

CARACTÉRISATION ET QUANTIFICATION DES PROPRIÉTÉS DES PANACHES INDUSTRIELS PAR MESURES HYPERSPÉCTRALES

Pierre-Yves Foucher, Laurent Poutier, Philippe Déliot,
Stéphanie Doz

ONERA/ DOTA – Université de Toulouse - F -31055 Toulouse, France



CARACTÉRISATION ET QUANTIFICATION DES PROPRIÉTÉS DES PANACHES INDUSTRIELS PAR MESURES HYPERSPECTRALES

Problématique générale pour caractériser un panache en observation hyperspectrale à haute résolution spatiale

I) Application aux cas des aérosols dans le SWIR

I) Un Modèle pour la signature des aerosols, leur identification et leur quantification

II) Approche multi-temporelle

III) Approche avec reconstruction du fond (une image)

II) Application aux cas des gaz

I) Une méthodologie générique pour le SWIR et le LWIR

II) Application aux données aéroportées LWIR

III) Application pour des mesures LWIR au sol

IV) Application aux données aéroportées SWIR

Flash
présentation

III) Vers des applications opérationnelles et satellite.

Poster de
synthèse

Problématique générale pour caractériser un panache

$L_{panache}$: Luminance mesurée en hyperspectral pour un pixel contenant du panache sur le trajet optique

L_{ref} : Luminance que l'on aurait mesurée pour ce même pixel en absence de panache

Il est possible d'identifier une fonction $F(panache, Environnement, L_{panache}, L_{ref})$ ayant une **forme spectrale caractéristique des propriétés** du panache : type de gaz, type et granulométrie d'aérosol et une **amplitude liée à la quantité de gaz ou d'aérosol**.

Cette fonction spectrale doit pouvoir **être estimée théoriquement par calculs radiatifs** en fonction des propriétés intrinsèque du panache (Concentration, pouvoir absorbant, pouvoir diffusant, T) mais pour **être extraite des données de mesures hyperspectrales** il faut souvent aussi **maîtriser l'environnement** : atmosphère « propre » et fond de scène (Réflectance, Température)

La démarche générale proposée ici est la suivante :

- **Extraction des grandeurs d'environnement** atmosphérique (supposés homogène sur la scène)
- **Estimation de L_{ref}** liée aux propriétés du fond de scène (pixels hors panache)
- Analyse spectrale des fonctions F (Différentiel, transmission du panache) théoriques et extraites des images > **Caractérisation / quantification pixel à pixel**

Cas des aérosol : un modèle pour la signature différentielle des aérosols (VNIR/SWIR)

$$L_{ref}(\lambda) = L^{atm}(\lambda) + \frac{E^{surf}(\lambda) \cdot T^{atm}(\lambda) \cdot \rho_{soil}(\lambda)}{\pi \cdot (1 - \rho_{soil}(\lambda) \cdot S^{atm}(\lambda))}$$

$$\Delta L_{aero}^{sensor}(\lambda) = L_{aero}(\lambda) - L_{ref}(\lambda)$$

$$\Delta L_{aero}^{sensor}(\lambda) = \Delta L_{aero}^{atm}(\lambda) + \frac{\rho_{soil}(\lambda)}{\pi \cdot (1 - \rho_{soil}(\lambda) \cdot S^{atm}(\lambda))} \cdot \Delta L_{aero}^{surf}(\lambda)$$

Les termes $\Delta L_{aero}^{atm}(\lambda)$ et $\Delta L_{aero}^{surf}(\lambda)$ sont **calculés par transfert radiatif (COMANCHE+MODTRAN)** en utilisant les **propriétés de diffusion et d'absorption** d'un ensemble de particules obtenues par un **calcul de Mie**. Ils **dépendent de l'environnement atmosphérique uniquement**.

La seconde hypothèse forte utilisée est la **linéarité** (locale) de ces termes **avec la concentration d'aérosols** (ou épaisseur optique à 550nm).

$$\Delta L_{aero}^{atm}(\lambda, \tau^{550}) = q^{aero} \cdot \Delta L_{aero}^{atm}(\lambda, \tau_{ref}^{550})$$

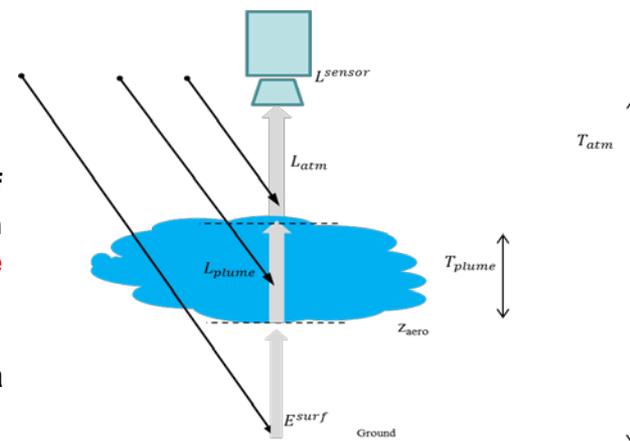
Réflexion du panache (sans interaction avec le sol)

$$\Delta L_{aero}^{surf}(\lambda, \tau^{550}) = q^{aero} \cdot \Delta L_{aero}^{surf}(\lambda, \tau_{ref}^{550})$$

Modification du flux solaire direct au passages dans le panache (up/down)

$$\tau_{aero_ref}^{550} = 0,2 \quad \text{Épaisseur optique à 550nm typique de panaches peu intenses}$$

$$q^{aero} = \frac{\tau_{aero}^{550}}{\tau_{aero_ref}^{550}}$$



Fonction de caractérisation dépend de l'environnement atmosphérique et du fond

$$\Delta L_{aero}^{sensor}(\lambda, \tau^{550}) = q^{aero} \cdot \Delta L_{aero}^{sensor}(\lambda, \tau_{ref}^{550})$$

Généralisation à plusieurs modes d'aérosols

$$\Delta L_{plume}^{sensor}(\lambda, \tau^{550}) = \sum_{i=0}^N q^i \cdot \Delta L_i^{sensor}(\lambda, \tau_{ref}^{550})$$

Synthèse de la procédure de caractérisation des aérosols

Etape 1 :

Extraction des grandeurs atmosphériques supposées homogènes sur l'image (COCHISE) : $E^{surf}(\lambda)$, $T^{atm}(\lambda)$, $L^{atm}(\lambda)$

Calculs Mie des propriétés intrinsèques de familles génériques d'aérosols



Calcul par transfert radiatif pour des familles génériques d'aérosols des termes indépendants du fond :

$$\Delta L_{aero}^{atm}(\lambda, \tau_{ref}^{550}) \text{ et } \Delta L_{aero}^{surf}(\lambda, \tau_{ref}^{550})$$

Etape 2 :

Estimation des propriétés de réflectance des pixels de l'image (estimation de L_{ref}^*) :

- Analyse multi-temporelle
- Classification et association des réflectances moyennes aux pixels de chaque classe

Calculs rapides pour des familles génériques d'aérosols de la signature différentielle théorique pour chaque pixel : $\Delta L_{plume}^{sensor}(\lambda, \tau^{550})_{model}$

Extraction du terme différentiel à partir des mesures : $\Delta L_{plume}^{sensor}(\lambda, \tau^{550}) = L_{mes} - L_{ref}^*$

Etape 3 :

Analyse spectrale des termes : $\Delta L_{plume}^{sensor}(\lambda, \tau^{550})_{model}$ et $\Delta L_{plume}^{sensor}(\lambda, \tau^{550})$

Identification des aérosols génériques les plus pertinents + définition des **plages de variations** possibles autour des aérosols génériques (taille)

Inversion multimodes linéaire à contrainte positive pour affiner pixel à pixel la composition du panache

Application à un panache de raffinerie en approche multi-temporelle

Projet TEMMAS



Université
Paul Sabatier
TOULOUSE III

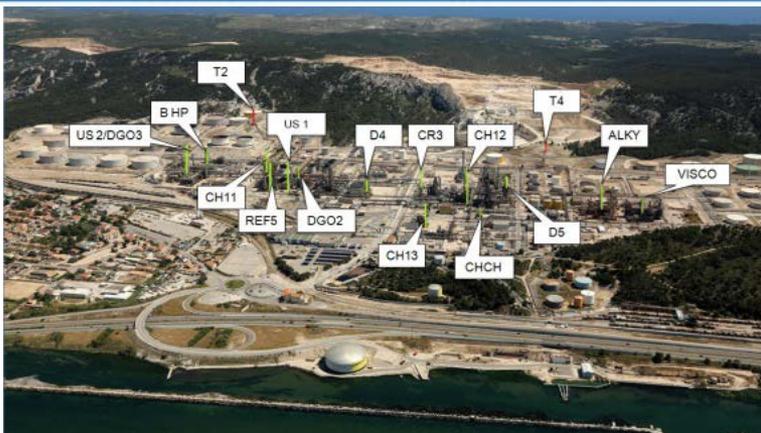


Laboratoire Chimie
Environnement
CNRS
Aix-Marseille
UNIVERSITÉ

AirPACA
QUALITÉ DE L'AIR

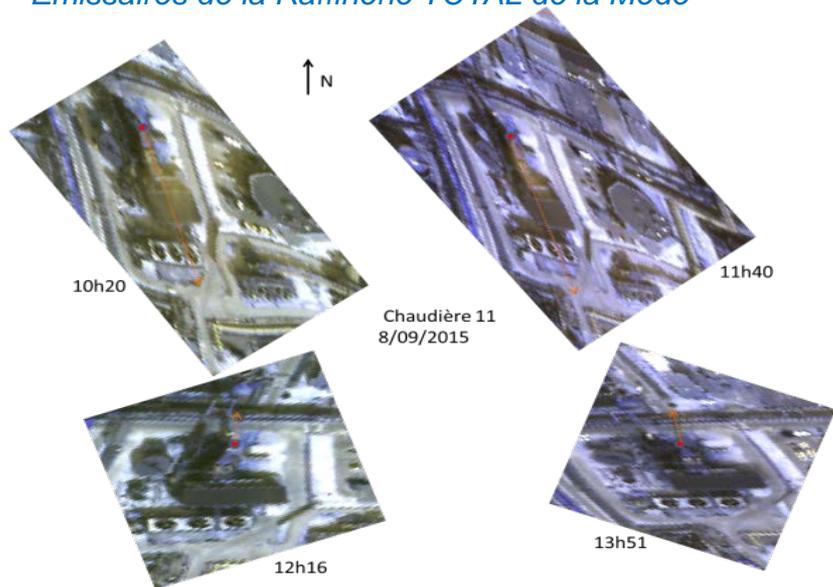


Cerea
Centre d'Enseignement
et de Recherche
en Environnement
Atmosphérique



Prélèvements in-situ d'aérosols en sortie de cheminée et au sol dans l'environnement proche de la source : **analyse des types, taille, concentrations, des aérosols de fond et du panache.**

Emissaires de la Raffinerie TOTAL de la Mède



Acquisitions multi temporelles au dessus des émissaires principaux : **utilisation des "bascules de vent"**



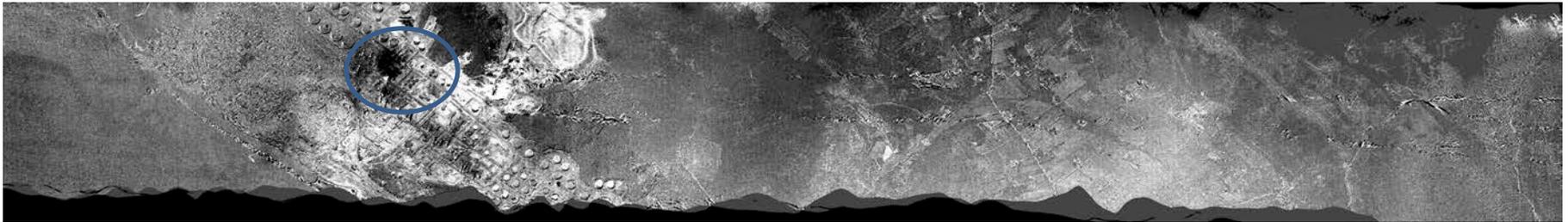
Project funded by
ADEME CORTEA
program - Convention
1381C0054

Mosaïque des acquisitions hyperspectrale Hypspec sur la zone de la raffinerie (2 campagnes 2015 et 2016)

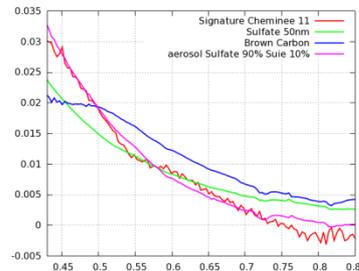
Images différentielles après registration et correction atmosphérique : exemple



Etape 1 : Correction des effets de nuages / cirrus (Transmission spectralement plate)



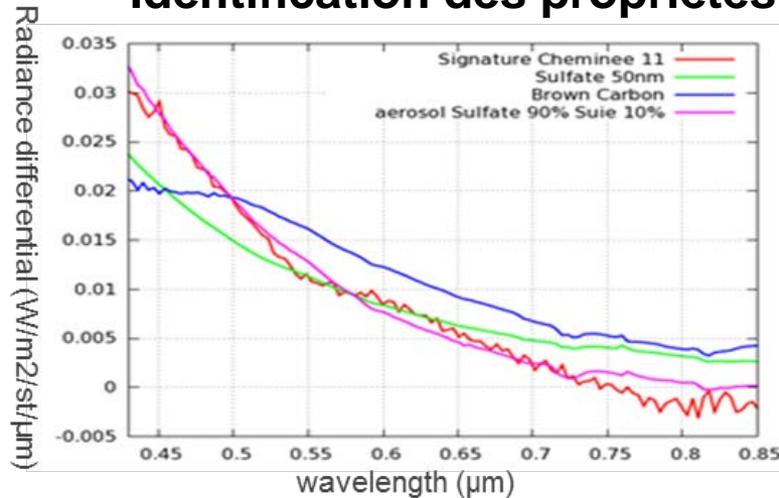
Etape 2 : Identification des zones d'intérêt et extraction des signatures caractéristiques du panache de la raffinerie



Extraction du terme différentiel mesuré :
 $\Delta L'_{plume}(\lambda)$

Analyse des signatures différentielles

Identification des propriétés du panache

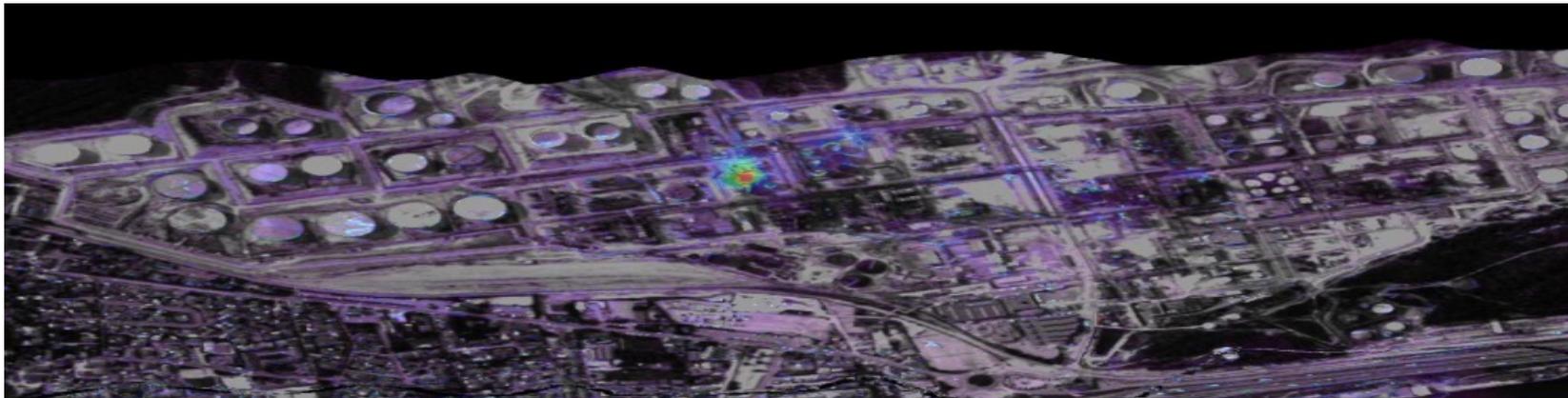


Aérosol majoritaire: Sulfate rayon
50-100nm (90%)

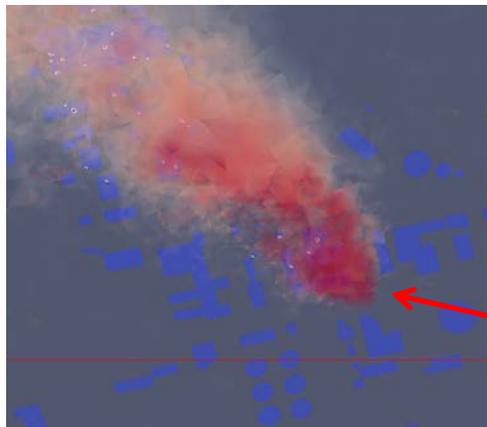
→ Aérosol minoritaire : Suie rayon 50 nm
(10%)

En accord avec les prélèvements in-situ

↓
Carte de quantification en épaisseur optique du mélange
d'aérosol identifié

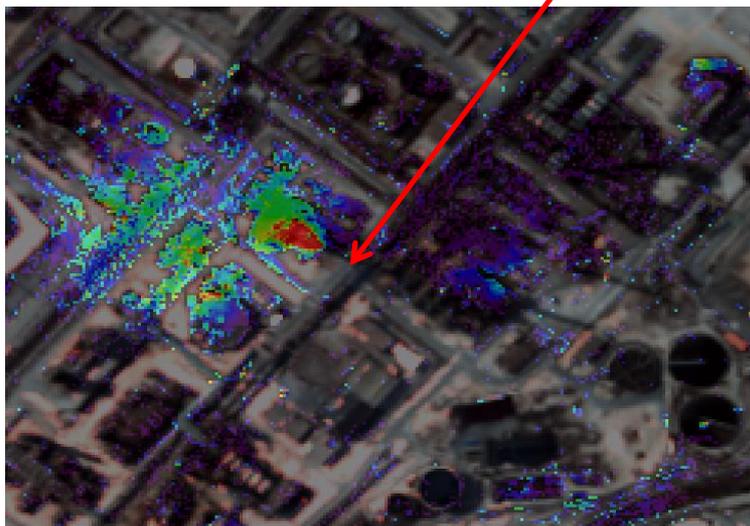


Analyse massique – Estimation de débit

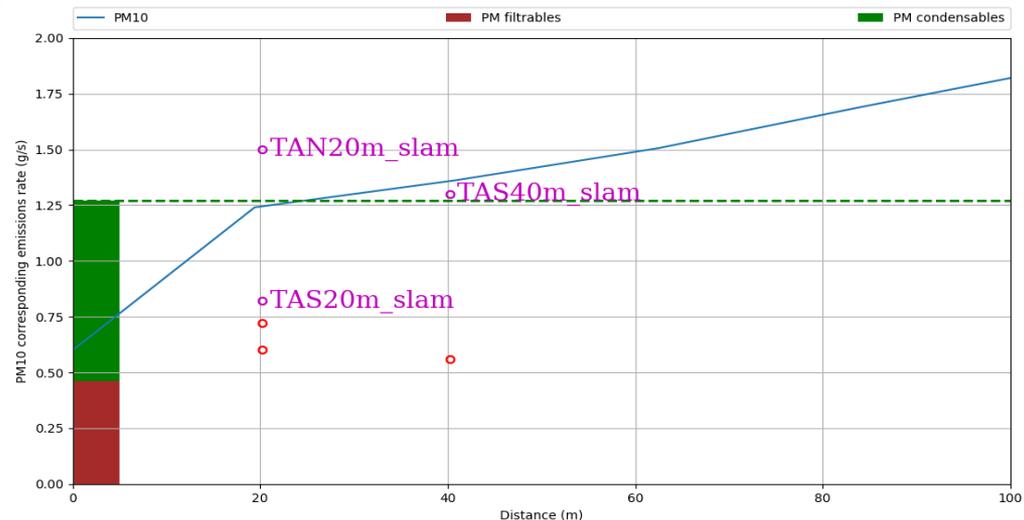


Modèle SLAM (Lagrangien) à 1m de résolution

Source
CH11



Carte hyperspectrale à 2m de résolution



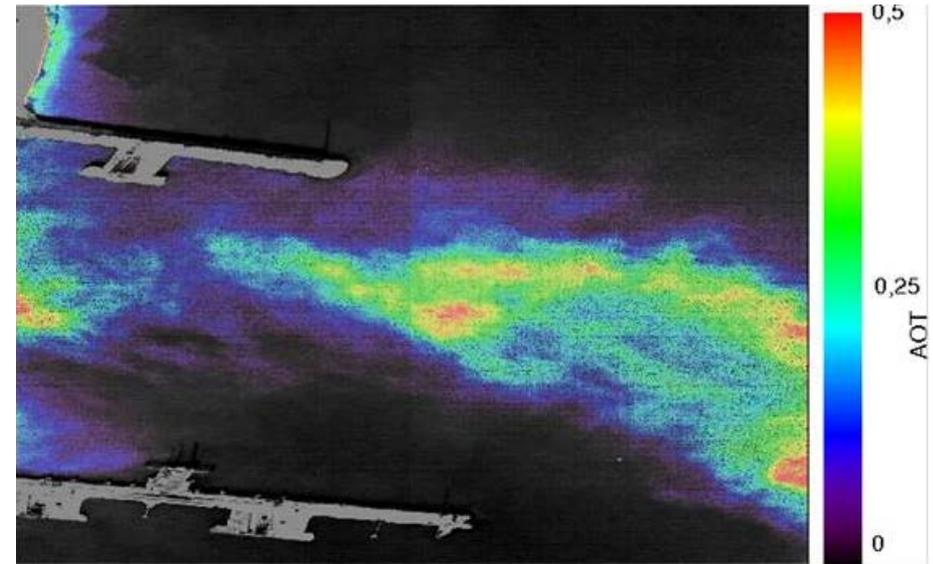
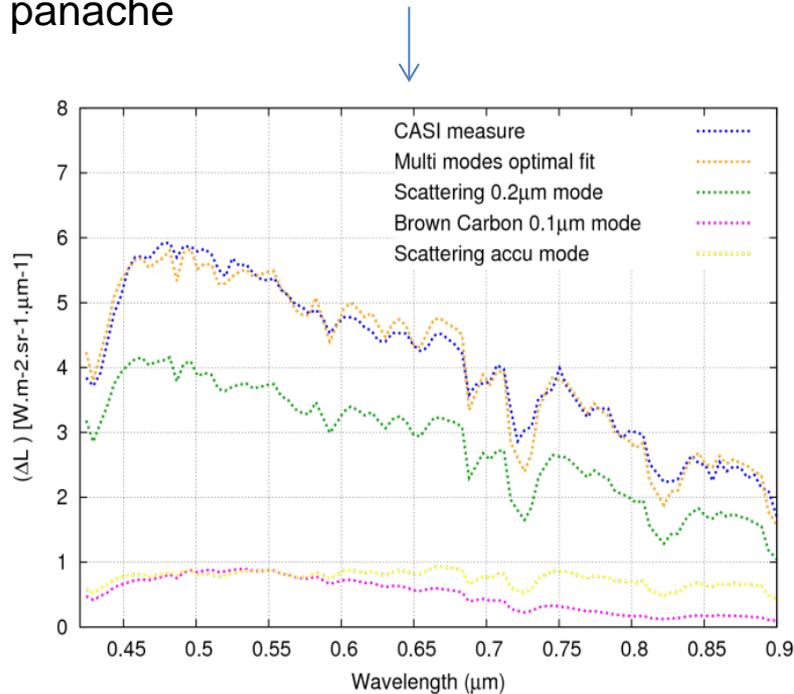
Estimation des débits (mesures in-situ, modèle, hyperspectral)

Comparaison des Cartographies hyperspectrales des aérosols à haute résolution spatiale aux modèles fine échelle et mesures sols in-situ

- Estimation du débit 1-2 g/s
- Taille et type des particules :
 - Sulfate 90%, Suie 10%
 - Taille moyenne de l'ordre de 50-100nm à 20 m de la source
 - Formation de PM secondaire modélisée en accord avec les mesures aéroportées

Approche par images indépendantes: Cas d'une usine métallurgique. Acquisitions CASI (EUFAR)

Extraction de la signature caractéristique du panache :
Identification des familles d'aérosols composant le panache



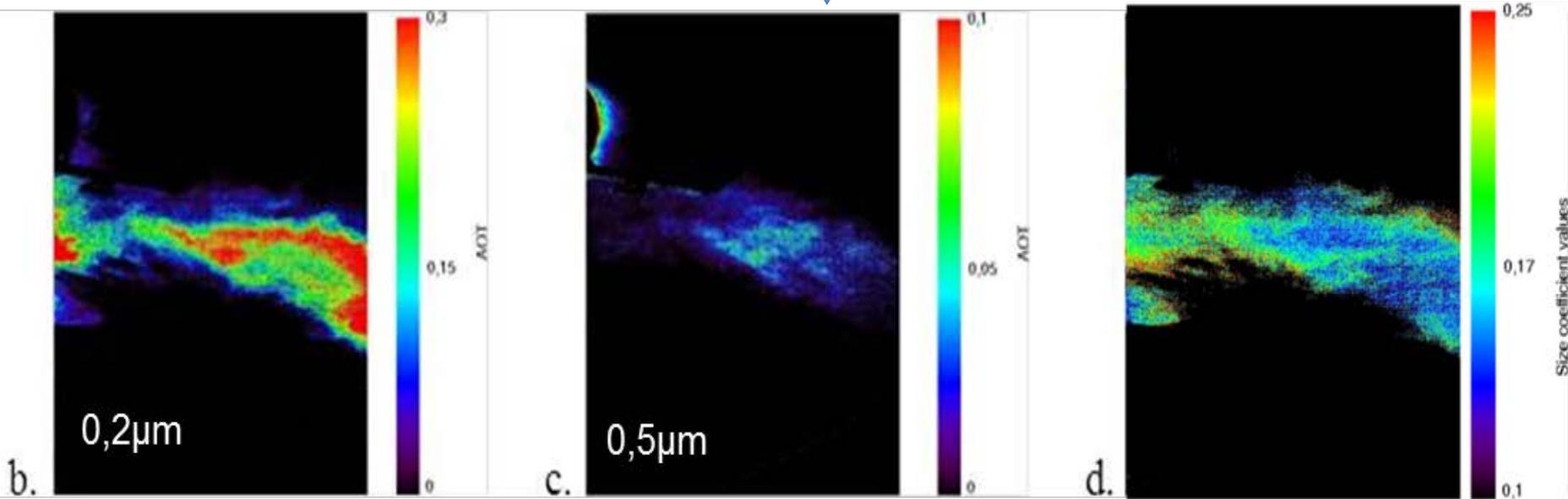
Carte de quantification en épaisseur optique du mélange d'aérosol identifié

Bleu : Différentiel de luminance estimé à partir des acquisitions CASI, Orange : Signature multimodale théorique obtenue, elle est composée d'un mode principal : Aérosol diffusant rayon moyen 0,2 μm et deux modes minoritaires : Aérosol diffusant rayon moyen 0,2 μm , Brown Carbon fin (0,1 μm).

Philippets Y., P.-Y. Foucher, R. Marion and X. Briottet. 2017. "Anthropogenic aerosol emissions mapping and characterization by imaging spectroscopy – Application to a metallurgical industry and a petrochemical complex" accepted to International Journal of Remote Sensing – April 2018.

Analyse des variations spatiales des propriétés au sein du panache

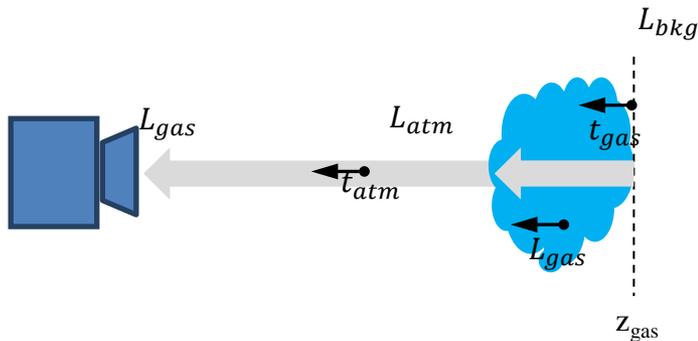
Extraction des signatures pixels par pixels et inversion multimodales effectuées pixel par pixel



Gauche : contribution à l'épaisseur optique du mode à $0,2\mu\text{m}$, Milieu : contribution à l'épaisseur optique du mode à $0,5\mu\text{m}$, Droite : Evolution spatiale du paramètre de taille, dérivé du coefficient d'Angstrom (Philippot et al., 2018).

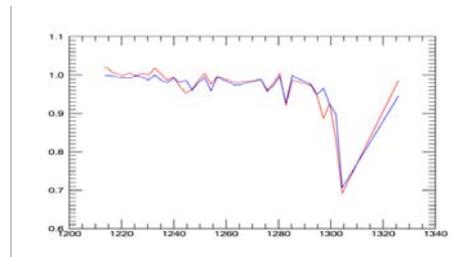
Mise en évidence de variations de la taille moyenne des aérosols : les particules ont tendance à grossir avec la distance (diminution du paramètre de taille)

Cas des gaz : Extraction de la transmission comme fonction de quantification

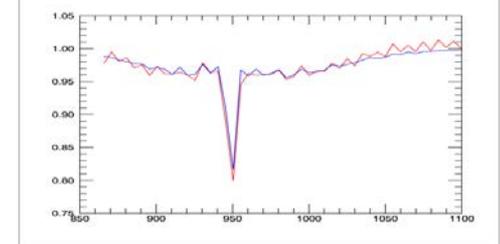


La transmission est une grandeur dont la forme spectrale est liée au type de gaz en présence et dont l'amplitude est liée à la concentration .

Elle peut être estimée théoriquement et extraite des données hyperspectrales



Methane transmission in red : theory, in blue : retrieved from data)



Ethylene transmission in red : theory, in blue : retrieved from data)

Modèle simplifié pour l'extraction de la transmission à partir de données hyperspectrales

$$L_{gas} = \tau_{gas} \cdot \tau_{atm} \cdot L_{bkg} + \tau_{atm} \cdot (1 - \tau_{gas}) \cdot B(T_{gas}) + L_{atm}$$

$$L_{ref} = \tau_{atm} \cdot L_{bkg} + L_{atm}$$

$$\text{LWIR case : } \tau_{gas} = 1 + \frac{L_{gas} - L_{ref}}{(L_{ref} - L_{atm} - \tau_{atm} \cdot B(T_{gas}))}$$

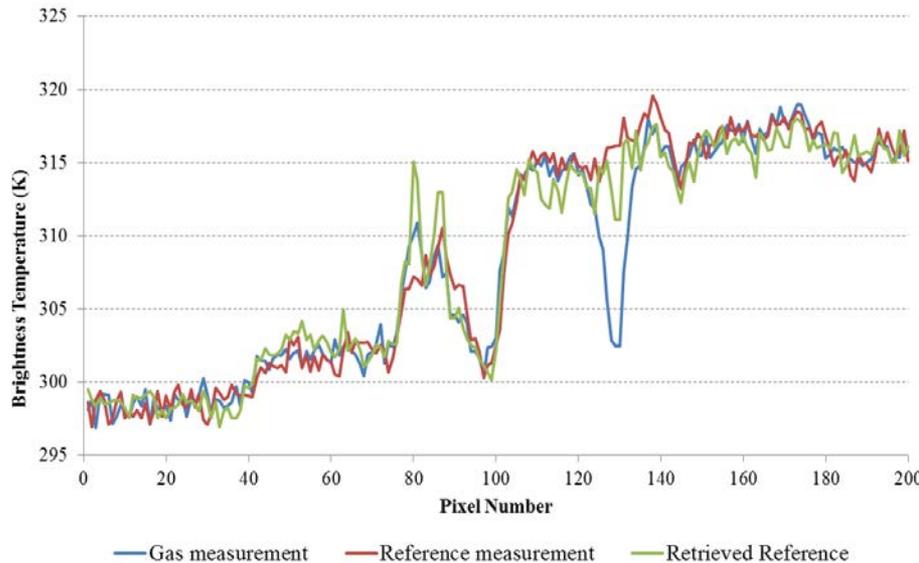
$$\text{SWIR Case : } \tau_{gas} = \frac{L_{gas} - L_{atm}}{(L_{ref} - L_{atm})}$$

Cas des gaz : Estimation de la luminance de référence sous le panache

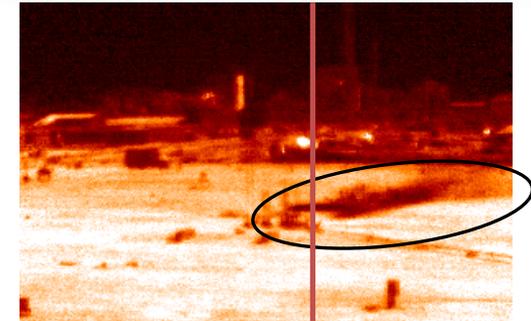
Principe :

Tous les pixels de l'image ne sont pas impactés par le panache et l'impact spectral est très localisé. **Les pixels et les canaux "propres" sont utilisé pour reconstruire le spectre dans les canaux impactés par le gaz.**

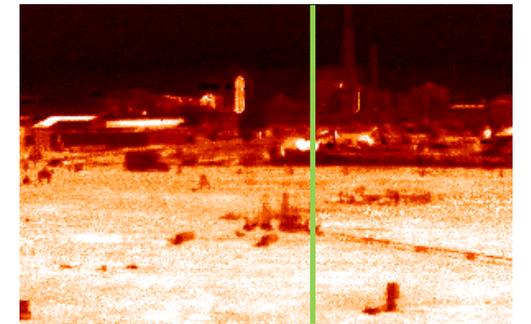
Idoughi et al., "Background radiance estimation for gas plume quantification in downlooking thermal infrared images", Journal of Spectroscopy, vol. 2016, Article ID 5428762 (2016)



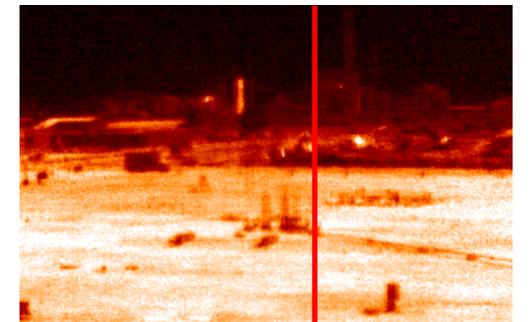
Coupes verticales en température de brillance du canal hyperspectral le plus sensible au gaz en présence.



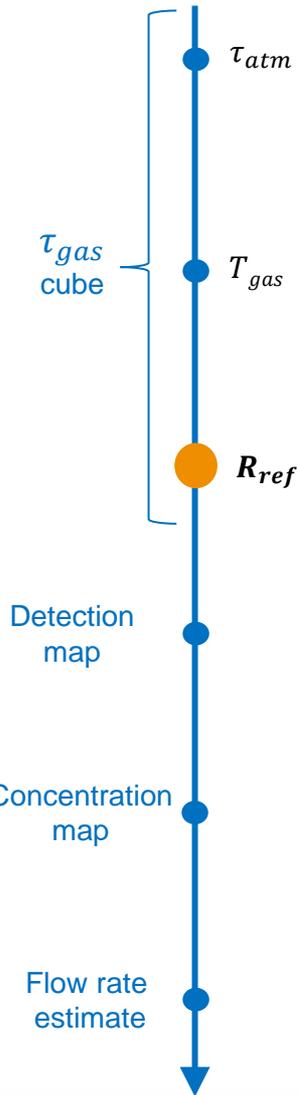
Acquisition with gas



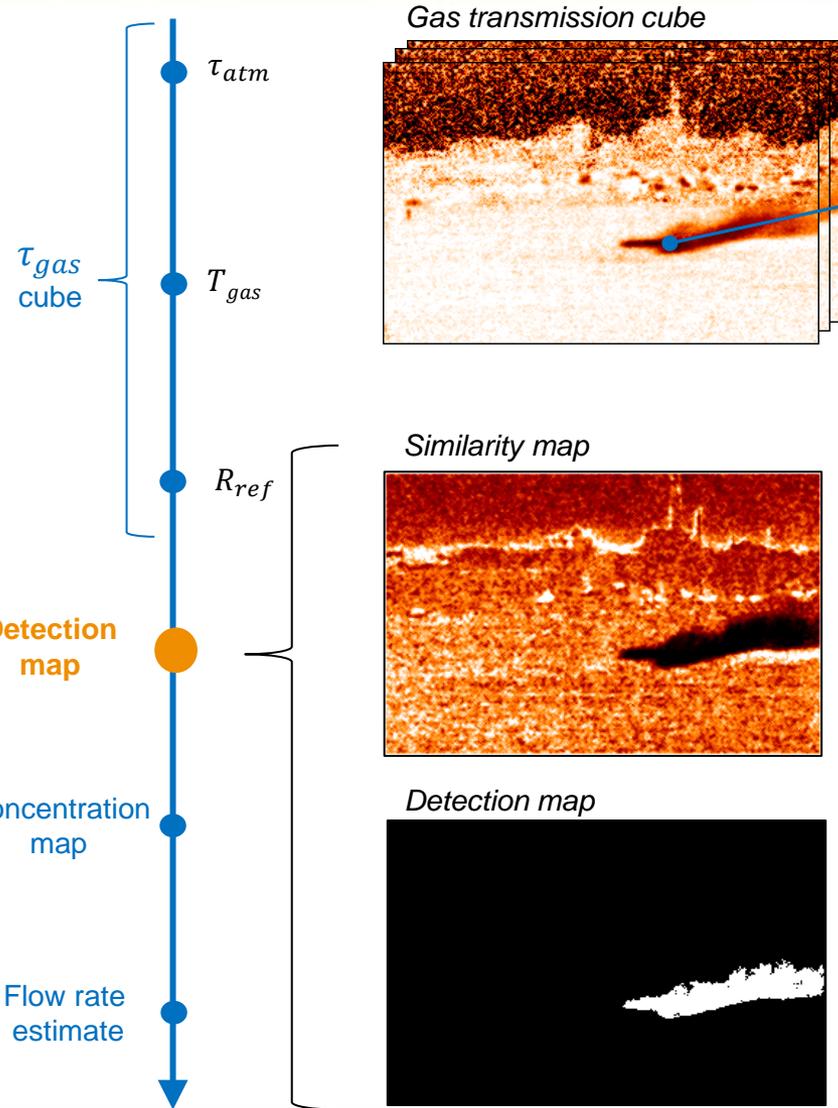
Reference radiance estimate



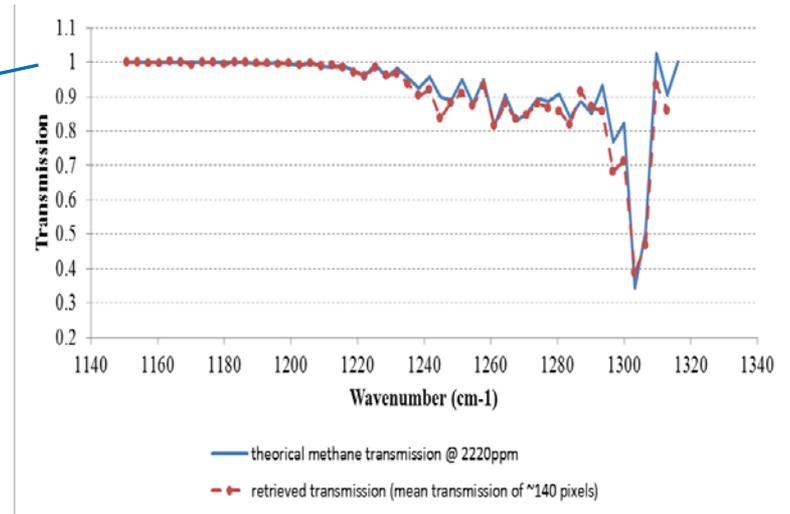
Acquisition without gas
i.e. reference radiance



Cas des gaz : Estimation de la transmission utile pour la détection



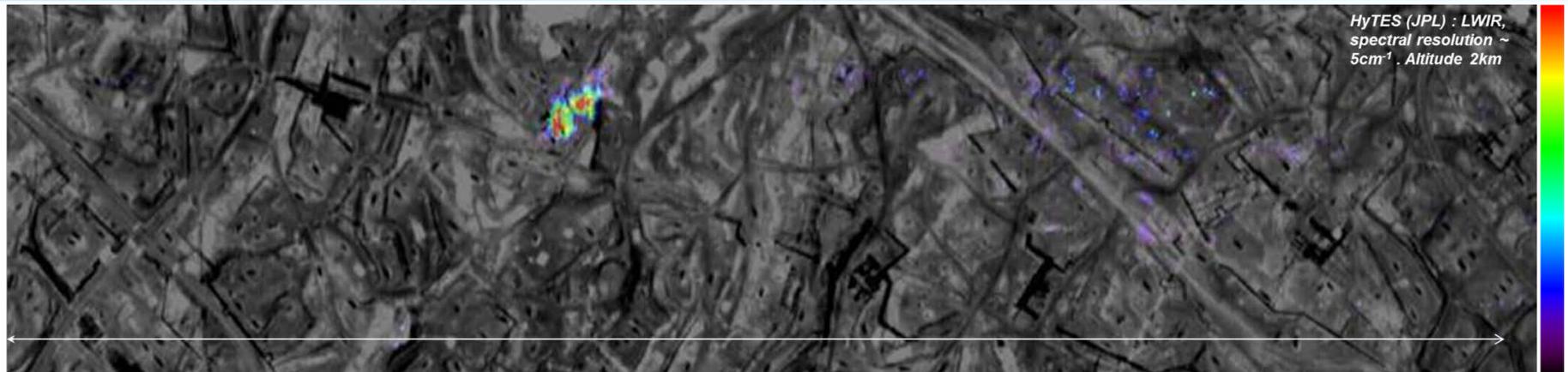
Exemple de comparaison entre transmission théorique et transmission extraite des mesures



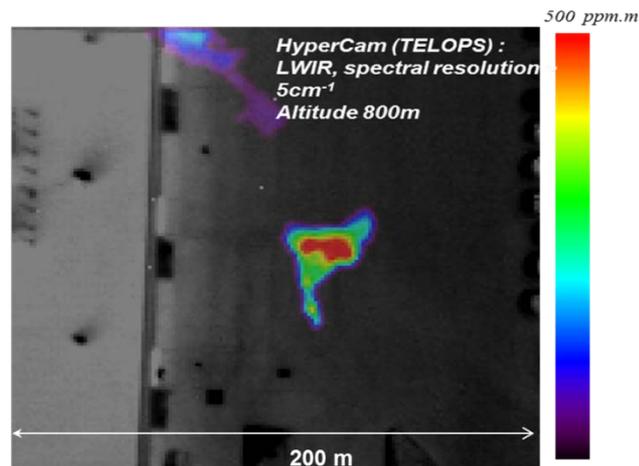
Une carte de score de corrélation / similarité entre les transmissions mesurée et théorique est alors estimé pour produire le masque de détection

Doz, S., Foucher, P-Y., "Methane leak near real time quantification with a hyperspectral infrared camera", SPIE Defense and Commercial Sensing 2018, 14-19 Avril, 2018

Cas des gaz : quantification en LWIR en temps réel



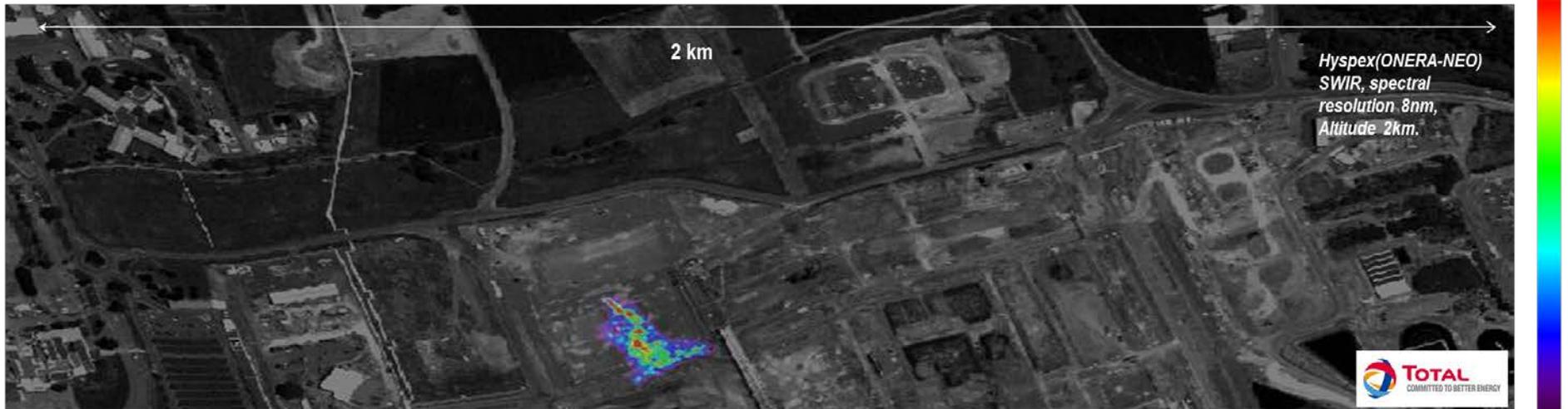
Map of CH4 ppm.m concentration from HyTES LWIR (JPL) acquisition on Californian Kern River oil&gas industry



Map of Ethylene ppm.m concentration from HyperCam (Telops) acquisition estimated release at 3,2g/h (ground truth at 4g/h).

Cas des gaz : quantification en SWIR

15 000 ppm.m



0 ppm.m

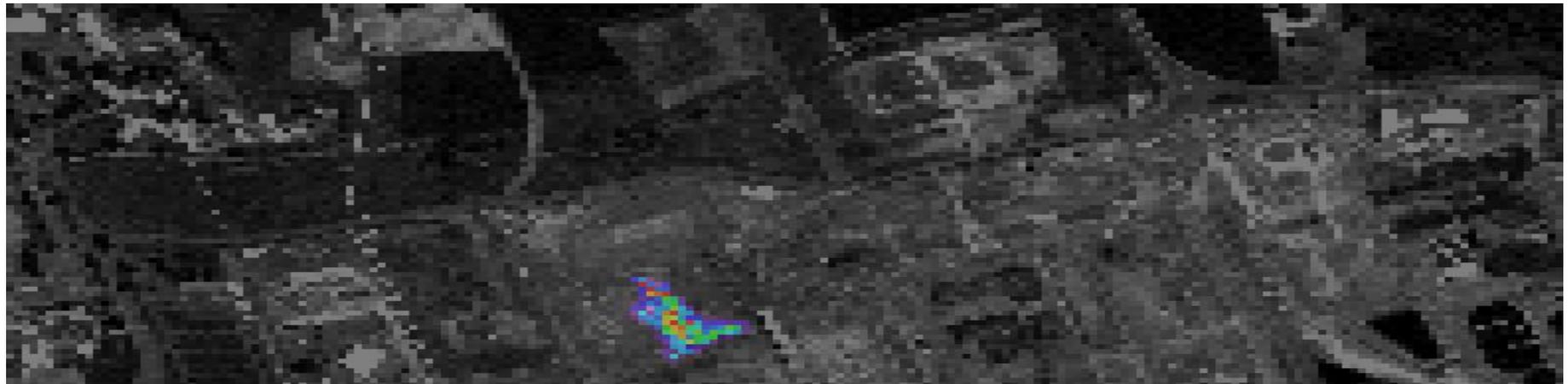
Map of CH₄ ppm.m concentration from Hypsax SWIR acquisition on TOTAL Lacq pilot site release estimated at 60g/s release (ground truth at 50g/s)

Préparation des futures missions satellites

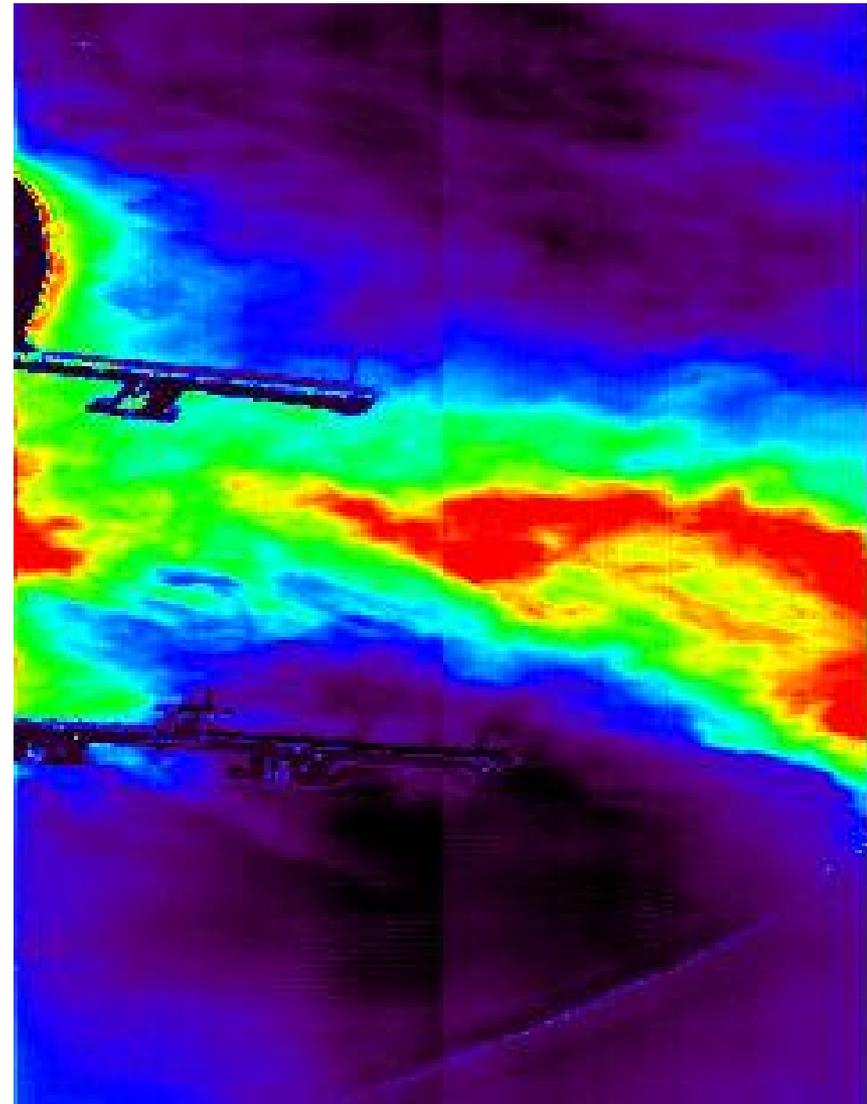
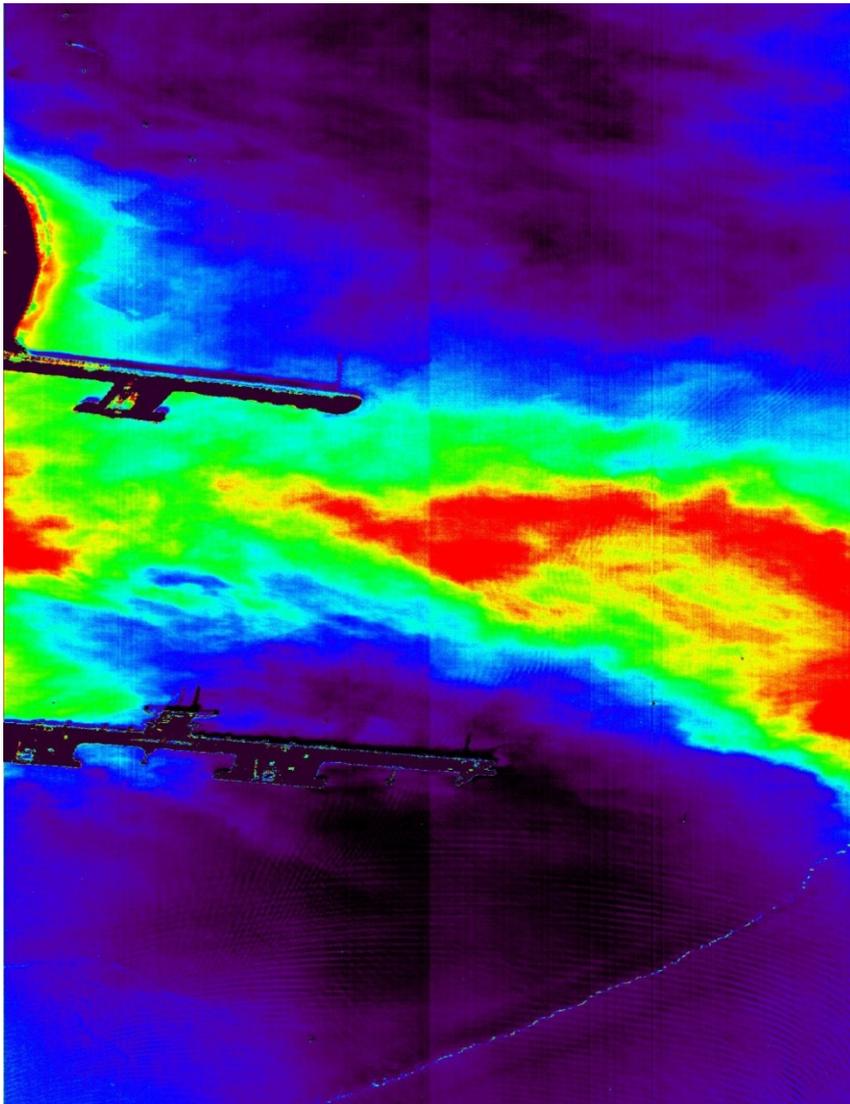
Carte de méthane à 2m de résolution



Passage à 8m de résolution spatiale



Préparation des futures missions satellites : cas des panaches intenses d'aérosols



Conclusions – Synthèse – Perspectives

- Les outils présentés permettent d'extraire des données hyperspectrale les signatures caractéristiques des panaches d'aérosols pixel à pixel et de fournir des carte de leur évolution spatiale (sensibilité de l'ordre de 0,05 en épaisseur optique) et de fournir des informations de débits.
- Concernant les gaz, les outils développés ont pu être validés tant dans le SWIR que dans le LWIR pour l'estimation de débit de méthane et s'adapte à tout type de gaz (principalement dans le LWIR). Les sensibilités sont de l'ordre de 0,05 en transmission pour les instruments aéroportés actuels.

Ces travaux doivent se poursuivre vers une transposition aux données satellitaires et drone : suivi opérationnel de sites particulier.

Des perspectives de comparaison avec les modèles de dispersion fine échelle sont aussi à l'ordre du jour dans l'objectif d'améliorer la modélisation et la prévision des concentrations en particules proche des sources, en particulier dans les zones industrielles et urbaines

Ces outils sont particulièrement adaptés pour dimensionner et mettre en place des outils opérationnels (sol, drone, satellite) pour la gestion d'évènements de crises en lien avec des rejets de gaz ou aérosols industriels dans l'atmosphère.