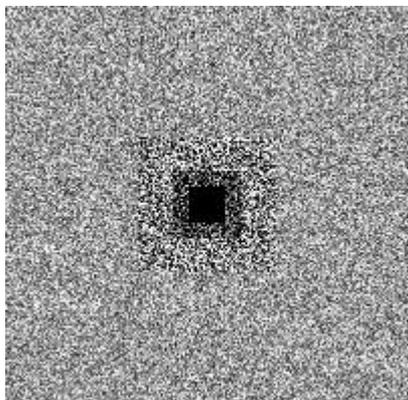
Modélisation correcte pour des épaisseurs optiques inférieures à 0,5

- Évaluation des performances par 3 niveaux de concentration

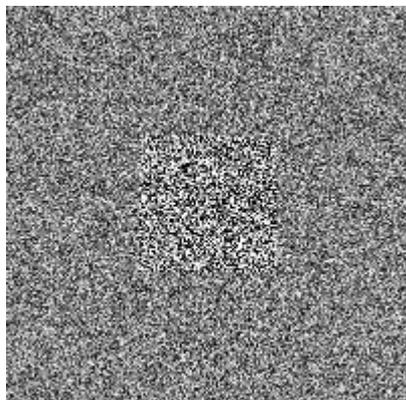


- Création d'images de synthèse avec panache carré au centre sur 3 niveaux de concentration

Classe de sol « $\rho=0,5$ » à 550 nm

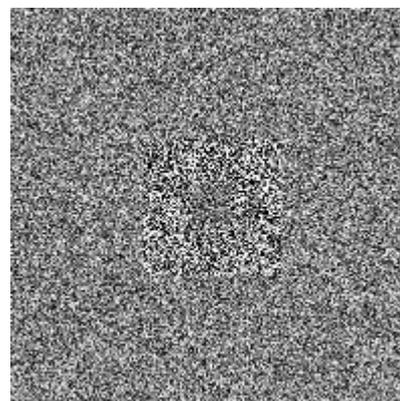


Suie fine

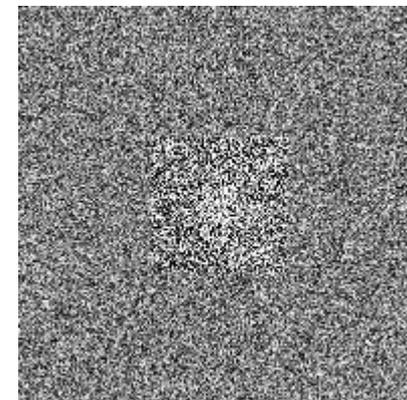


Sulfates fins

Classe de sol « eau » à 550 nm



Suie fine



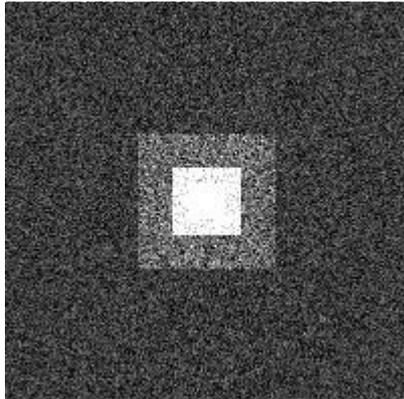
Sulfates fins

- Calcul de la matrice de variance-covariance de chaque classe de l'image $\Rightarrow \mathbf{C}_j$
- Calcul de la signature spectrale de chaque famille d'aérosols par lecture de la base de données (ΔL_{atm} , ΔE_{sol} et ΔT_{atm})
+ estimation de L_{atm} , E_{sol} , T_{atm} et ρ_{sol} $\Rightarrow \mathbf{b}$
- Création du filtre de détection correspondant à chaque famille $\Rightarrow \mathbf{q}_j$
- Application du filtre CTMF sur l'image

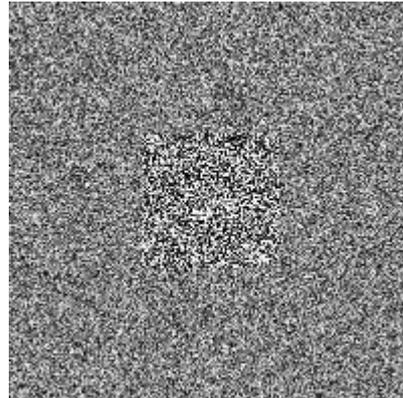
Calcul du filtre optimal pour chaque classe j :

$$q_j = \frac{C_j^{-1} \cdot b}{\sqrt{b^T \cdot C_j^{-1} \cdot b}}$$

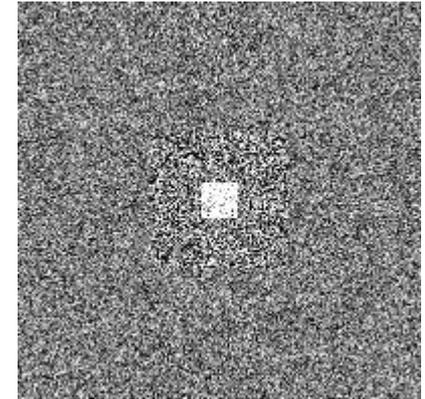
Détection CTMF sur un panache de suie fine sur un sol de classe « $\rho=0,5$ »



CTMF suie fine

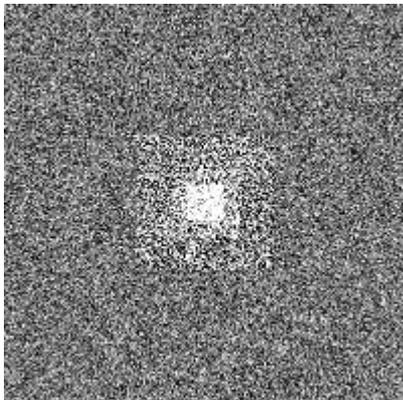


CTMF suie grossière

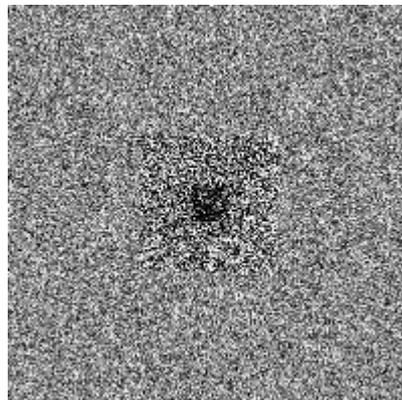


CTMF sulfates fins

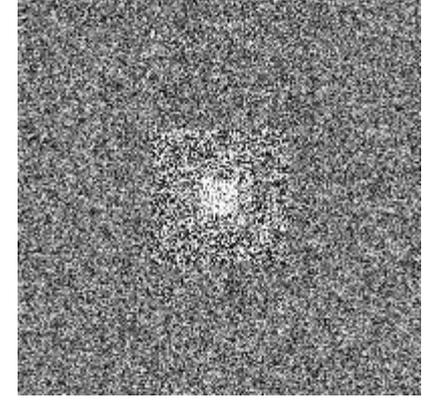
Détection CTMF sur un panache de sulfates fins sur un sol de classe « eau »



CTMF sulfates fins

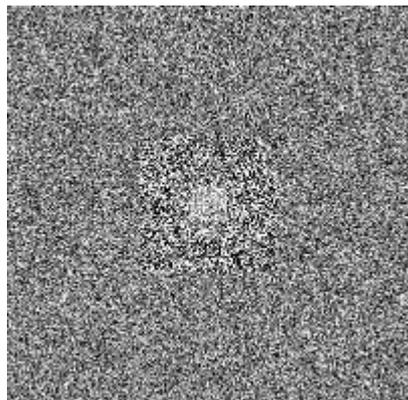


CTMF sulfates grossiers

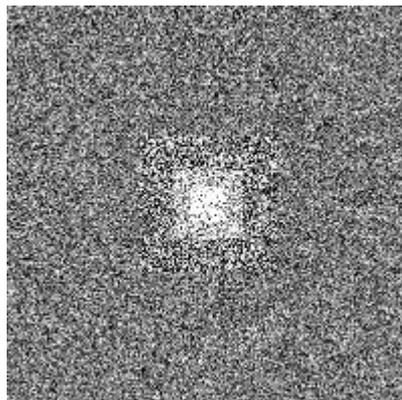


CTMF *brown carbon* fin

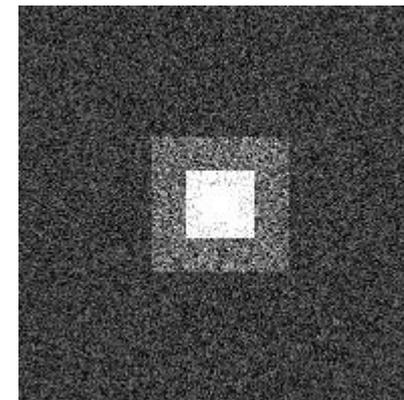
Détection de suie fine par CTMF



Surface « eau »

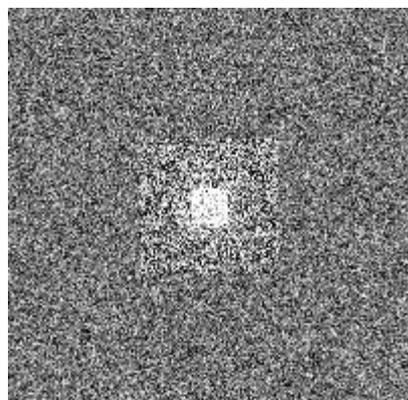


Surface $\rho=0,1$

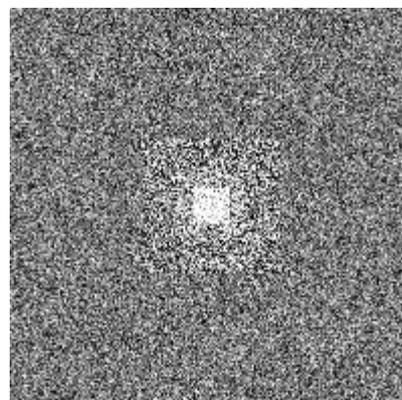


Surface $\rho=0,5$

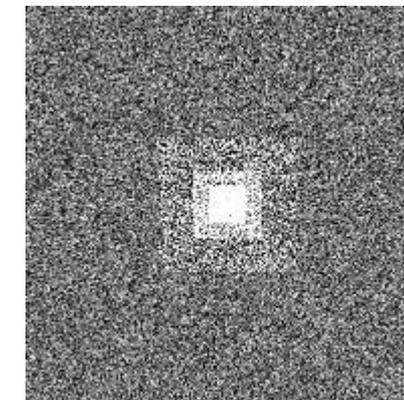
Détection de sulfates fins par CTMF



Surface « eau »



Surface $\rho=0,1$



Surface $\rho=0,5$



Capteur CASI

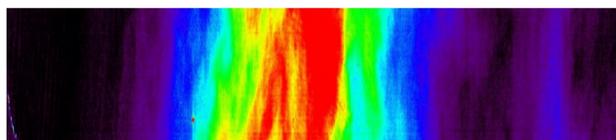
- Rés. spectrale 4,8 nm (144 bandes) : de 367 nm à 1052 nm
- Rés. spatiales après géoréférencement :
1,58m (direction de la trajectoire)
0,96m (direction perpendiculaire)

Acquisition

- Campagne EUFAR
- Février 2011
- Site de Fos-sur-Mer
- Altitude vol : 1950 m (aéroporté)



Détection CTMF



Détection de *brown carbon*



Détection de suie fine



À partir du résultat du filtrage, l'étape suivante sera l'estimation de l'épaisseur optique (travaux en cours)

Conclusions :

- Définition de familles d'aérosols représentatives :
 - Propriétés optiques (calcul par théorie de Mie, à partir des propriétés micro-physiques)
 - Différentiels des termes radiatifs correspondant à chaque famille dans une BDD
- Développement d'un modèle numérique de la luminance au niveau du capteur en présence d'un panache d'aérosols
- Écriture du filtre CTMF pour les aérosols
- Faisabilité satisfaisante sur des données simulées et pour les premiers tests d'un cas réel avec une image aéroportée CASI

Perspectives :

- Validation et études de sensibilités
- Estimation de l'épaisseur optique
- Tests sur un grand nombre d'images réelles de panaches industriels
- Conception d'un outil pré-opérationnel

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Yannick Philippets | yannick.philippets@cea.fr
Centre DIF Bruyères-le-Châtel | 91297 Arpajon Cedex

Doctorant CEA/DGA
Co-encadrement ONERA/CEA

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019