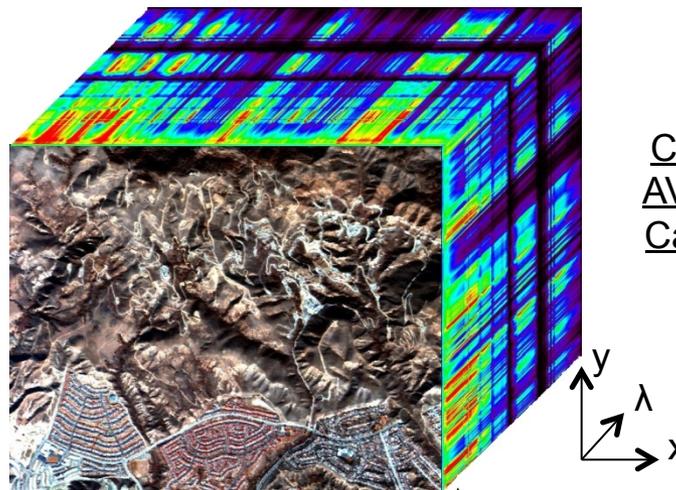


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# DÉTECTION DE GAZ INDUSTRIELS PAR FILTRAGE ADAPTÉ CTMF EN IMAGERIE HYPERSPECTRALE



Cube hyperspectral  
AVIRIS du site Aliso  
Canyon (Etats-Unis)

AURÉLIE QUÉMÉNER (CEA), RODOLPHE MARION (CEA)

## Etude des rejets gazeux industriels :

- Enjeux scientifiques (pollution, qualité de l'air, climat, etc.)
- Sécurité & Défense (caractérisation de sites industriels)

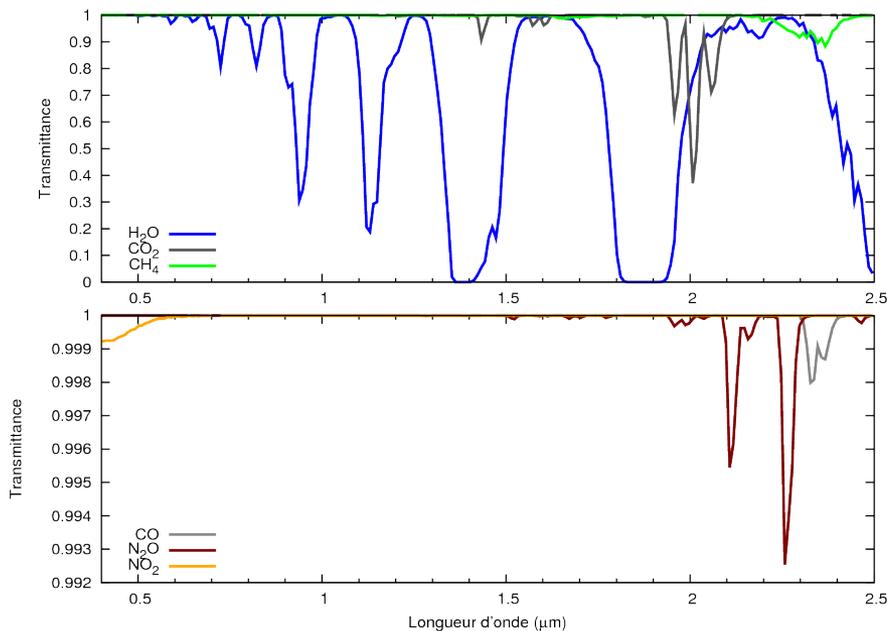
## Imagerie hyperspectrale adaptée :

- Résolution spatiale (métrique ou décimétrique) → analyse locale à l'échelle des sites industriels
- Continuum spectral [0,4 - 2,5]  $\mu\text{m}$  et résolution spectrale de 10 nm → accès à plusieurs gaz industriels ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ )

## Objectif de l'étude :

- Développement d'un outil opérationnel pour la détection de rejets gazeux industriels par imagerie hyperspectrale

- Rejets gazeux émis par les industries
- Filtre de détection CTMF
- Détection de panaches
  - CO<sub>2</sub> émis par les industries (Moss Landing, Mount Storm)
  - CH<sub>4</sub> (Inglewood, Aliso Canyon)
- Perspectives : estimation des concentrations gazeuses et inversion du débit de la source

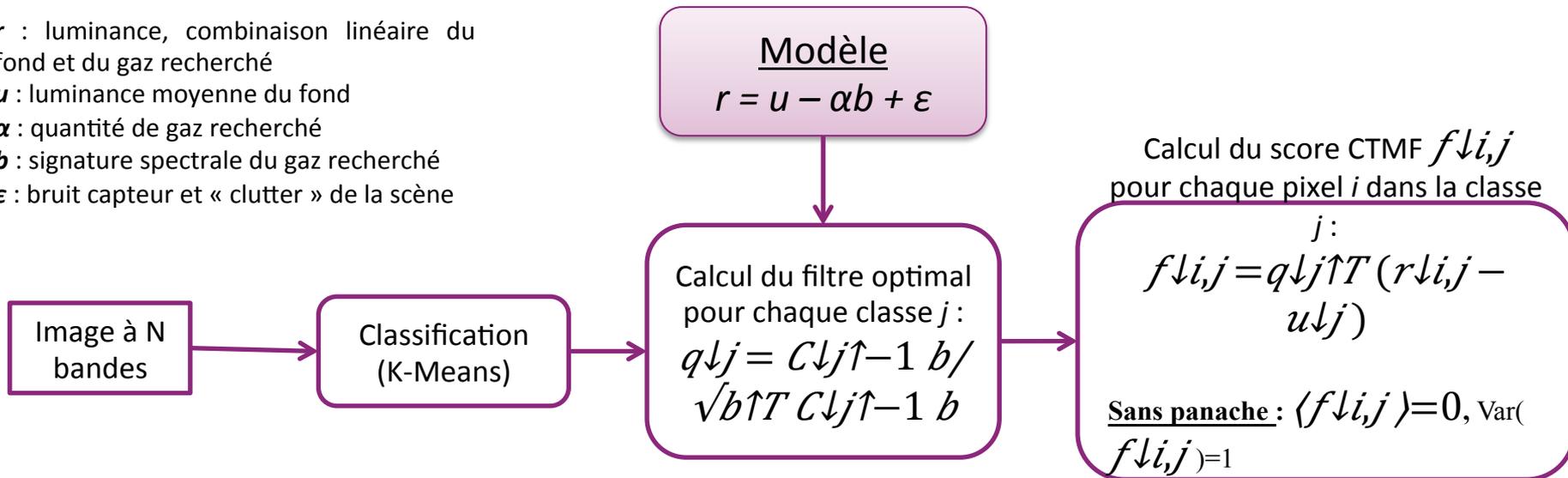
Gaz détectables dans le domaine  $[0,4 - 2,5] \mu\text{m}$ 

- 6 gaz d'intérêt industriel présentent des absorptions observables dans le domaine  $[0,4 - 2,5] \mu\text{m}$
- Variations rapides des spectres en fonction de la longueur d'onde et absorptions localisées spectralement  
 ⇒ Séparation gaz/surface

Transmittances de  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{CO}$   
 (simulations MODTRAN, modèle US 1976 Standard,  
 résolution AVIRIS)

# DÉTECTION DES GAZ : FILTRE CTMF (CLUSTER-TUNED MATCHED FILTER\*)

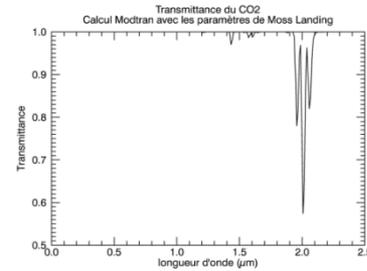
$r$  : luminance, combinaison linéaire du fond et du gaz recherché  
 $u$  : luminance moyenne du fond  
 $\alpha$  : quantité de gaz recherché  
 $b$  : signature spectrale du gaz recherché  
 $\epsilon$  : bruit capteur et « clutter » de la scène



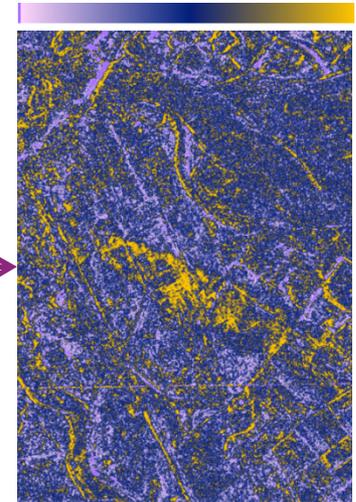
**Avec panache** :  $f(i,j) > 1$   
 non détection    détection



K-Means (10 classes)



Détection CTMF



\* (Funk et al., 2001)

# SIGNATURE SPECTRALE DU GAZ ÉQUATION DU TRANSFERT RADIATIF

## Sans panache

$$L(\lambda) = L_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) + E_{\downarrow sfc}(\lambda) / \pi \rho(\lambda) T_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda)$$

## Avec panache

$$L_{\uparrow gaz}(\lambda) = L_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) + E_{\downarrow sfc}(\lambda) / \pi \rho(\lambda) T_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) e^{-(1/\mu_0 N_{\downarrow gaz} k_{\downarrow gaz}(\lambda) \Delta z)}$$

$$L_{\uparrow gaz}(\lambda) \cong L_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) + E_{\downarrow sfc}(\lambda) / \pi \rho(\lambda) T_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)}$$

Différentiel de luminance

$$\Delta L(\lambda) = -n_{\downarrow c} E_{\downarrow sfc}(\lambda) / \pi \rho(\lambda) T_{\downarrow atm \uparrow}(\lambda) k_{\downarrow gaz}(\lambda)$$



-  $\alpha$

$b$

Coefficient d'absorption  $k_{\downarrow gaz}(\lambda)$

$\lambda$  : longueur d'onde

$L$  : luminance en entrée du capteur

$\rho$  : réflectance de la surface

$E_{\downarrow sfc}$  : éclairement incident sur la surface

$L_{\downarrow atm \uparrow}$  : luminance atmosphérique montante

$T_{\downarrow atm \uparrow}$  : transmittance atmosphérique montante

$N_{\downarrow gaz}$  : colonne de gaz

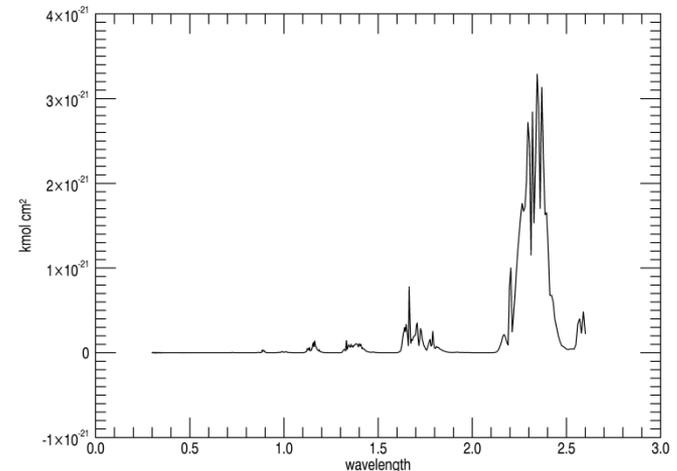
$k_{\downarrow gaz}$

Modèle

$$r = u - \alpha b + \epsilon$$

$$q_{\downarrow} = C_{\downarrow j} \lambda^{-1} b / \sqrt{b T}$$

CH<sub>4</sub>



## CENTRALE THERMIQUE DE MOSS LANDING\* (AVIRIS)

## ■ Jour et heure d'acquisition

28 septembre 2011

20<sup>H</sup>08 (GMT)

## ■ Géométrie de l'image

Altitude du sol : 17m

Altitude de l'avion/sol : 3,2km

Taille pixel = 2,7m

Coordonnées : 36,80N – 121,787W

Zénith solaire = 39°

Azimut solaire = 184,2°

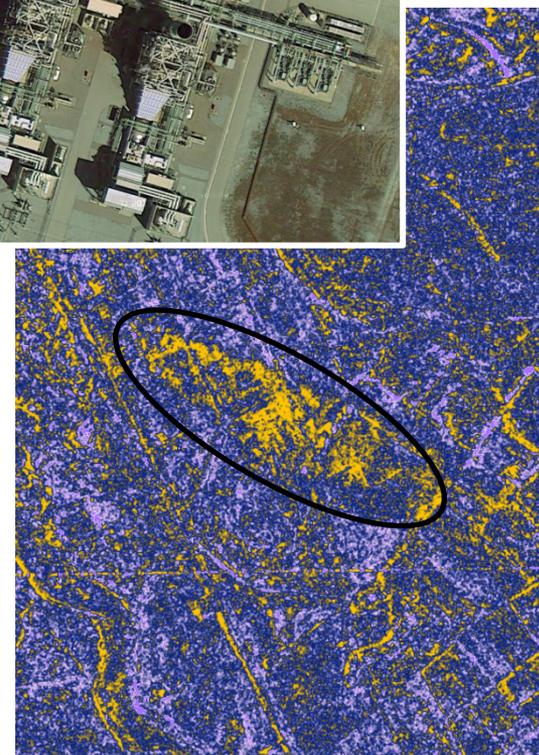
## ■ Atmosphère (ATCOR)

Mid-Latitude Summer

Aérosols : Maritime 80km de visibilité

H<sub>2</sub>O = 1,84g/cm<sup>2</sup>

## ■ Vérité terrain

Emission de CO<sub>2</sub> : 1,8.10<sup>6</sup> tonnes/an

## CENTRALE THERMIQUE DE MOUNT STORM\* (AVIRIS)

## ■ Jour et heure d'acquisition

02 juillet 2008

17<sup>H</sup>48 (GMT)

## ■ Géométrie de l'image

Altitude du sol : 990m

Altitude de l'avion/sol : 19,2km

Taille pixel = 16,4m

Coordonnées : 39,2N – 79,265W

Zénith solaire= 25,5°

Azimut solaire = 122,5°

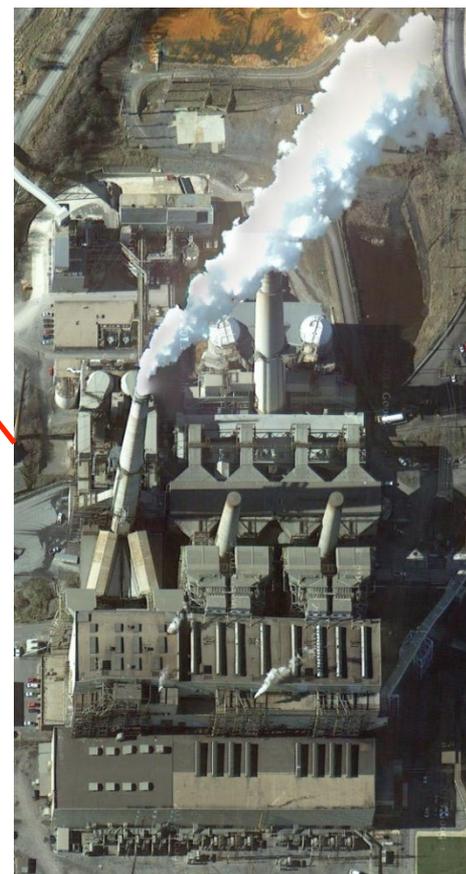
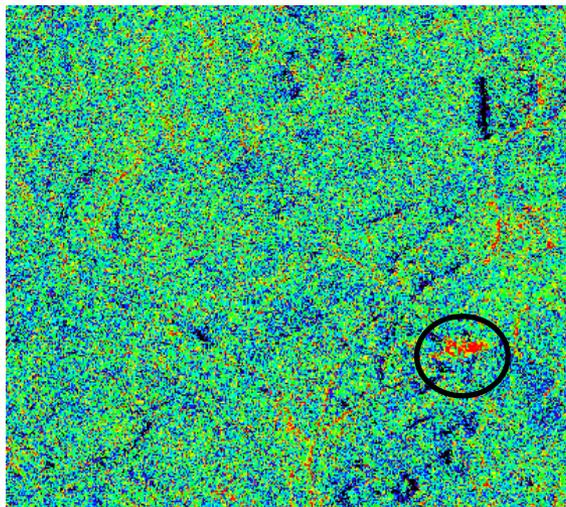
## ■ Atmosphère (ATCOR)

Mid-Latitude Summer

Aérosols : Rural 80km de visibilité

H<sub>2</sub>O = 1,25g/cm<sup>2</sup>

## ■ Vérité terrain

Emission de CO<sub>2</sub> : 9,5.10<sup>6</sup> tonnes/an

# FUITE DE CH<sub>4</sub> AU NIVEAU D'UN RÉSERVOIR D'HYDROCARBURES (INGLEWOOD\*)

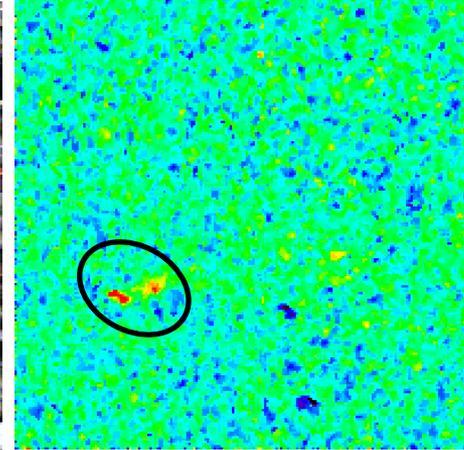
Image AVIRIS à 3m de résolution spatiale



Zoom sur les réservoirs d'hydrocarbures



Image hyperspectrale AVIRIS



Détection d'une fuite de CH<sub>4</sub>

- Détection de faibles quantités de CH<sub>4</sub> en aéroporté
  - Fuites de pipelines
  - Remplissage des réservoirs
  - Etc.
  
- Cas d'AVIRIS-NG\*\* : ≈0,1 kT/an

# DÉTECTION DU CH<sub>4</sub> : ALISO CANYON

- **Localisation** : États-Unis, 20km au nord de Los Angeles (34°18'54"N 118°33'51"W)
- **Description** : site de stockage de méthane par SoCalGas Company (110 puits)
- **Origine** : fuite de méthane au niveau du puit SS-25
- **Date** : du 23 octobre 2015 au 18 février 2016
- **Moyens** : échantillons au sols, mesures aéroportées
- **Émissions** : jusqu'à 58 tonnes de méthane par heure (28/11/2015)
- **Total** : 97 100 tonnes de CH<sub>4</sub>

Date of Flight	Leak Rate Measured [kilogram methane per hour]
Nov 7th, 2015	44,000
Nov 10th	50,000
Nov 28th	58,000
Dec 4th	43,000
Dec 12th	36,000
Dec 23rd	30,300
Jan 8th, 2016	23,400
Jan 12th	21,500
Jan 21st	19,600
Jan 26th	20,700
Feb 4th	20,600
Feb 11th	950
Feb 13th	660

Source SoCalGas



Site d'étude Aliso Canyon situé à 2km des habitations de Porter Ranch (image Pléiades du 08/01/2016)



Zoom sur le puit SS-25



Schéma illustrant la fuite de méthane

# ALISO CANYON : AVIRIS



Image hyperspectrale AVIRIS du 12/01/2016

## Caractéristiques des images :

Résolution spatiale : 15,5 m (a), 6,6 m (b), (c) et (d)

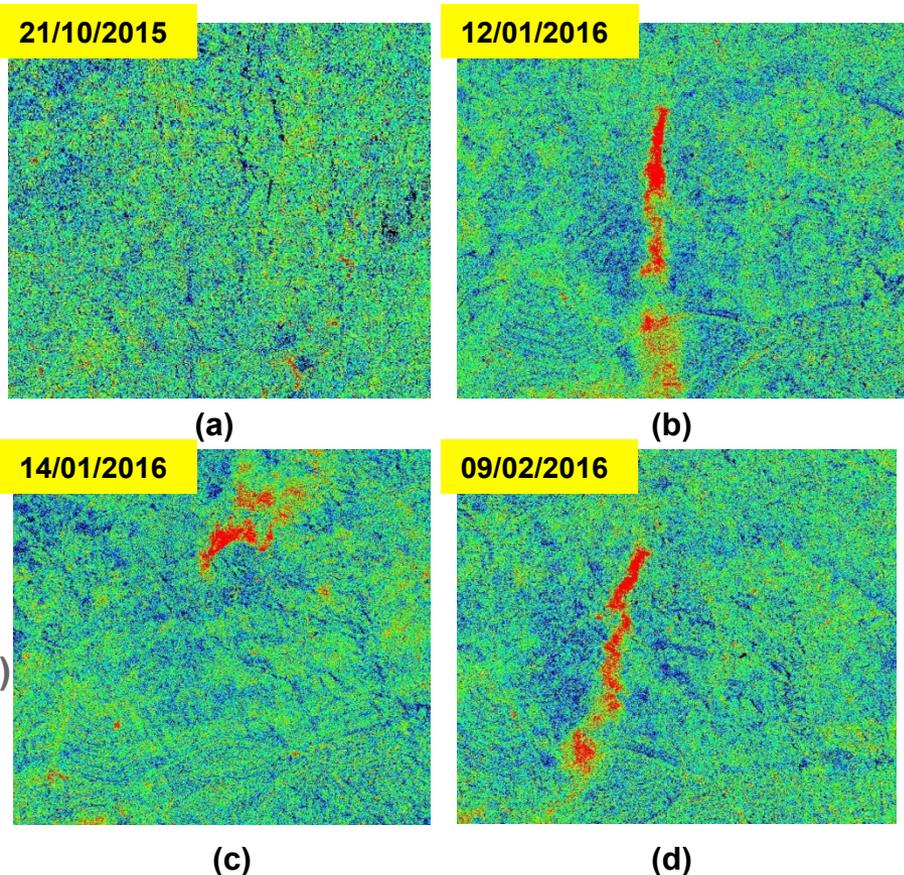
Altitude capteur : 20km (a), 7,8 km (b), (c) et (d)

(a) avant le début de la fuite → pas de détection

(b) détection → 21,5 T/h (0,19 MT/an)

(c) détection → 21,5 T/h (0,19 MT/an)

(d) détection → 20,6 T/h (0,18 MT/an)



Cartes de détection du  $\text{CH}_4$  à partir d'images hyperspectrales AVIRIS

## ALISO CANYON : HYPERION\*



	Date	Emissions (T/h)
a	24/12/2015	30,3 ± 6,1
b	01/01/2016	30 ± 6
c	12/01/2016	21,5 ± 4
d	26/01/2016	20,6 ± 4,1

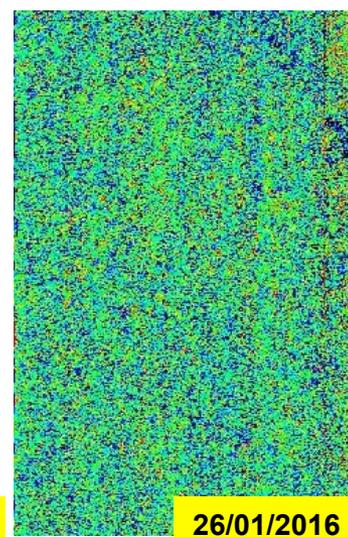
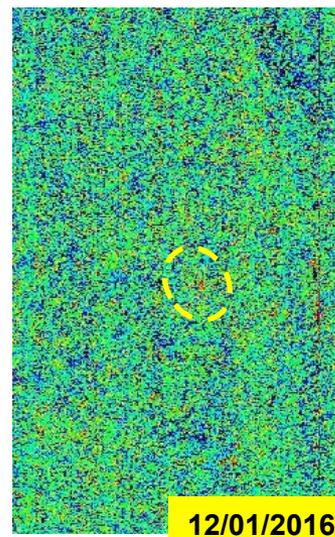
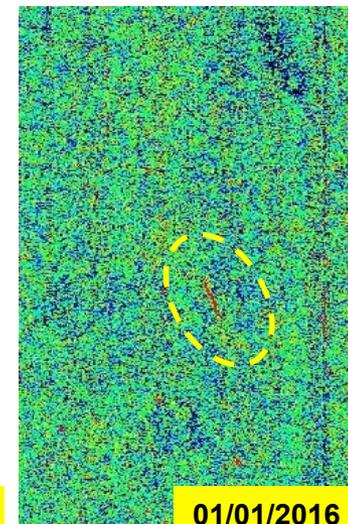
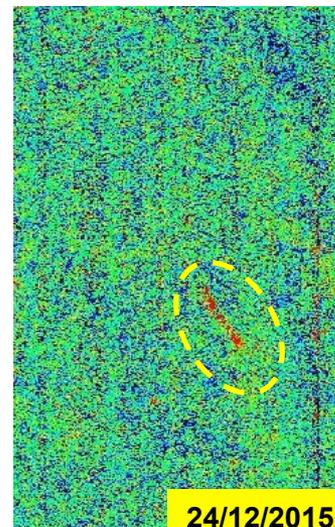


Image hyperspectrale Hyperion du 01/01/2016 (emprise de l'image AVIRIS en rouge)

- Résolution spatiale des images : 30m
- Détection d'un panache de  $\text{CH}_4$  (a) et (b)
- Quelques pixels de détection de  $\text{CH}_4$  (c)
- Si émissions < à 21 T/heure ( $\approx 0,18$  MT/an) → pas de détection à partir d'image hyperspectrale satellitaire Hyperion (d)

\* (Quéméner & Marion, en préparation)

- Différentiel de luminance :

$$\Delta L(\lambda) = L \uparrow_{\text{gaz}}(\lambda) - L(\lambda) = -n \downarrow c \ E \downarrow_{\text{sol}}(\lambda) / \pi \ \rho(\lambda) \ T \downarrow_{\text{atm}} \uparrow(\lambda) \ \mu \downarrow 0 + \mu \downarrow v / \mu \downarrow 0 \ \mu \downarrow v \ \kappa \downarrow_{\text{gaz}}(\lambda)$$

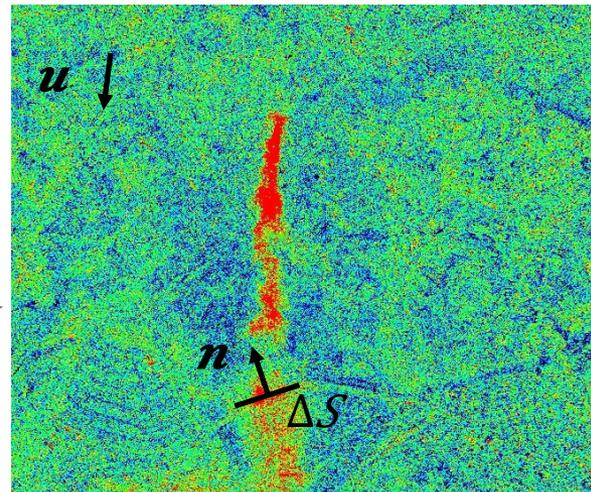
signature b

## Estimation du débit\*

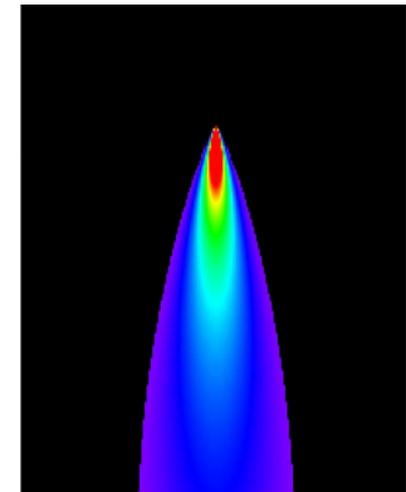
- Méthode 1 : Gaussian plume inversion

$$n \downarrow c(x, y) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \sigma \downarrow y(x) u} e^{-1/2 \left( \frac{y}{\sigma \downarrow y(x)} \right)^2}$$

$g \cdot s^{-1}$  (pointing to Q)  
 $g \cdot m^{-2}$  (pointing to  $n \downarrow c$ )  
 $m$  (pointing to  $\sigma \downarrow y$ )  
 $m \cdot s^{-1}$  (pointing to  $u$ )



Carte de détection d'un panache



Simulation d'un panache gaussien  
 10 100 200  $g \cdot m^{-2}$

- Méthode 2 : Gaussian integral inversion

$$Q \approx n \downarrow c \ u \cdot n \ \Delta S$$

\* (Krings et al., 2011), (Krings et al., 2013)

**MERCI**

**Question ?**