

# Imagerie hyperspectrale pour la télédétection de sources intenses de particules d'origine anthropique

Colloque SFPT – Groupe Hyperspectral – Juillet 2023

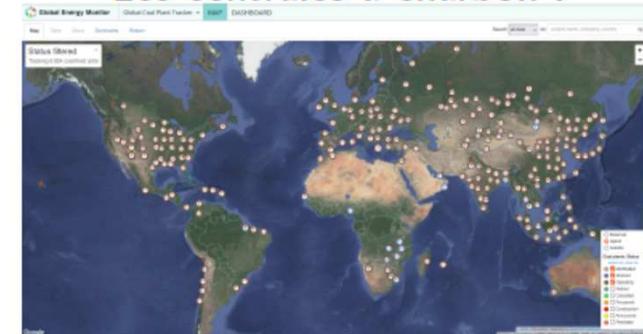
P-Y. Foucher, **G. Calassou**, J-F. Léon (LA/OMP)

*[pierre-yves.foucher@onera.fr](mailto:pierre-yves.foucher@onera.fr)*

# Enjeux

- Le secteur industriel représente entre 10 et 20 % des émissions de particules fines (PM 2.5) d'origine anthropiques responsables d'une dégradation de la qualité de l'air dans leur environnement proche avec des conséquences négatives sur la santé des populations avec un cout associée estimé en centaine de milliards d'euros à l'échelle européenne (*Sources : Clean Air For Europe*).
- *L'impact de la suie atmosphérique sur le forçage radiatif direct et indirect est de plus un enjeu majeur.*
- En réaction, les seuils de pollutions concernant la qualité de l'air sont depuis les années 2000 baissés régulièrement. En conséquence des mises à jour ambitieuses ont été mises en place dans le dernières années concernant les seuils de concentrations dans l'environnement proche ( $<40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mais aussi au niveau des émissions industrielles.
- A titre d'exemple, dans le secteur de la métallurgie hors aciéries les seuils à l'émission en 2021 sont fixés à  $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  alors que les valeurs limites d'émission de poussières fixées en 1998 se situaient  $40 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  à  $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . Concernant les aciéries les seuils limites à l'émissions varient de  $15$  à  $40 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  et pour les activités de craquage catalytique en raffinerie les nouveaux seuils sont fixés à  $25 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  pour les nouvelles installations. (*Sources : BREF | AIDA, INERIS*)

## Les centrales à charbon :



## Les sites sidérurgiques :

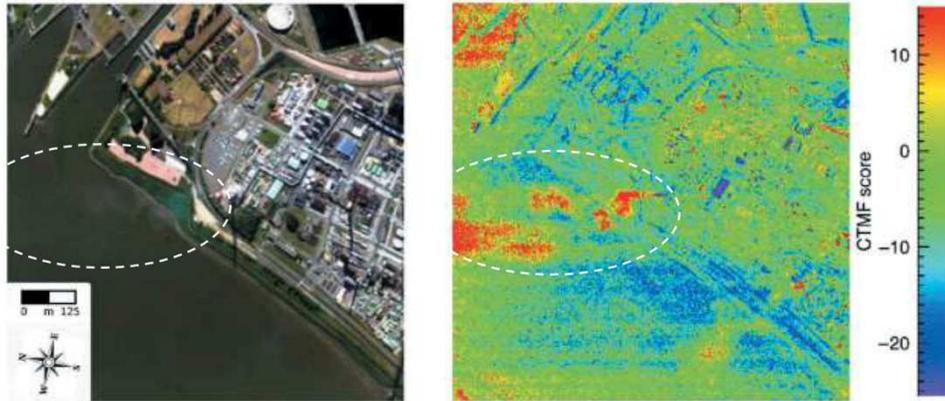


## Torchage de gaz :

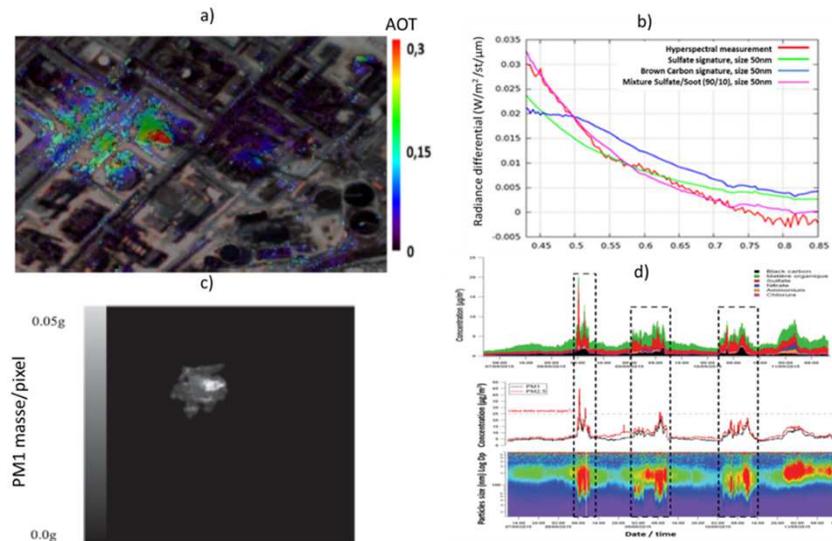


# Contexte

Etude à l'Onera depuis 10 ans (Deschamps et al., 2012) sur le potentiel de l'imagerie hyperspectrale aéroportée pour la caractérisation de panaches d'aérosols industriels



Détection et identification de panaches optiquement fins issues de données AHS sur Raffinerie (Philippe et al., 2018)



Premières estimations quantitatives par différentiel temporel hyperspectral aéroporté. Données issues de données Hypyx acquises sur Raffinerie comparées à des mesures in-situ (Foucher et al. 2019 – Projet TEMMAS ADEME)

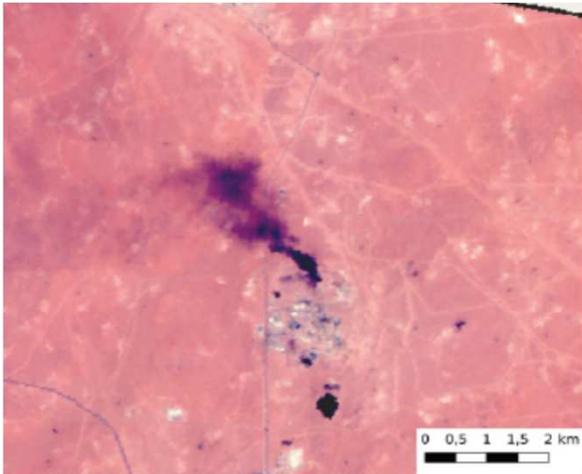
# Objectifs

Identifier, caractériser et quantifier les émissions à la sources en particules par imagerie satellite pour différents types d'industries :

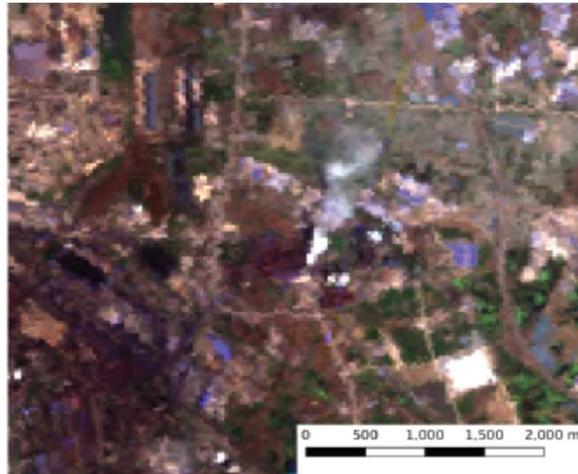
- Evolution de la concentration entre la source et l'environnement proche pour les PM 2.5 et les PM1
- Estimer les débits massiques associées aux principaux émetteurs industriels : raffinerie, centrales à charbon, industrie sidérurgique

Pour atteindre cet objectif nous nous sommes appuyés sur le couplage entre l'imagerie hyperspectrale qui permet d'identifier les propriétés des particules au niveau du pixel et l'imagerie satellitaire multispectrale dont le bon taux de revisite permet d'aider à séparer la contribution du fond et la contribution du sol pour les panaches optiquement fins.

# Data : PRISMA (30 m) and Sentinel-2 (10 m)



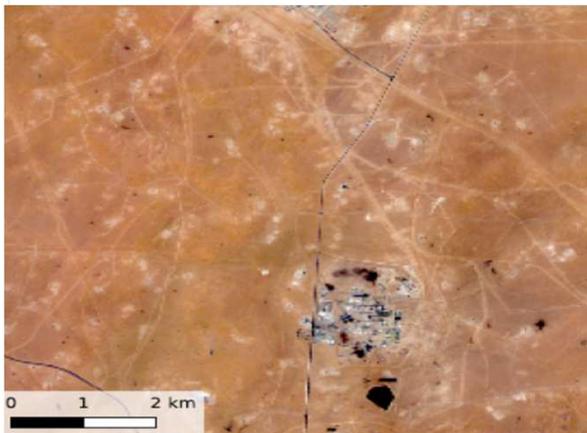
Oil flaring plume in Hassi Messaoud, Algeria, on 9th July 2021



Sinter factory in Wuhan, PRC, on 24th March 2021



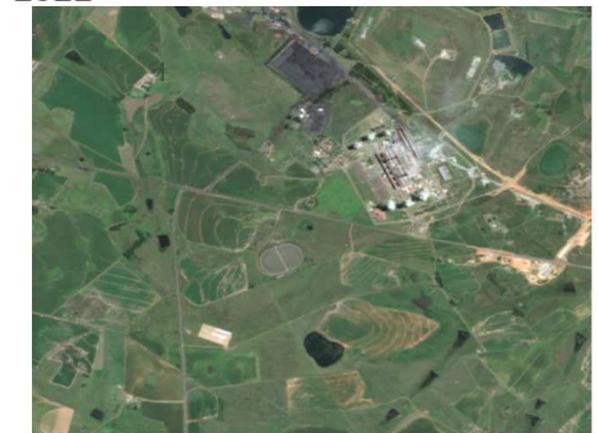
Coal-fired power plant, Matla, South Africa, on 12th February 2022



Sentinel-2

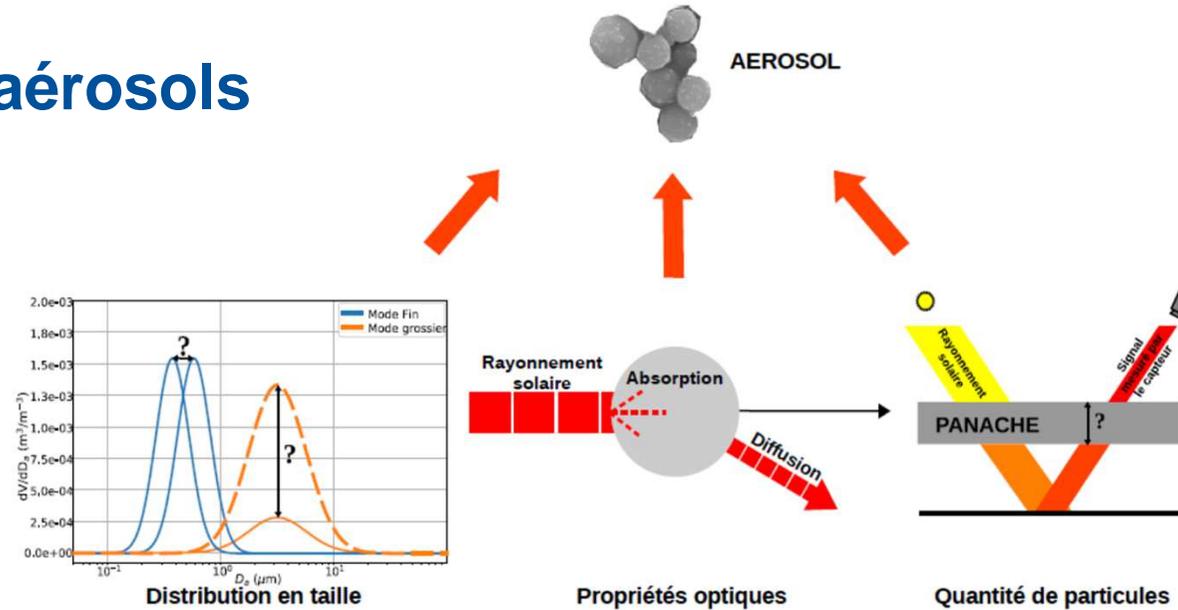


Sentinel-2



Sentinel-2

# Modèle d'aérosols

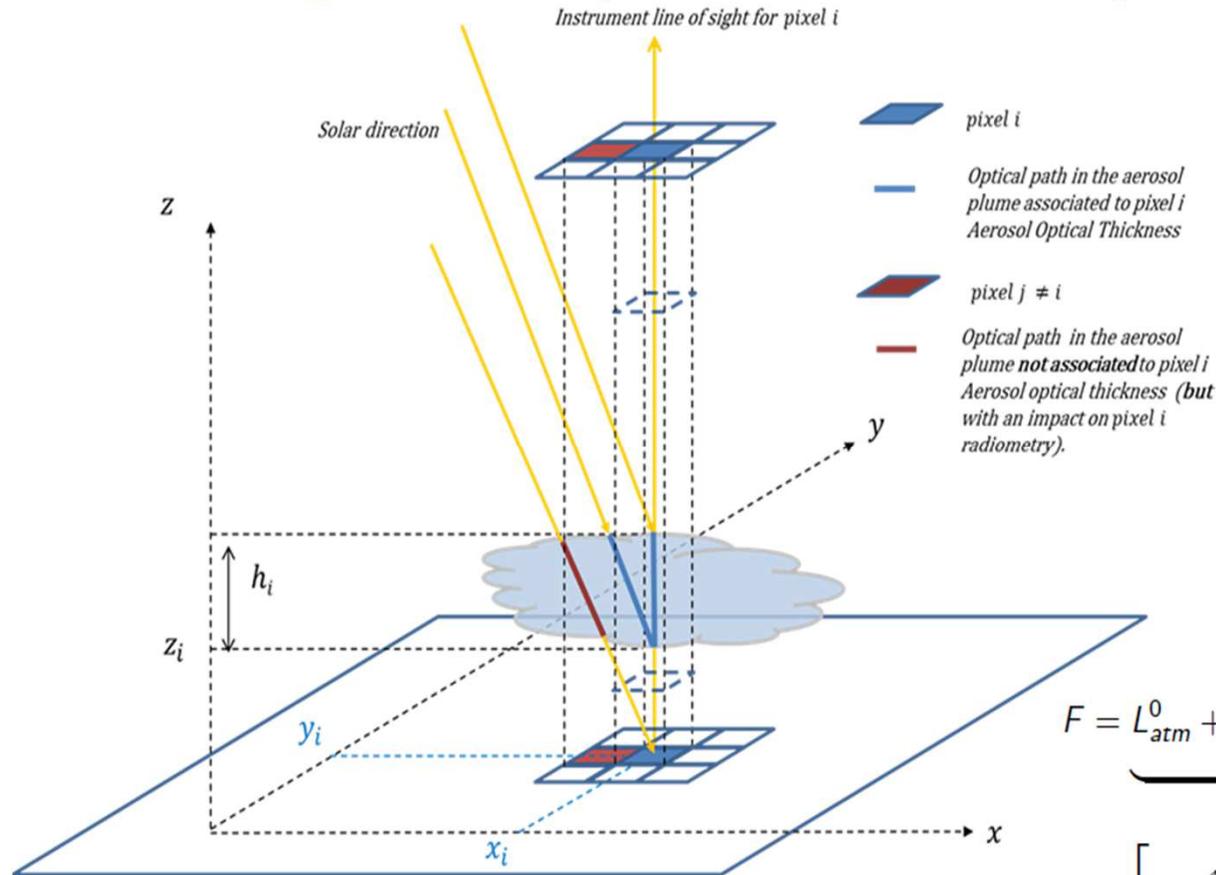


- Distribution à deux modes dont la contribution relative est caractérisée par une fraction volumique du mode grossier par rapport au mode fin
- Mode grossier considéré non sphérique
- Mode fin considéré sphérique
- Les propriétés d'absorption sont associées à une fraction volumique de suie dans le mélange d'aérosols

*Synthèse de données a priori issues de la littérature*

	$r_m$ (std.) type	$V_c$ (%)	$V_{soot}$ (%)
flaring	0.065 (1.5) soot	52	100
sinter plant	0.13 (1.4) sulfate + soot	62	0
coal-fired plant	0.18 (1.5) sulfate + soot	52	0

# Modèle géométrique et radiométrique utilisé



- La luminance observée au niveau capteur pour un pixel donnée est liée à l'épaisseur optique en aérosol de la colonne du panache associée au pixel et notée :  $\delta_{550}^{\uparrow}$  mais aussi à l'épaisseur optique des pixels environnant noté :  $\delta_{550}^{\downarrow}$  (liée au trajet du flux solaire direct descendant)

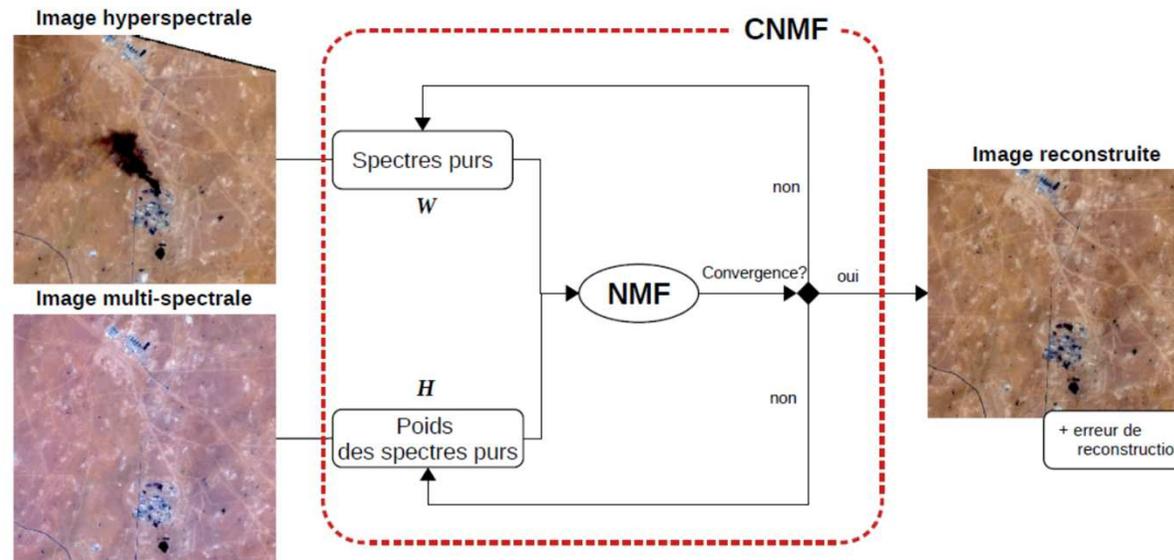
$$F = \underbrace{L_{atm}^0 + \rho \frac{E_{tot}^0 T_{atm}^0}{\pi(1 - \rho S^0)}}_{(a)} + \underbrace{\left[ \Delta L_{atm}^{\delta_{550}^{\uparrow}} + \rho \frac{\Delta((E_d^{\delta_{550}^{\downarrow}} + E_s^{\delta_{550}^{\uparrow}}) \times (T_d^{\delta_{550}^{\uparrow}} + T_s^{\delta_{550}^{\uparrow}}))}{\pi(1 - \rho S^0)} \right]}_{(b)}$$

Calculs de LUT en variation de flux solaire et de luminance atmosphérique pour différents type, rayon et AOT d'aérosols

$a$  : Signal en luminance dans le cas d'un ciel clair.

$b$  : Perturbation du signal due aux particules présentes dans le panache.

# Couplage hyperspectral / multispectral pour l'estimation des réflectances de fond hyperspectrales sous le panache



Hypothèses :

- Il existe une donnée multispectrale (Sentinel-2) sans panache associée à une image hyperspectrale (PRISMA) du fait des changements naturels de direction de vent (ou de discontinuité des émissions)
- Les poids estimés sur l'image multispectrale à partir des spectres multispectraux des pixels purs (communs aux deux images) peuvent s'appliquer aux spectres hyperspectraux de ces mêmes pixels purs pour reconstruire les spectres hyperspectraux sous le panache

# Iterative non linear retrieval of aerosol parameters

$$x_{i+1} = x_i + (K^T S_\epsilon^{-1} K + S_a^{-1} \times (1 + \gamma))^{-1} \times [K^T S_\epsilon^{-1} K (y - Kx) + S_a^{-1} (x - x_a)]$$

State vector

$$x = \begin{bmatrix} \delta_{550}^\uparrow \\ \delta_{550}^\downarrow \\ r_{fine} \\ V_{coarse} \\ V_{abs} \end{bmatrix}$$

- $\delta_{550}^\uparrow$  : Pixel AOT
- $\delta_{550}^\downarrow$  : Pixel surrounding AOT
- $r_{fine}$  : fine mode median radius
- $V_{coarse}$  : Coarse mode volume fraction
- $V_{abs}$  : Aerosols absorbing fraction



- Convergence : number of iterations
- A posteriori uncertainties
- Degree of freedom associated to retrieved parameters
- AOT and associated aerosol physical properties

Uncertainties :

- A priori state vector variance  $S_a$
- Measurement noise  $S_y$
- Non retrieved parameters uncertainties  $S_b$  :
  - Ground reflectance
  - Atmospheric parameters

$$S_\epsilon = S_y + K_b^T S_b^{-1} K_b$$

# Concentration massique et débit massique

$$M = \frac{\delta_{550}^\uparrow}{\alpha_{ext}} \quad \alpha_{ext} = \int_0^\infty \frac{3 Q_{ext}(r)}{4\mu r} f(r) dr \quad \begin{array}{l} M : \text{aerosol mass per } m^2 \\ \mu : \text{aerosol density} \end{array}$$

A partir des caractéristiques estimées des aérosols on peut estimer l'extinction efficace massique  $\alpha_{ext}$ , on peut alors calculer la masse surfacique M.

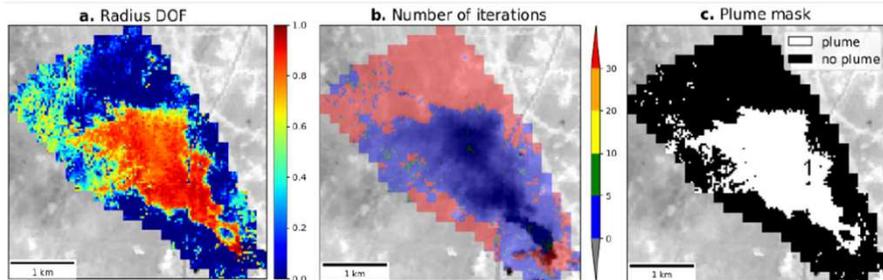
On calcule alors l'IME (Integrated Mass Enhancement) à partir des N pixels du panache détectés :  $\sum_{j=1}^N M_j S$  avec S la surface d'un pixel.

Le débit Q (g/s) est alors estimé par le ratio entre l'IME et le temps de résidence t qui peut être estimé par L/U<sub>eff</sub> où L est la longueur du panache et U<sub>eff</sub> le vent effectif (ici estimé à partir des données ERA-5 à 100m)

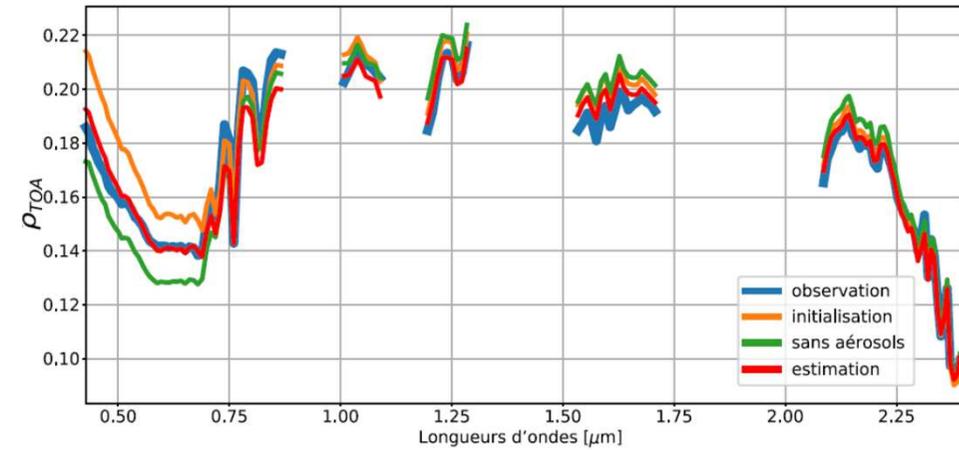
$$Q = \frac{IME \cdot U_{eff}}{L}$$

# Examples of spectral convergence

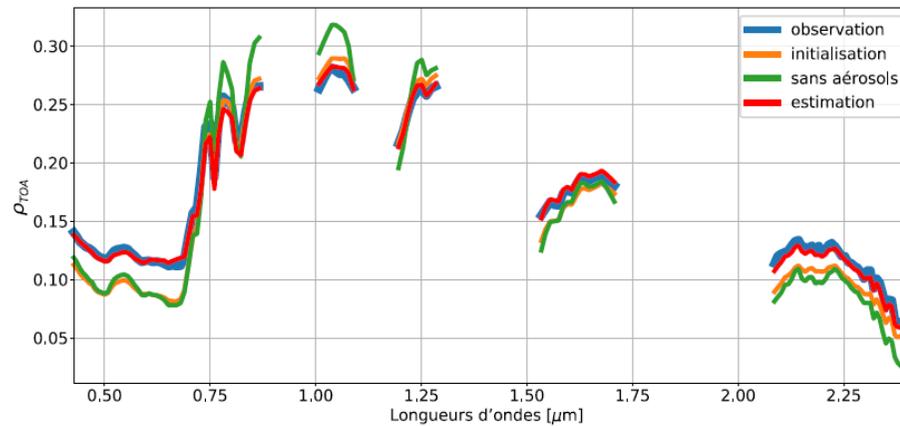
## Use of DOF and convergence to create the plume mask



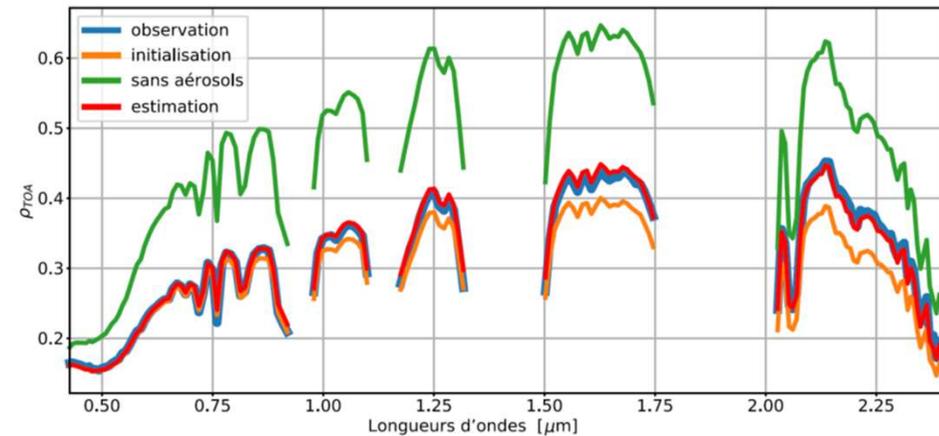
## Sinter Plant



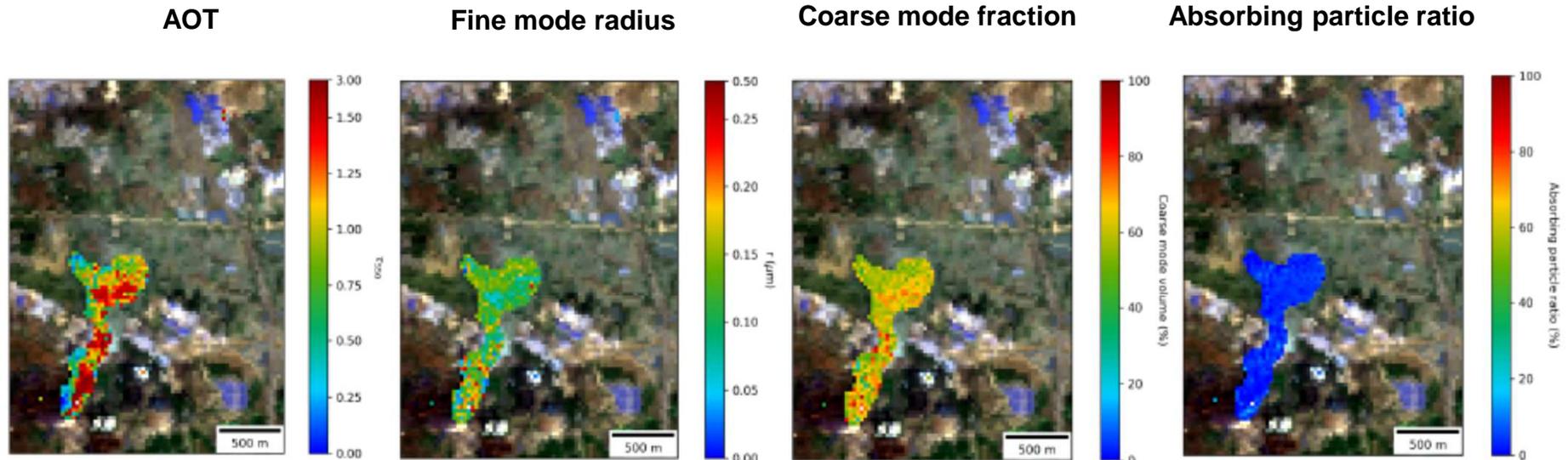
## Coal-fired plant



## Flaring



# Exemples de cartes en propriétés d'aérosols

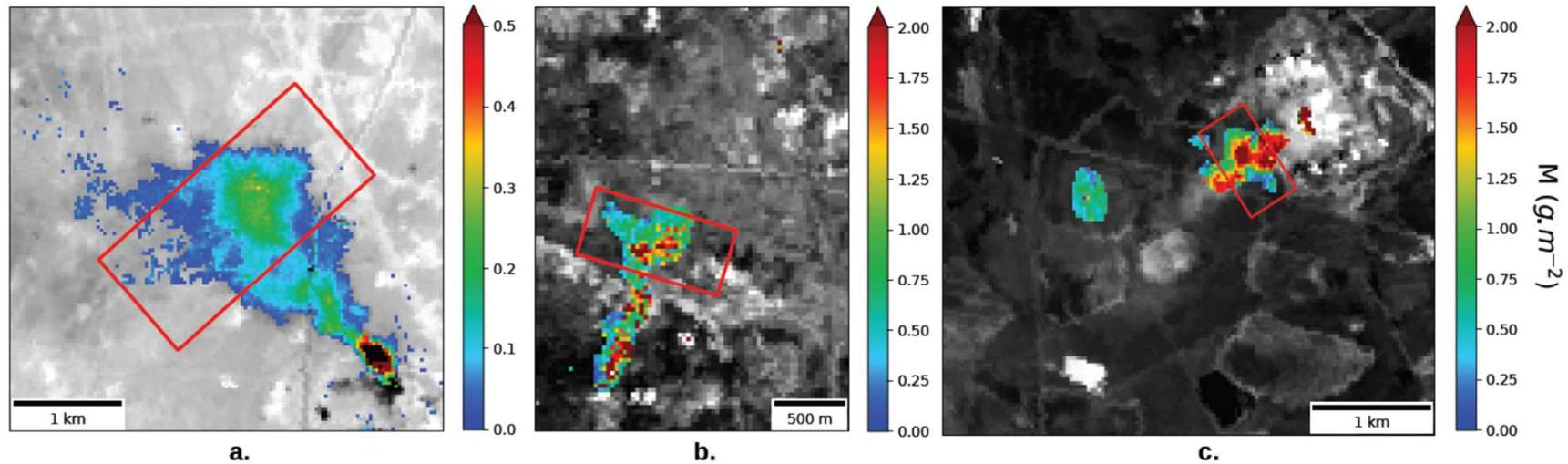


Sinter factory plume aerosol properties

## Résultats moyens pour les différents sites industriels

	flaring	sinter	coal-fired
$r_{median}$ ( $\mu\text{m}$ )	0.12	0.11	0.10
$\delta$ (no unit)	0.27	0.94	1.27
$V_{coarse}$ (%)	46	59	81
$V_{soot}$ (%)	100.0	3.6	10.4

# Bilans massiques et incertitudes



Plume surface mass (in  $g \cdot m^{-2}$ ) retrieved for (a) flaring emission, (b) sinter plant emission, and (c) coal-fired plant emission. Red rectangles are the selected area for mass flow rate estimation.

## Débits estimés (g/s)

	flaring	sinter	coal-fired
Fine mode	394	383	131
Coarse mode	446	965	926
Total	840	1348	1057

## Incertitudes (g/s)

	flaring	sinter	coal-fired
Total	218	721	418

## Contributions relatives (%) à l'incertitude

	flaring	sinter	coal-fired
$r_m$	6	21	21
$\delta$	16	41	28
$V_{coarse}$	66	25	15
$V_{abs}$	-	2	2
$\rho_a$	12	11	34
surface mass	34	7	40
wind speed	66	93	60

# Conclusions

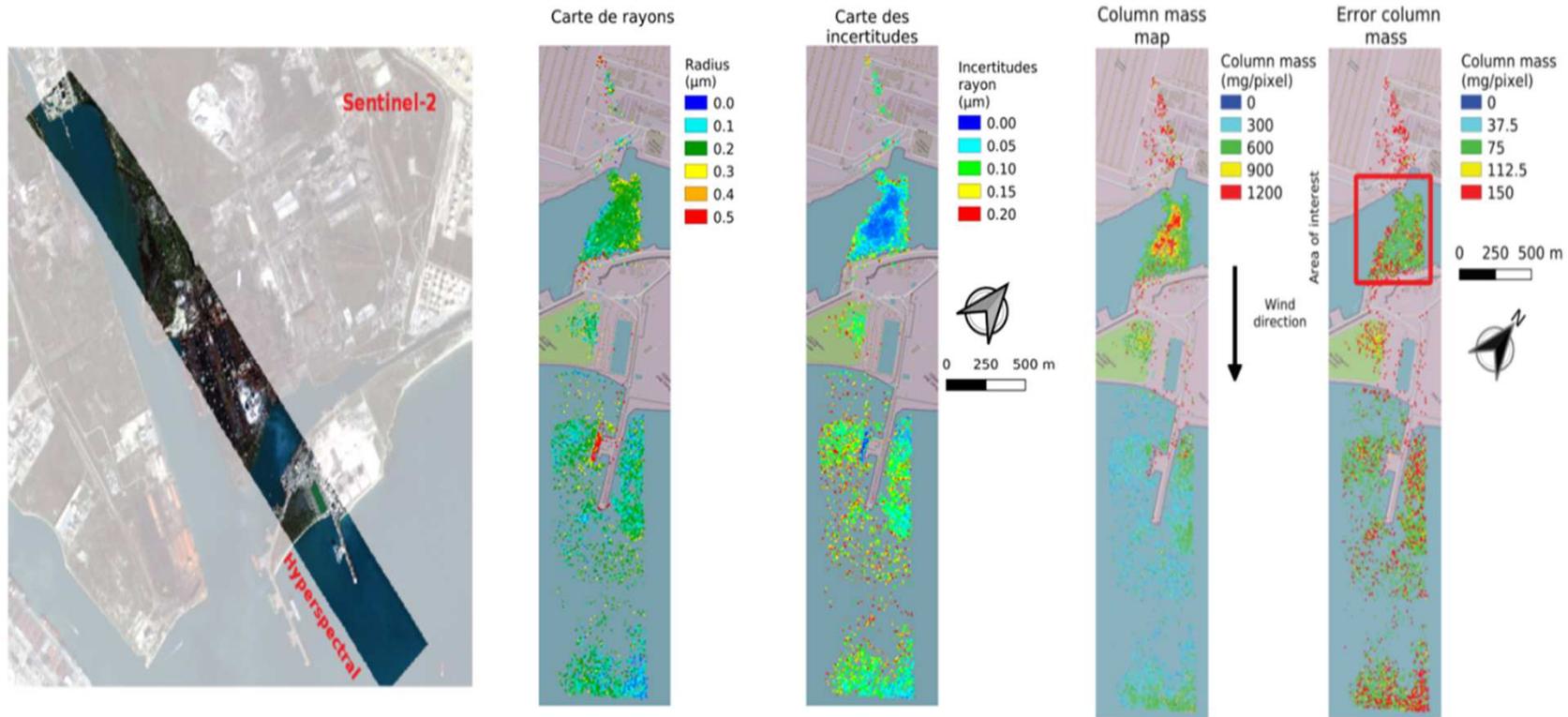
**Développement d'une méthodologie permettant de restituer à partir d'imagerie spectrale satellite les concentrations massiques et les débits d'émissions de particules émises par différents sites industriels.**

**Il existe un réel besoin de campagne de mesures in-situ pour améliorer les a priori sur les aérosols et pour valider ces produits à l'échelle d'une cheminée ou d'un site industriel.**

**MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION 😊**



# Application to airborne data (10 m spatial resolution)



Pour ce panache on estime un débit massique de l'ordre de 25 g/s et une concentration locale (sous l'hypothèse d'une extension verticale de 100 m) moyenne de l'ordre de 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  dans le panache et des valeurs supérieure à 1  $\text{mg}/\text{m}^3$  proche de la source pour une incertitude estimée environ à 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .