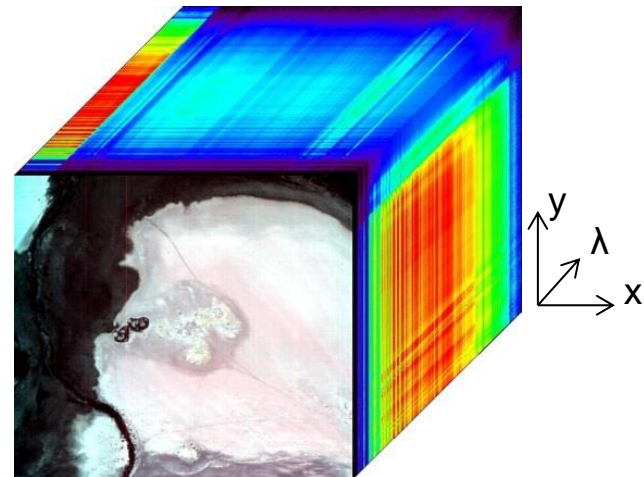


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

DÉTECTION DE GAZ PAR FILTRAGE ADAPTÉ CTMF EN IMAGERIE HYPERSPECTRALE DANS LE DOMAINE INFRAROUGE THERMIQUE



Cube hyperspectral HyTES du site Salton Sea (Etats-Unis)

AURÉLIE QUÉMÉNER (CEA), RODOLPHE MARION (CEA)

www.cea.fr

SFPT- GH Montpellier | 17-18 mai 2018

- Contexte et objectifs
- Signatures des gaz CH_4 , NH_3 et C_2H_4
- Filtre de détection CTMF
- Etude des seuils de détection en IRT
 - Protocole de génération des images synthétiques
 - CH_4
 - NH_3
 - C_2H_4
- Détection de panaches sur images réelles
 - CH_4 : émission par des puits de pétrole (Kern River)
 - NH_3 : dégagement naturel (Salton Sea)
 - C_2H_4 : émission contrôlée (Québec)
- Conclusions et perspectives

Etude des rejets gazeux industriels :

- Enjeux scientifiques (pollution, qualité de l'air, climat, etc.)
- Sécurité & Défense (caractérisation d'activités industrielles, etc.)

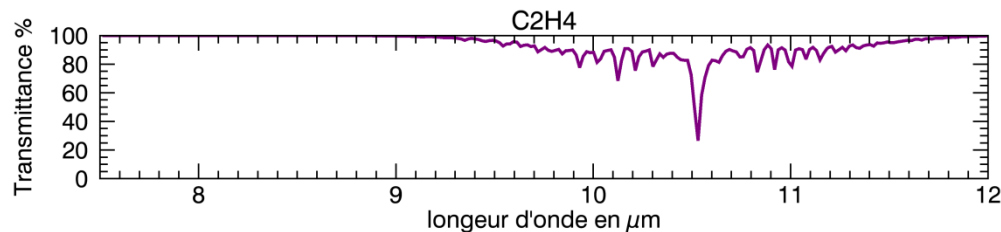
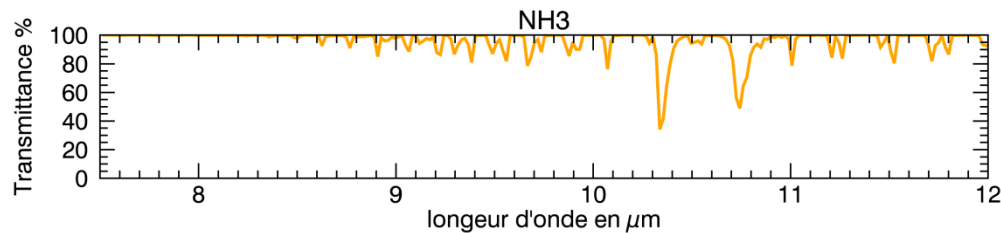
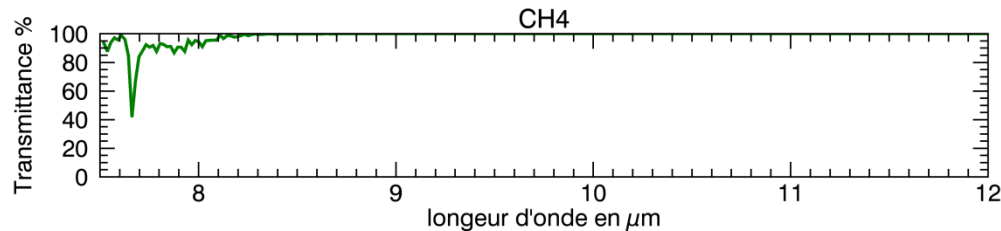
Imagerie hyperspectrale adaptée :

- Résolution spatiale (métrique ou décamétrique) → analyse locale à l'échelle des sites industriels
- Continuum spectral [7,5 – 12,0] μm et résolution spectrale de ≈ 20 nm → accès à plusieurs gaz (CH_4 , NH_3 , C_2H_4 , CO_2 , N_2O , SO_2 , etc.)

Objectifs de l'étude présentée :

- Etude des seuils de détection de CH_4 , NH_3 et C_2H_4
- Application sur des images réelles HyTES et TEOPOS

Domaine spectral [7,5 – 12,0] μm



Transmittances de CH₄, NH₃ et C₂H₄ (simulations HITRAN à la résolution du capteur HyTES)

- Variations rapides des spectres en fonction de la longueur d'onde et absorptions localisées spectralement
⇒ Séparation gaz/surface

■ Conditions de simulations HITRAN :

- Modèle atmosphérique US Standard
- Température : 296 K
- Pression atmosphérique : 1 atm
- Profil Lorentzien des raies d'absorption
- Altitude : z = 0 km
- Chemin horizontal parcouru : $L_{\text{CH}_4} = 10^3$ m
 $L_{\text{NH}_3} = 10^7$ m
 $L_{\text{C}_2\text{H}_4} = 10^{18}$ m

Sans panache

$$L_{off}(\lambda) = L_{atm}^{\uparrow}(\lambda) + L_{ground}(\lambda) T_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$$

$$\text{Avec } L_{ground}(\lambda) = (1 - \rho(\lambda))B(\lambda, \theta_s) + \rho(\lambda) L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)$$

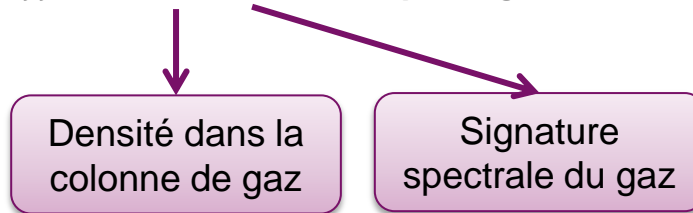
Avec panache

$$L_{on}(\lambda) = L_{atm}^{\uparrow}(\lambda) + L_{ground}(\lambda) T_{atm}^{\uparrow}(\lambda) T_p(\lambda) + L_p(\lambda) T_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$$

$$L_{on}(\lambda) = L_{off}(\lambda) + n_0 b(\lambda) [B(\lambda, \theta_p) - L_{ground}(\lambda)] T_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$$

Différentiel de luminance

$$\Delta L(\lambda) = L_{on}(\lambda) - L_{off}(\lambda) = n_0 b(\lambda) [B(\lambda, \theta_p) - L_{ground}(\lambda)] T_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$$



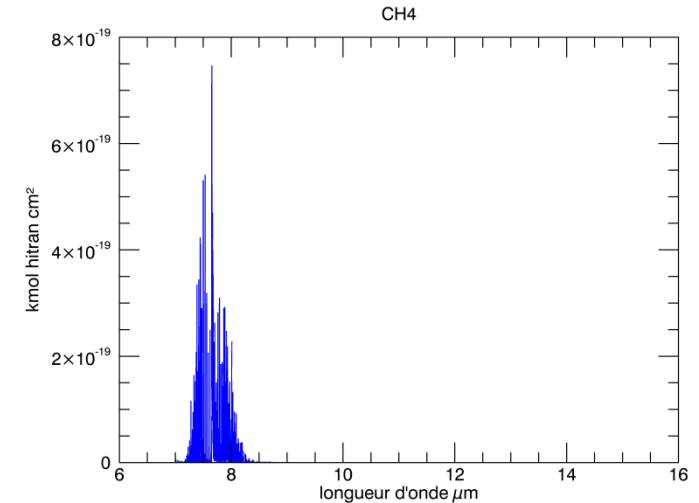
Signature:

$\theta_p < \theta_s$: absorption

$\theta_p > \theta_s$: émission

Modèle linéaire

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



* Hulley, *High spatial resolution imaging of methane and other trace gases with the airborne HyTES, AMT, 2016*

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

* (Funk et al., 2001)

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

Image à N bandes

Classification (K-Means)

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

Calcul du filtre optimal pour chaque classe j :

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

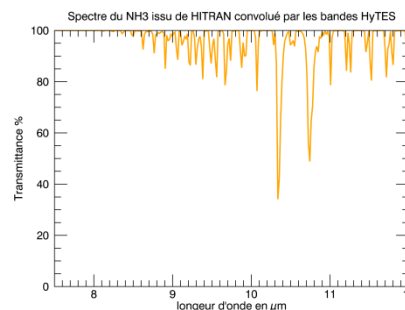
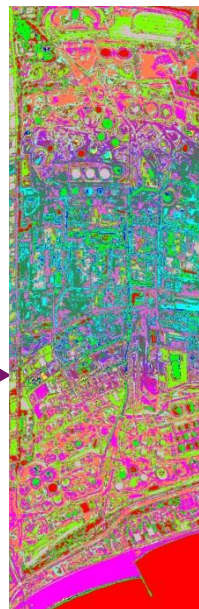
Calcul du score CTMF $f_{i,j}$ pour chaque pixel i dans la classe j :

$$f_{i,j} = q_j^T r_{i,j}$$

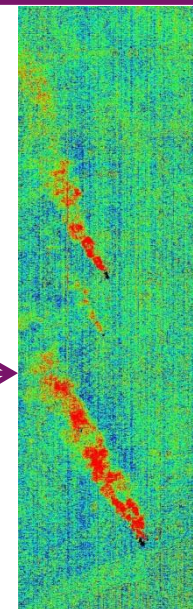
Sans panache : $\langle f_{i,j} \rangle = 0$, $\text{Var}(f_{i,j})=1$
Avec panache : $\langle f_{i,j} \rangle > 1$ absorption
 $\langle f_{i,j} \rangle < -1$ émission



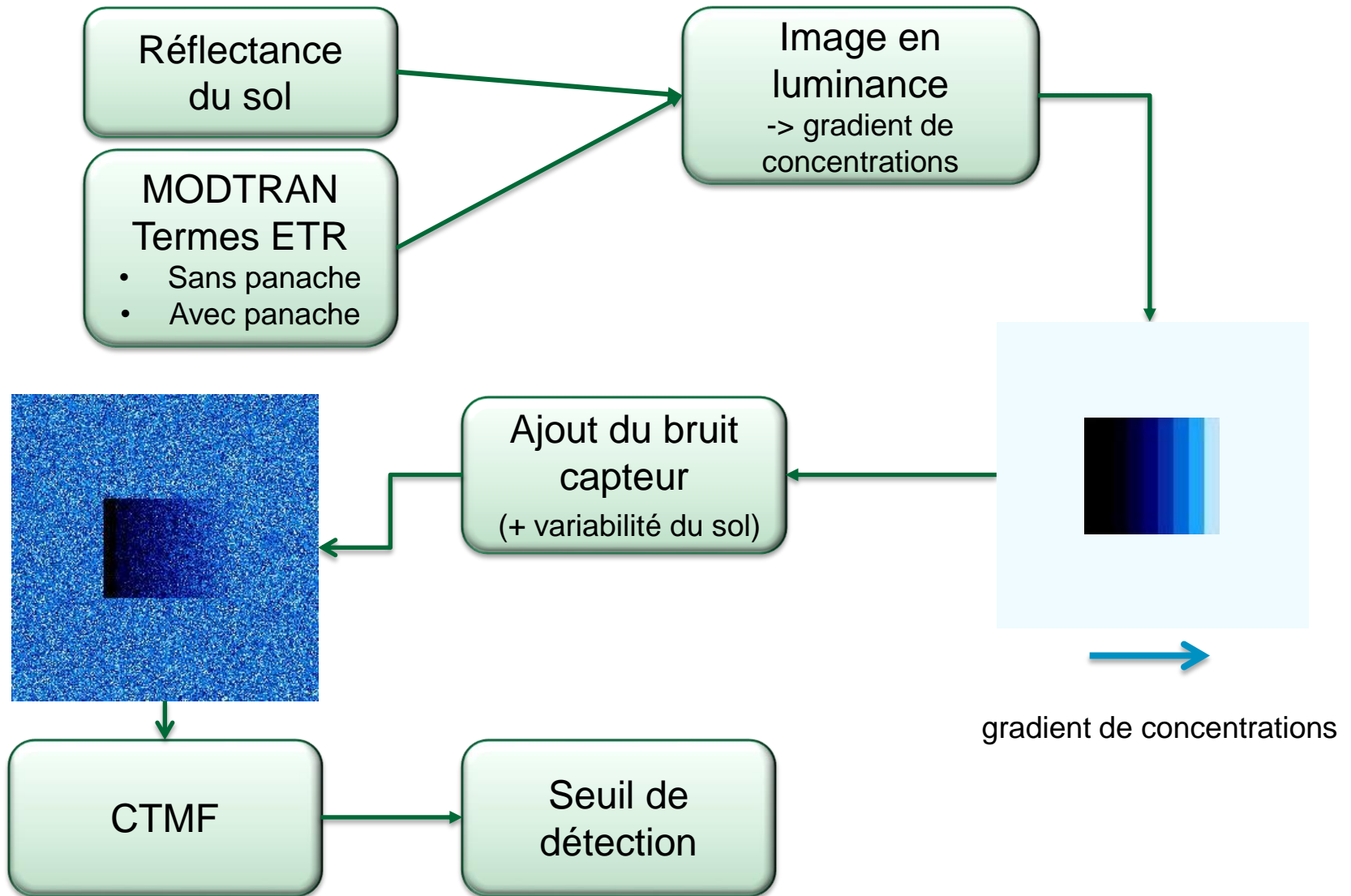
K-Means (15 classes)



Détection CTMF



PROTOCOLE DE GÉNÉRATION DES IMAGES SYNTHÉTIQUES



CH₄ : ÉTUDE DU SEUIL DE DÉTECTION

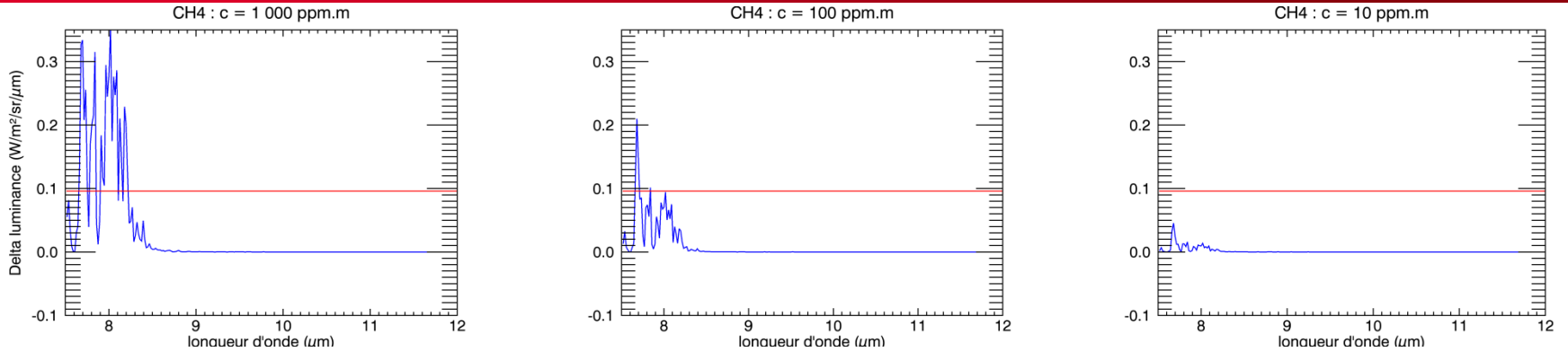


Figure 1 : différence de luminance au niveau du capteur sans et avec panache (bleu) et NEDL (rouge) de HyTES

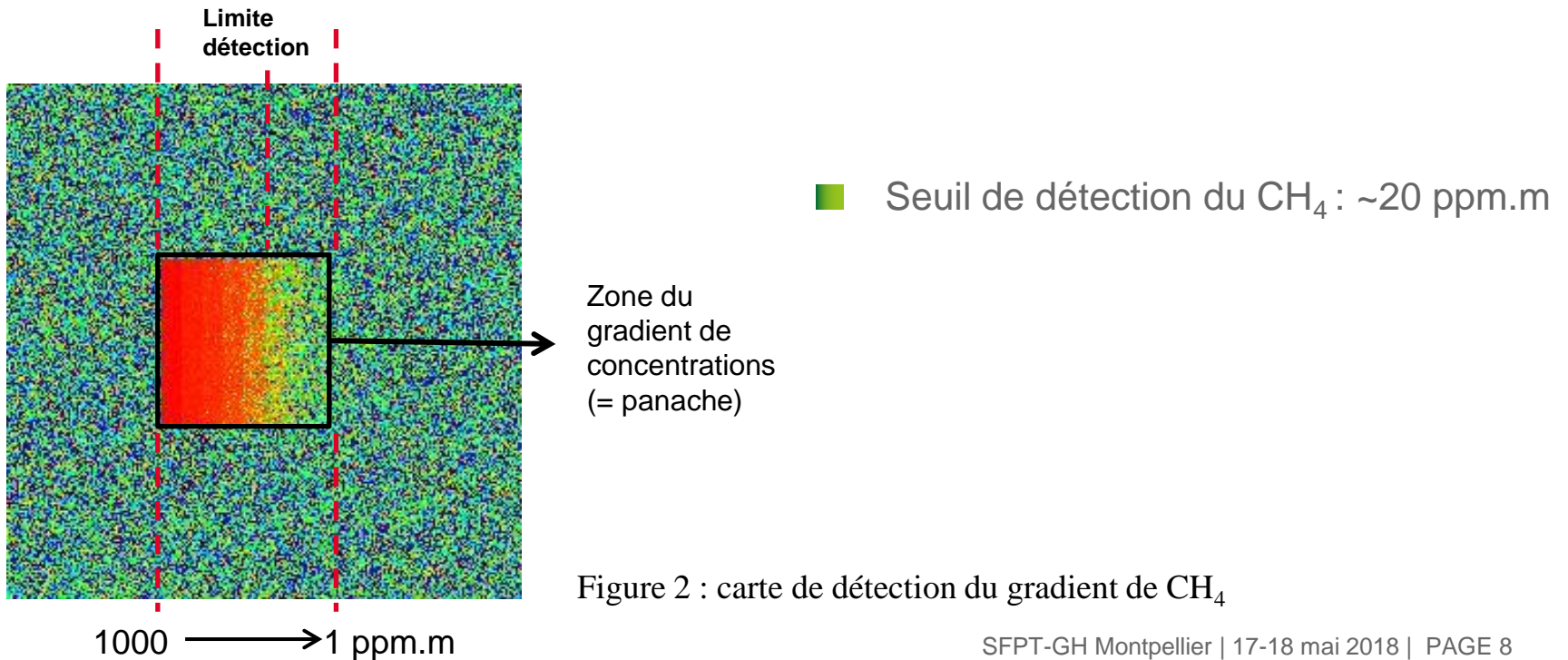


Figure 2 : carte de détection du gradient de CH₄

NH₃ : ÉTUDE DU SEUIL DE DÉTECTION

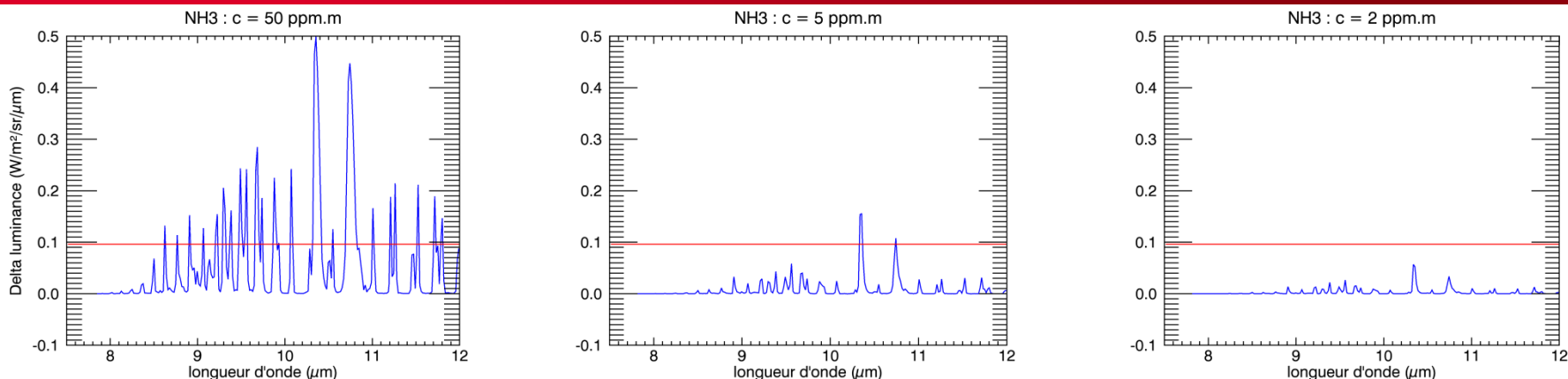
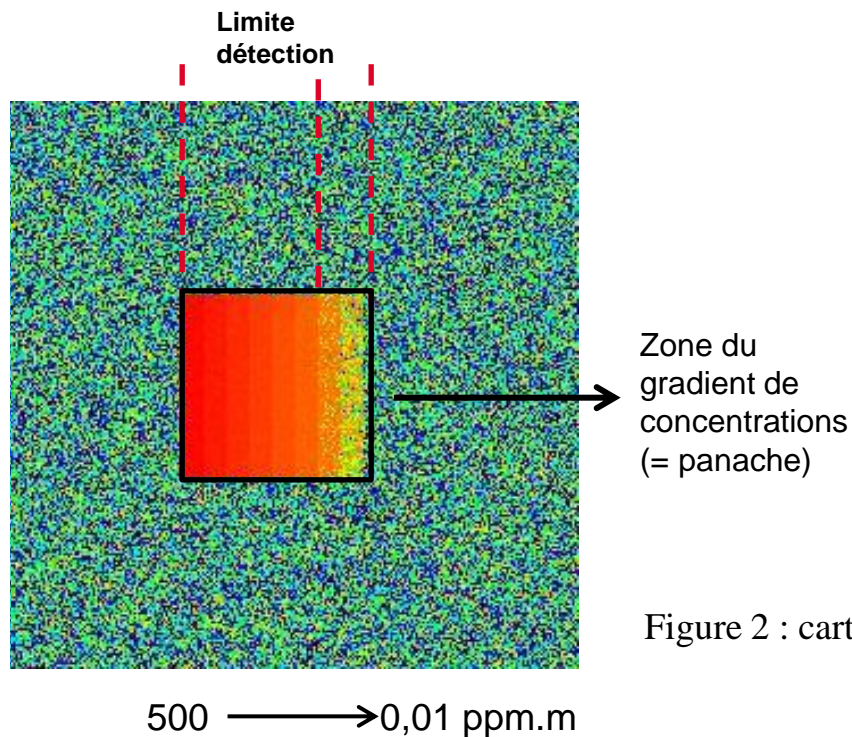


Figure 1 : différence de luminance au niveau du capteur sans et avec panache (bleu) et NEDL (rouge) de HyTES



■ Seuil de détection du NH₃ : ~ 5 ppm.m

Figure 2 : carte de détection du gradient de NH₃

C₂H₄ : ÉTUDE DU SEUIL DE DÉTECTION

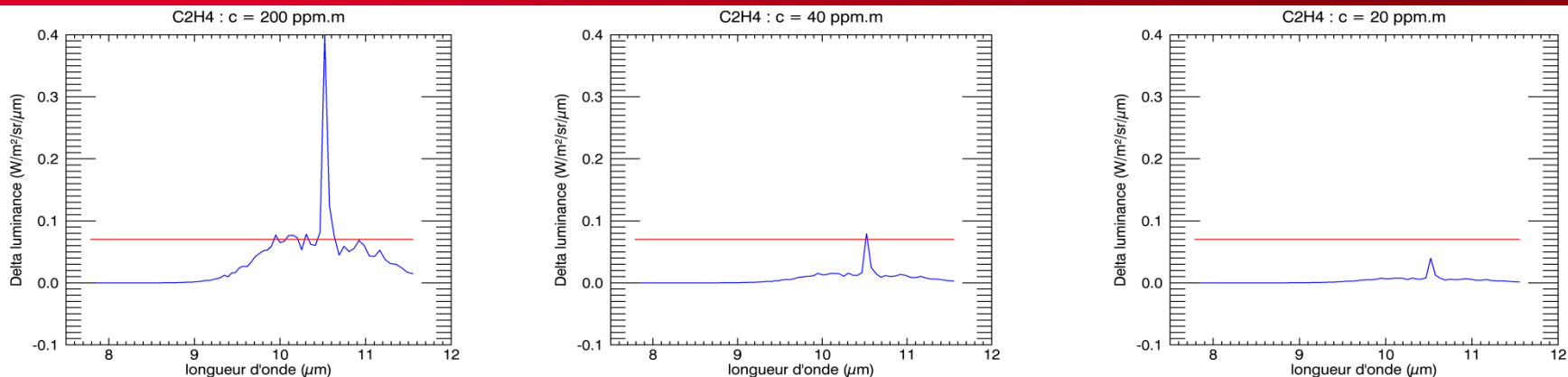
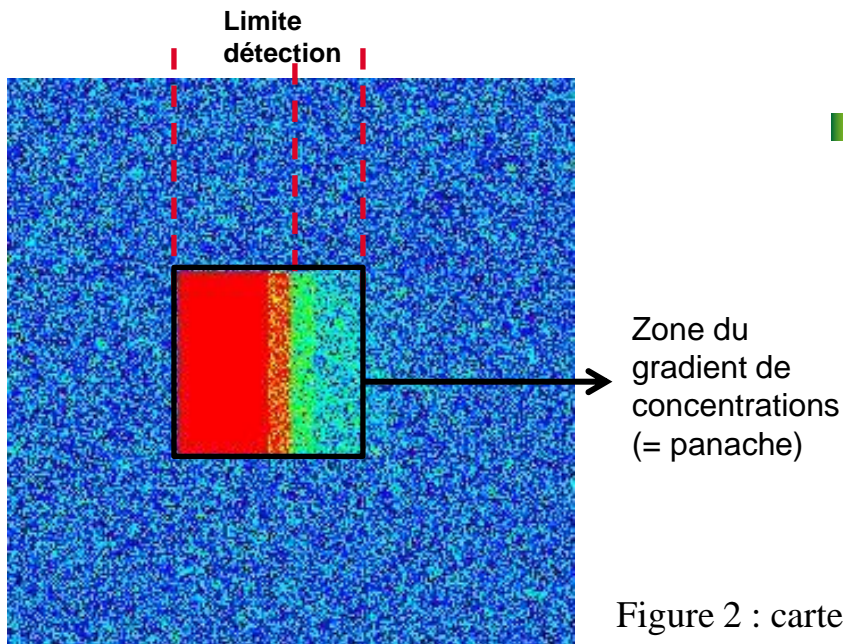


Figure 1 : différence de luminance au niveau du capteur sans et avec panache (bleu) et NEDL (rouge) de TELOPS



■ Seuil de détection du C₂H₄ : ~ 40 ppm.m

Figure 2 : carte de détection du gradient de C₂H₄

1000 → 10 ppm.m

■ Site

Kern River Oil, Baskerfield, CA
Plate-forme de forage, réservoirs

■ Date d'acquisition

8 juillet 2014

■ Géométrie de l'image

Altitude de l'avion/sol : 1,040 km

Taille pixel = 1,9 m

Coordonnées : 35,52N ; 119,09O

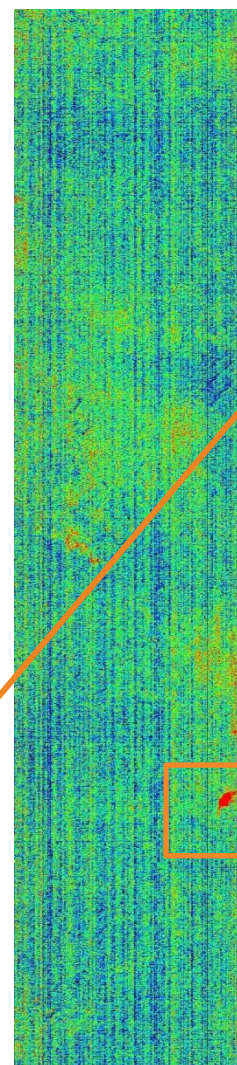
■ Détection

Méthane CH₄

■ Vérité terrain

De 500 à 1500 ppm.m

(Thompson & al, *Real-time remote detection and measurement for airborne imaging spectroscopy: a case study with methane*, 8,4383-4397,2015)



* HyTES : [7,5 -12,0] μm, 256 bandes, Image hyperspectrale
résolution spectrale ≈ 18 nm.

Détection CH₄

HYTES : SALTON SEA, ETATS-UNIS

■ Site

Mullet Island, Salton Sea, CA
Présence de fumerolles de NH_3

■ Date d'acquisition

6 juillet 2014

■ Géométrie de l'image

Altitude de l'avion/sol : 1,1 km

Taille pixel = 2,05 m

Coordonnées : 33,24N ; 115,90O

■ Détection

Ammoniac NH_3

■ Vérité terrain

Minimum détectable : 20 ppm.m

(Tratt & al, Remotely sensed ammonia emission from fumarolic vents associated with a hydrothermally active fault in the Salton Sea Geothermal Field, JGR, 2011)

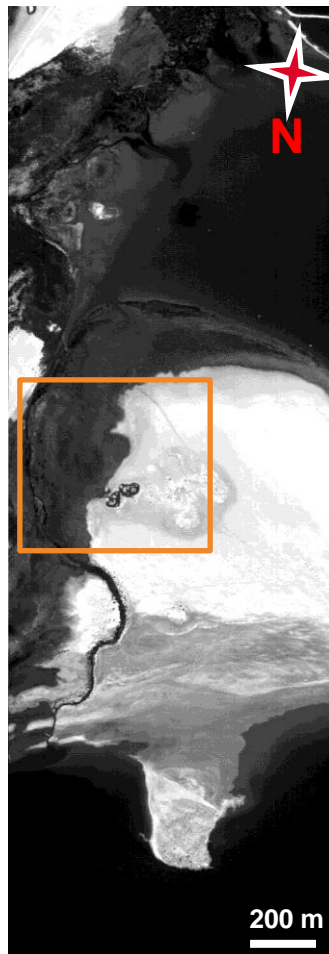
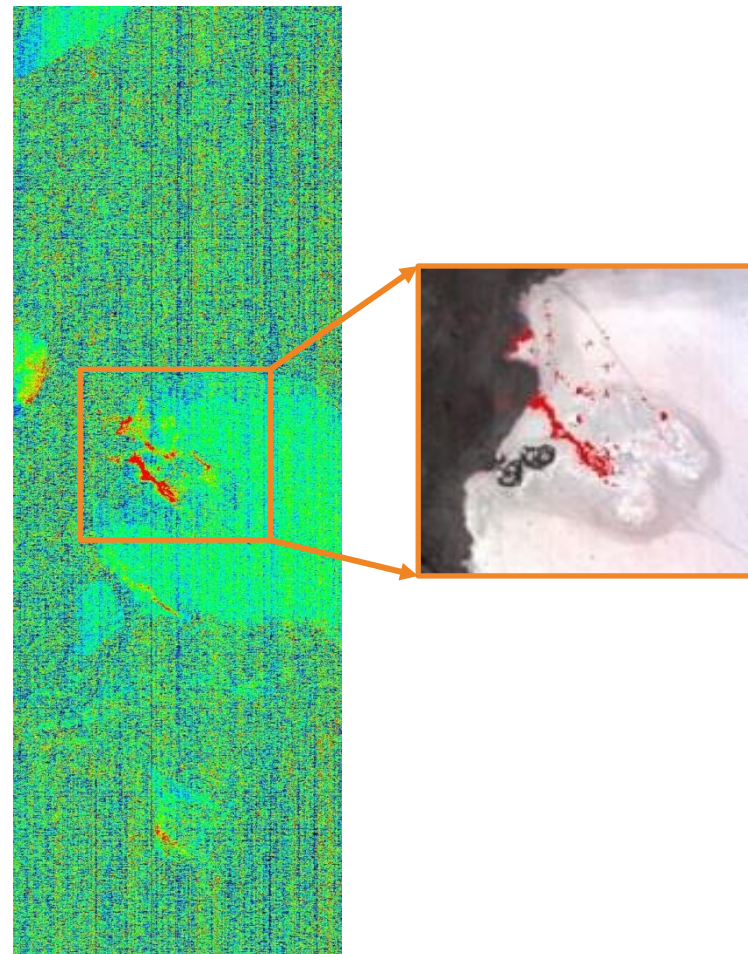


Image hyperspectrale



Détection de fumerolles de NH_3

■ Site

Québec, Canada

■ Date d'acquisition

2 juillet 2008

■ Géométrie de l'image

Altitude de l'avion/sol: 685 m

Taille pixel = 16,4 m

Coordonnées : 46,80N ; 71,33O

■ Détection

Dégagement de C_2H_4 sous
émission contrôlée

■ Vérité Terrain

500 ppm.m

(Idoughi & al, *Background Radiance for Gas*

Plume Quantification for Airbone Hyperspectral

Thermal Imaging, Hindawi, 2016)

*TELOPS : [7,7 – 11,8] μm , 85 bandes,

résolution spectrale 0,25 cm^{-1}

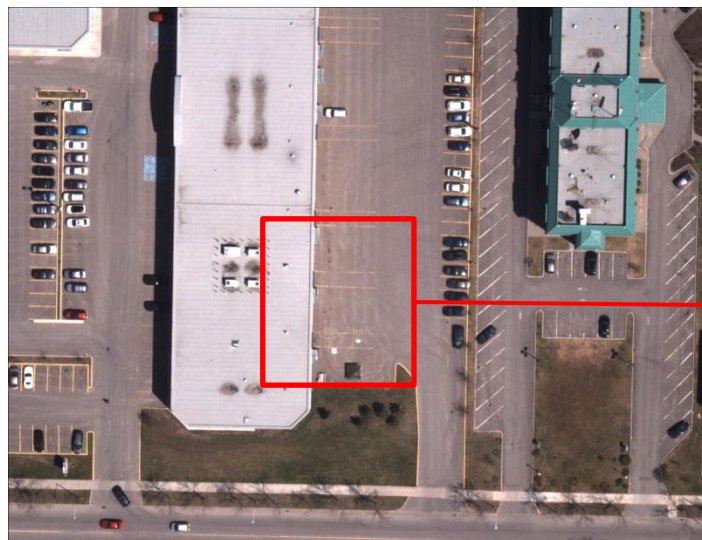


Image Google Earth

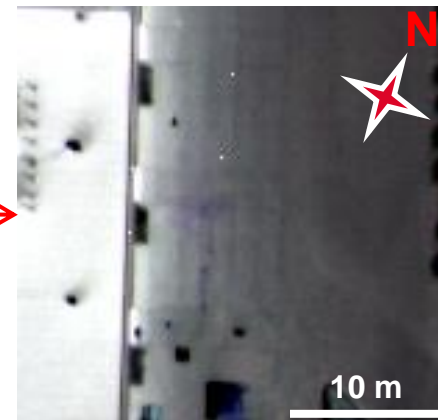
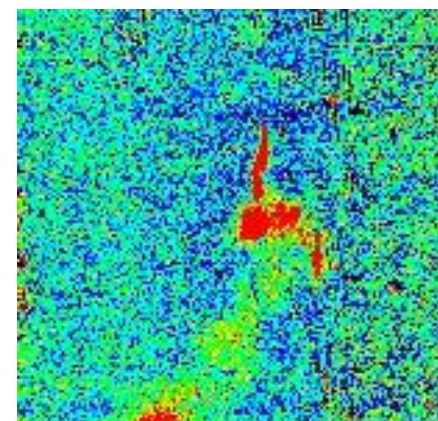


Image hyperspectrale



Carte de détection de C_2H_4

Conclusions

- Détection des 3 gaz (CH_4 , NH_3 et C_2H_4) dans le domaine $[7,5 - 12,0] \mu\text{m}$
- Discussion sur les seuils de détection
- Détection sur des images réelles (émissions industrielle, naturelle et contrôlée)

Perspectives

- Affiner les seuils de détection pour ces gaz et autres dans le domaine IRT (SO_2 , NO_2 , H_2S , etc.)
- Fausse détection (2 gaz absorbent dans la même région spectrale)
- Quelle domaine spectral privilégier si un gaz signe en bande I et en bande III?
- Passage de CTMF en quantification (inversion du débit d'émission des sources)

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex
T. +33 (0)1 XX XX XX XX | F. +33 (0)1 XX XX XX XX

Direction
Département
Service

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