

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



# POTENTIEL DE L'INSTRUMENT HYPXIM POUR LA DÉTECTION DE PANACHES DE CO<sub>2</sub> ÉMIS PAR LES INDUSTRIES – ÉTUDE PRÉLIMINAIRE



LYON

**CPE**

ÉCOLE SUPÉRIEURE  
DE CHIMIE PHYSIQUE ÉLECTRONIQUE  
DE LYON



Charles BODIN : 2<sup>ème</sup> année de l'école d'ingénieur CPE Lyon

Rodolphe MARION : encadrant CEA

[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

## Fin 19<sup>ème</sup> siècle : révolution industrielle

→ La pollution atmosphérique anthropique augmente

**CO<sub>2</sub>** : avant 280ppmv – aujourd'hui 390ppmv

rejets industriels CO<sub>2</sub> ≈ 20% des rejets atmosphériques en France en 2011

→ Besoin de mesurer le CO<sub>2</sub> atmosphérique à l'échelle globale mais aussi à l'échelle locale (site industriel)

## Echelle globale : sondeurs (e.g., IASI, AIRS, TES, SCIAMACHY, GOSAT)

1. Haute résolution spectrale

→ « Bonne » détection/mesure de gaz

2. Faible résolution spatiale (km<sup>2</sup>)

→ Surveillance à l'échelle locale impossible

## Echelle locale : imagerie hyperspectrale aéroportée et/ou spatiale

→ Compromis entre les résolutions spatiale (100m<sup>2</sup>) et spectrale (10nm)

# 1. Général : évaluer les limites de détection pour l'ensemble des gaz dans la gamme $[0,4 - 2,5\mu\text{m}]$ et pour chaque capteur

Evaluation du seuil de détection lié :

→ au bruit capteur (signal de référence AVIRIS)

Limites théoriques de détection								
	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>
Quantité minimale de gaz / concentration atmosphérique standard pour être détectable (%)								
AVIRIS	1,05	1,72	7,27	92	348	6,15	1,24	222
Hypxim	2,00	3,44	8,87	185	699	12,3	2,33	268
Débit au point source pour être détectable sur 500m (kt.an <sup>-1</sup> )								
AVIRIS	3 256	927	6,60	44,5	39,8	5,80	308 354	68,3.10 <sup>-3</sup>
Hypxim	6 186	1 855	8,04	89,6	79,8	11,6	578 164	82,7.10 <sup>-3</sup>

→ à la résolution spatiale

→ à la résolution spectrale

→ à la réflectance du sol

# 2. Aujourd'hui : évaluer la capacité d'Hypxim à détecter le CO<sub>2</sub>

2 images AVIRIS : centrales thermiques rejetant du CO<sub>2</sub>

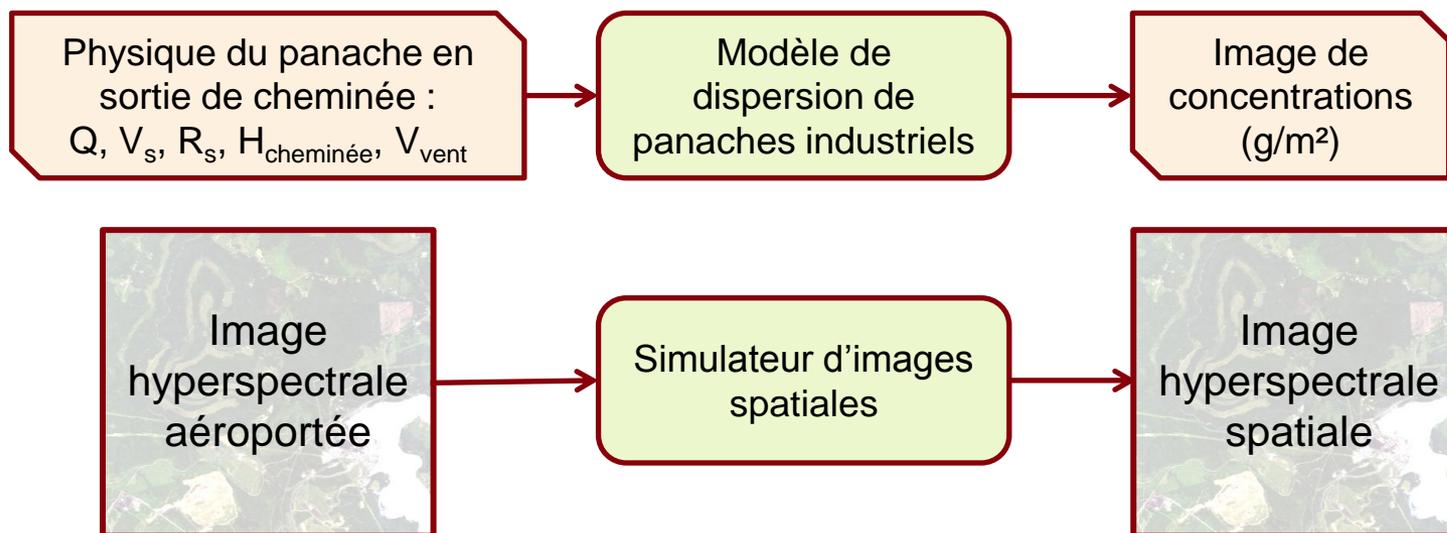
Simulation d'images spatiales

→ atmosphère, résolution spatiale, bruit, résolution spectrale

- Méthodologie
- Outils
- Illustrations
- Résultats
- Conclusions et perspectives

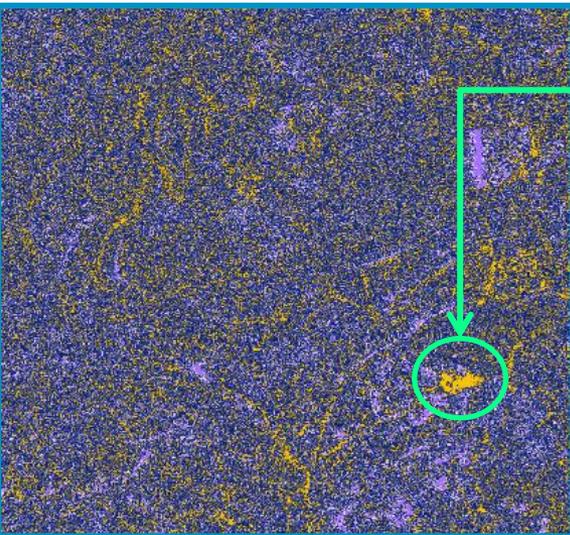
# MÉTHODOLOGIE : SIMULATION DE PANACHE ET D'IMAGE SPATIALE

DIRECT



← INVERSE

non détection    détection



Carte de détection  
du panache du CO<sub>2</sub>

panache

Algorithme de détection :  
*Cluster-Tuned Matched Filter*  
(CTMF)

Gaz recherché :  
H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O  
CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>



Image hyperspectrale  
contenant un panache

## ALGORITHME DE DÉTECTION CTMF

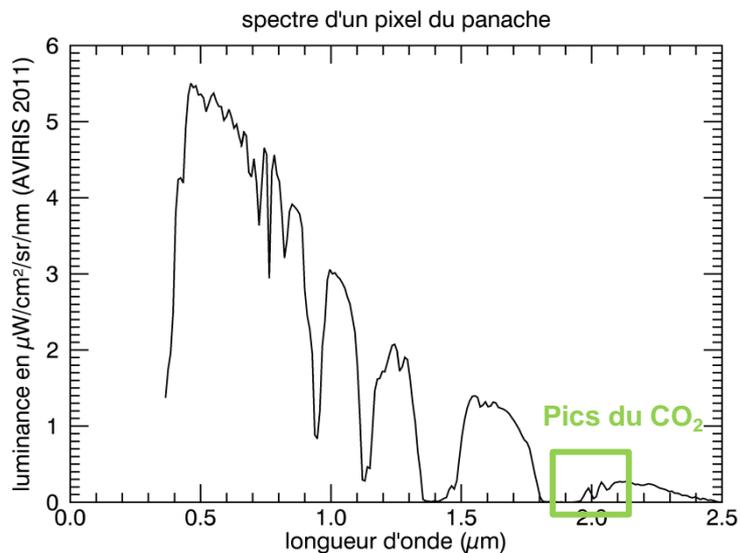
Modèle

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

$r$  : luminance modélisée comme une combinaison linéaire du fond et du gaz recherché

$u$  : luminance moyenne du fond  
 $\alpha$  : quantité de gaz recherché  
 $b$  : spectre du gaz recherché  
 $\varepsilon$  : bruit capteur

Image à N  
bandes



## ALGORITHME DE DÉTECTION CTMF

Modèle

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

$r$  : luminance modélisée comme une combinaison linéaire du fond et du gaz recherché

$u$  : luminance moyenne du fond  
 $\alpha$  : quantité de gaz recherché  
 $b$  : spectre du gaz recherché  
 $\varepsilon$  : bruit capteur

Image à N bandes

Classification (K-Means)

Calcul du filtre optimal pour chaque classe  $j$  :

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

$j$  : numéro de la classe

$q_j$  : coefficients du filtre CTMF pour la classe  $j$

$C_j$  : matrice de covariance de la classe  $j$

$b$  : spectre du gaz recherché

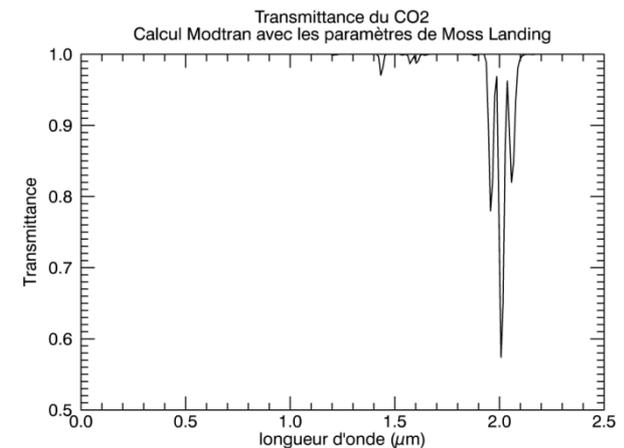


Segmentation K-Means

(98 classes)



?



# ALGORITHME DE DÉTECTION CTMF

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

$r$  : luminance modélisée comme une combinaison linéaire du fond et du gaz recherché

$u$  : luminance moyenne du fond  
 $\alpha$  : quantité de gaz recherché  
 $b$  : spectre du gaz recherché  
 $\varepsilon$  : bruit capteur

Image à N bandes

Classification (K-Means)

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 pour chaque pixel  $i$  dans la classe  $j$  :

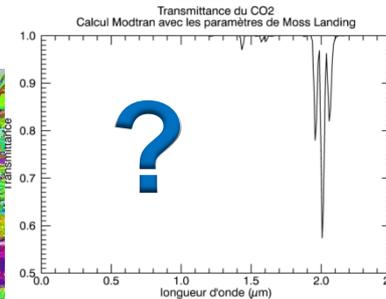
$$f_i = q_j^T r_i$$

$j$  : numéro de la classe  
 $q_j$  : coefficients du filtre CTMF pour la classe  $j$   
 $C_j$  : matrice de covariance de la classe  $j$   
 $b$  : spectre du gaz recherché

$i$  : numéro du pixel  
 $f_i$  : score CTMF pour le pixel  $i$  dans la classe  $j$   
 $q_j$  : coefficients du filtre CTMF pour la classe  $j$   
 $r_i$  : luminance du pixel  $i$

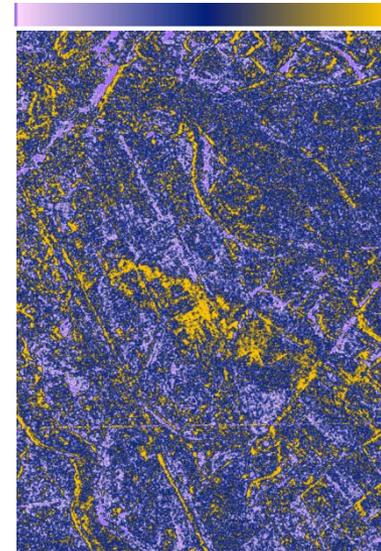


Segmentation K-Means  
 (98 classes)



Détection CTMF

non détection    détection



# SIMULATEUR D'IMAGES SPATIALES

Ajout de l'atmosphère :  $img_{+atm} = img_{aeroportee} \cdot t_{\uparrow} + L_{\uparrow}$

Dégradation spatiale de rapport  $r$  :  $img_{spatiale} = img_{+atm} * PSF$

Ajout d'un bruit :

- additif gaussien centré de variance  $\sigma^2$
- $\sigma$  est fonction du bruit de  $img_{aeroportee}$

Dégradation spectrale :

Intégration de chaque pixel de l'image à la sensibilité spectrale indiquée  $\Rightarrow$  image hyperspectrale à  $M$  bandes ( $M < N$ )

# SIMULATION D'IMAGES HYPXIM : AJOUT DE L'ATMOSPHÈRE – ILLUSTRATIONS

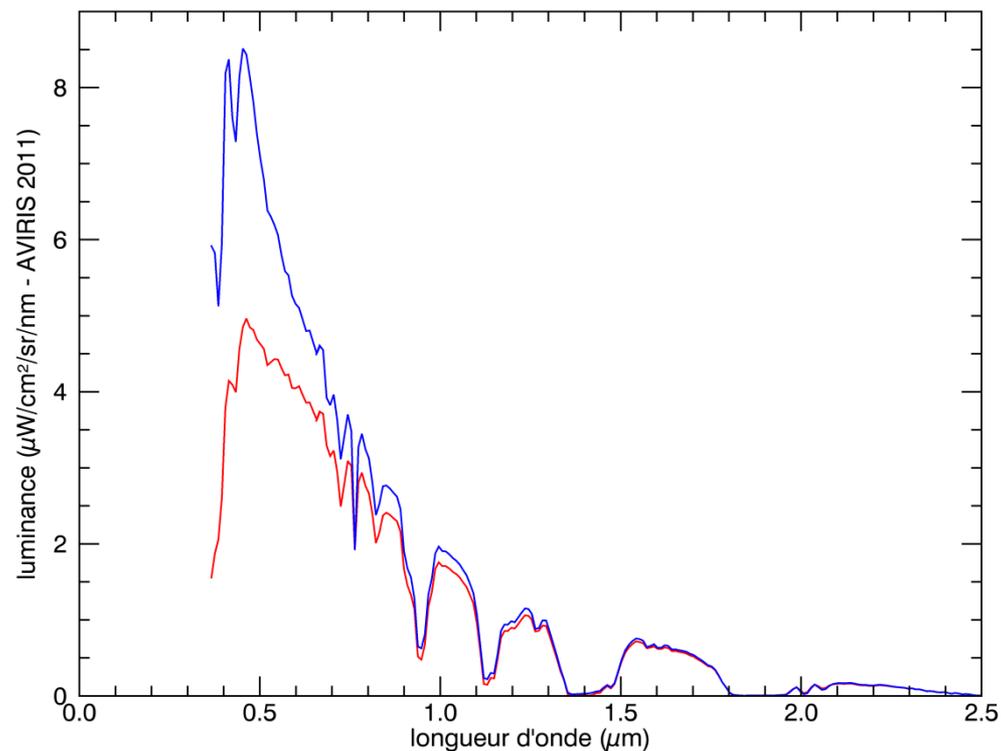
Equation :  $img_{+atm} = img_{aeroportee} \cdot t_{\uparrow} + L_{\uparrow}$

Moss Landing : altitude de l'avion = 3,2km / résolution = 2,7m

Mount Storm : altitude de l'avion = 20,2km / résolution = 16,4m



Luminance d'un pixel de Moss Landing  
rouge : aéroportée  
bleu : satellite



# SIMULATION D'IMAGES HYPXIM : AJOUT DE L'ATMOSPHERE – ILLUSTRATIONS

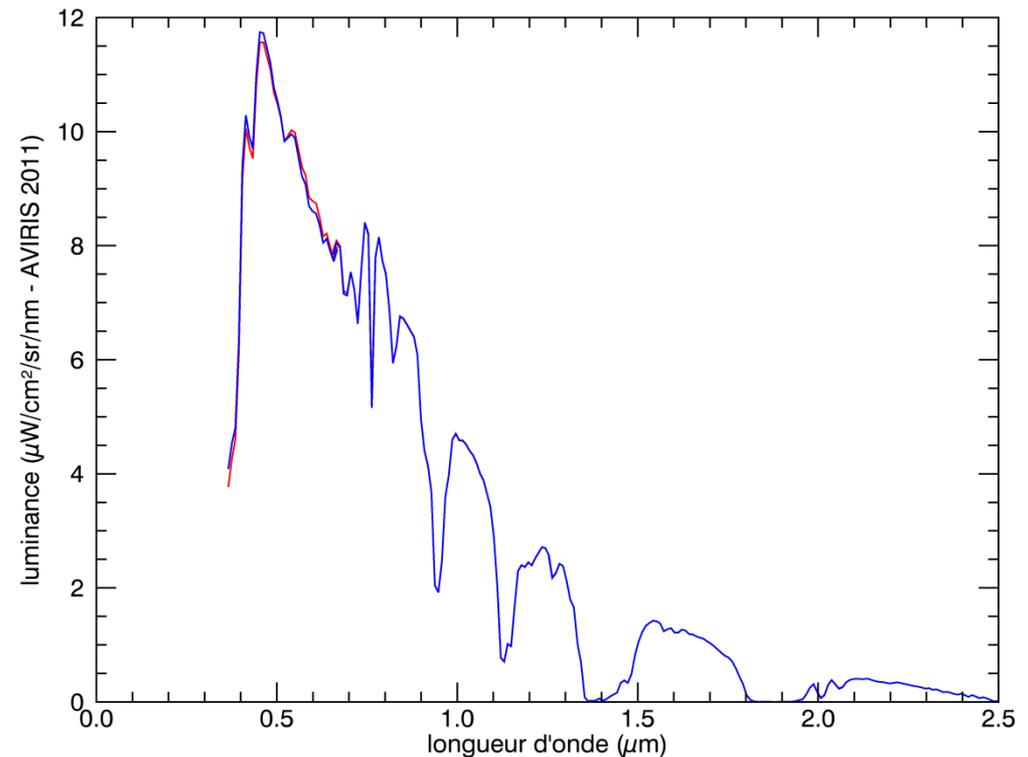
Equation :  $img_{+atm} = img_{aeroportee} \cdot t_{\uparrow} + L_{\uparrow}$

Moss Landing : altitude de l'avion = 3,2km / résolution = 2,7m

Mount Storm : altitude de l'avion = 20,2km / résolution = 16,4m

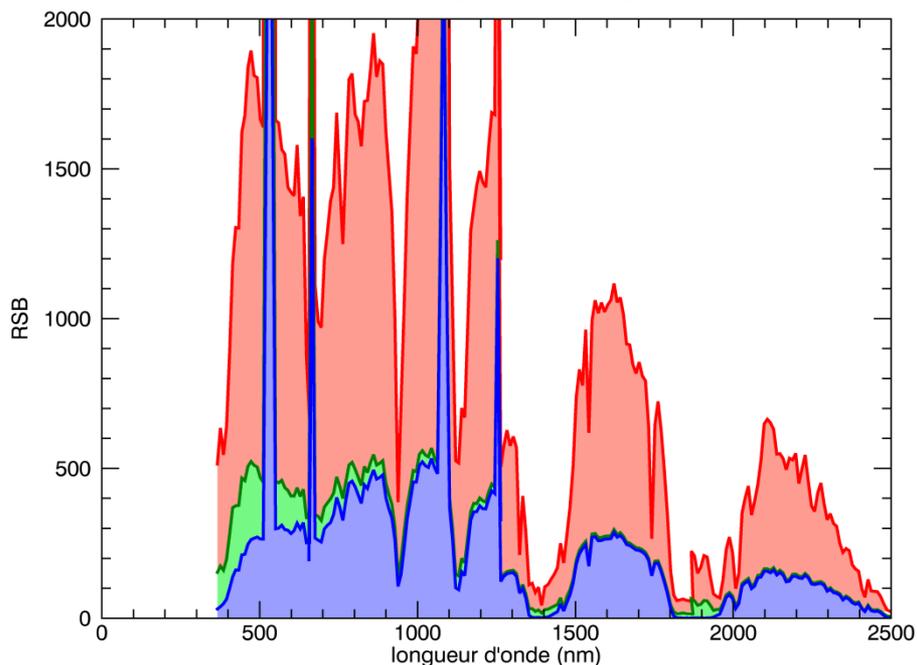


Luminance d'un pixel de Mount Storm  
rouge : aéroportée  
bleu : satellite



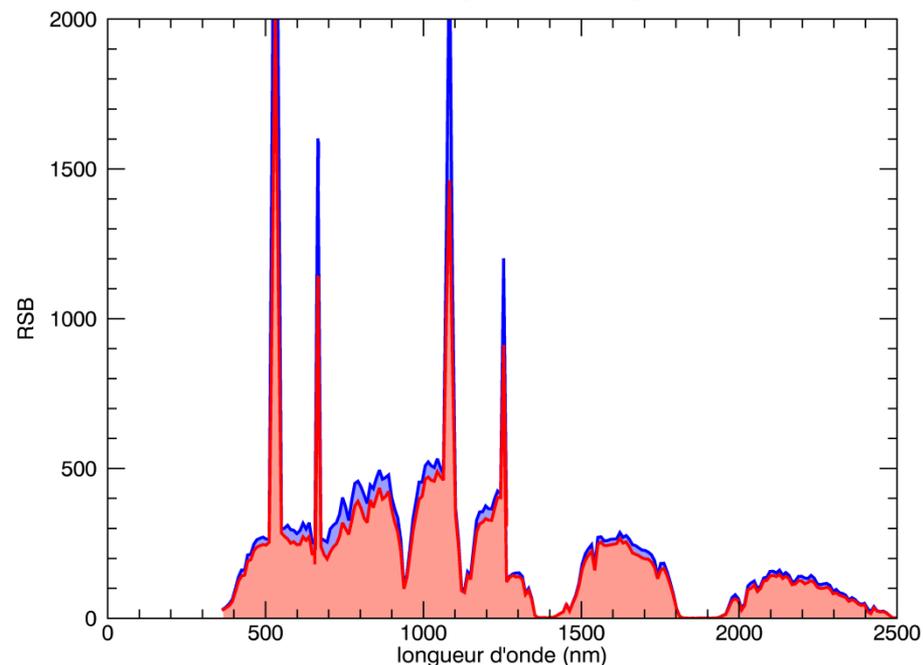
# SIMULATION D'IMAGES HYPXIM : AJOUT DU BRUIT – ILLUSTRATIONS

RSB - image : Moss Landing



$$\sigma_{ajoute} = \sqrt{\sigma_{aeroporte}^2 (\alpha^2 - 1)}$$

RSB - image : Moss Landing



## Légende :

- Image aéroportée à 3,2km – 2,7m
- Image satellite – 2,7m
- Image dégradée spatialement – 8m

## 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°

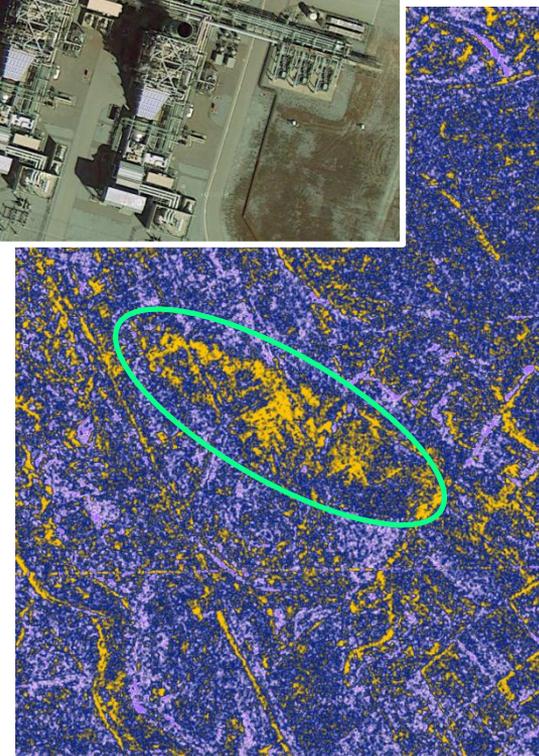
## ■ Atmosphère (ATCOR)

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)

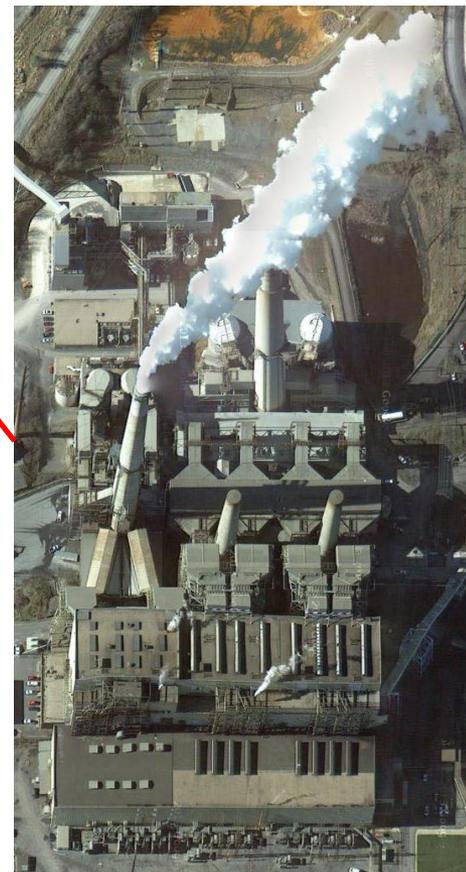
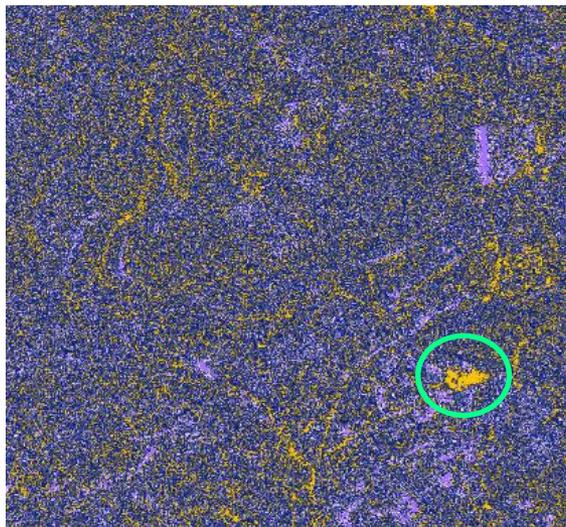
Mid-Latitude Summer

Aérosols : Rural 80km de visibilité

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

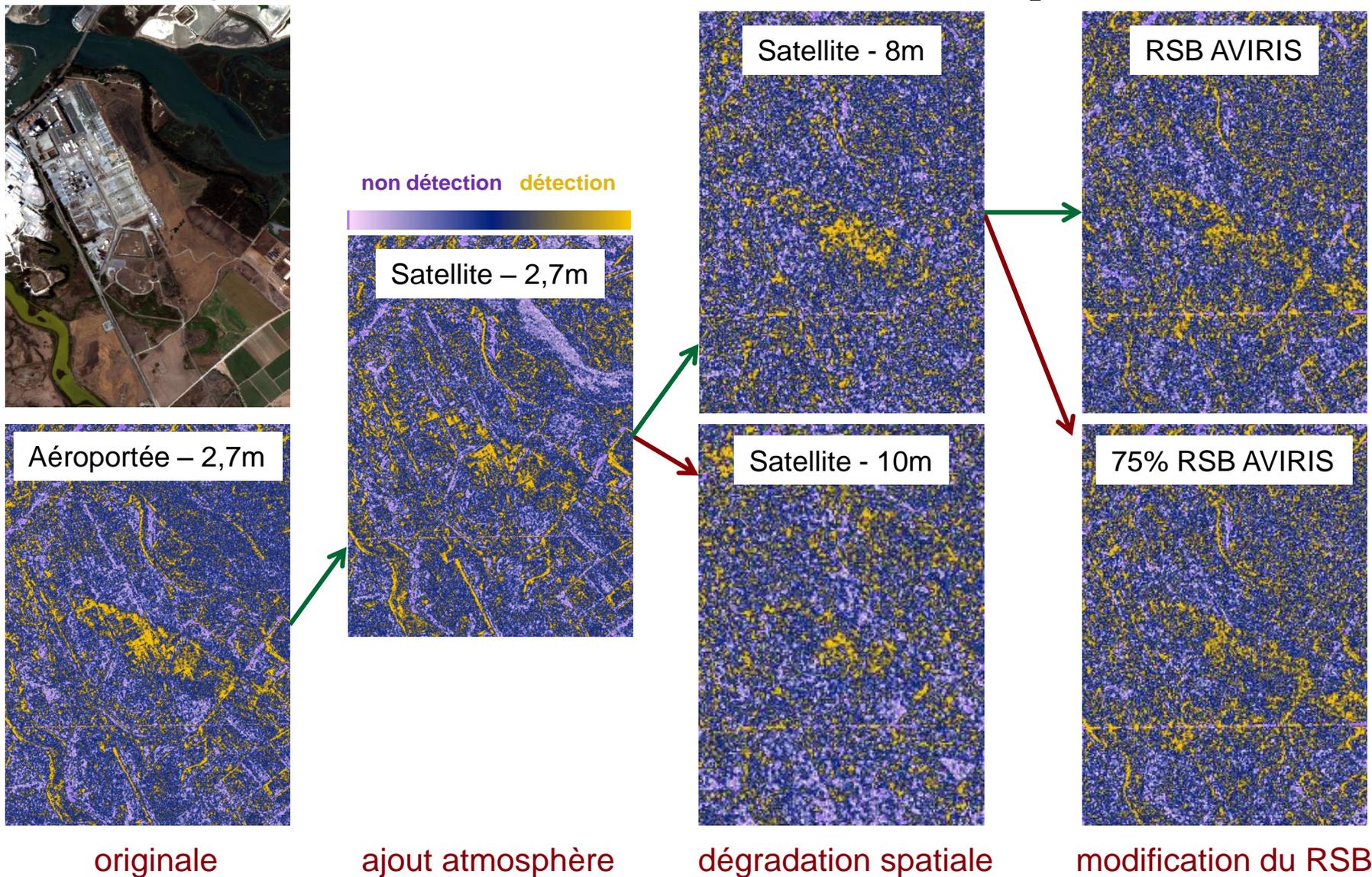
## Vérité terrain

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



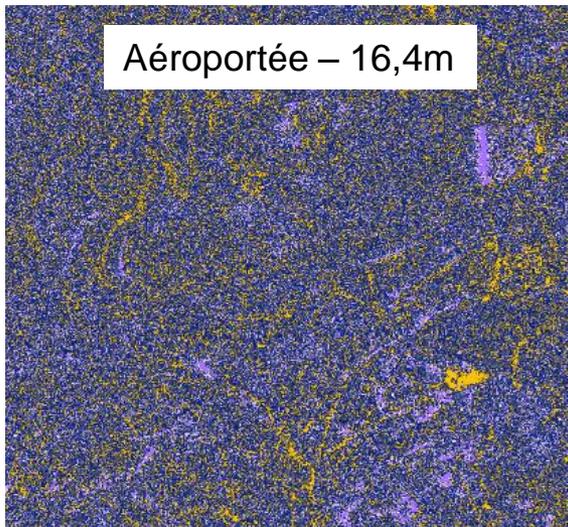
# RÉSULTATS DES DÉGRADATIONS SUCCESSIVES

Moss Landing : Pixel : 2,7m - Altitude avion : 3,2km - Emission de CO<sub>2</sub> : 1,6.10<sup>6</sup> tonnes/an



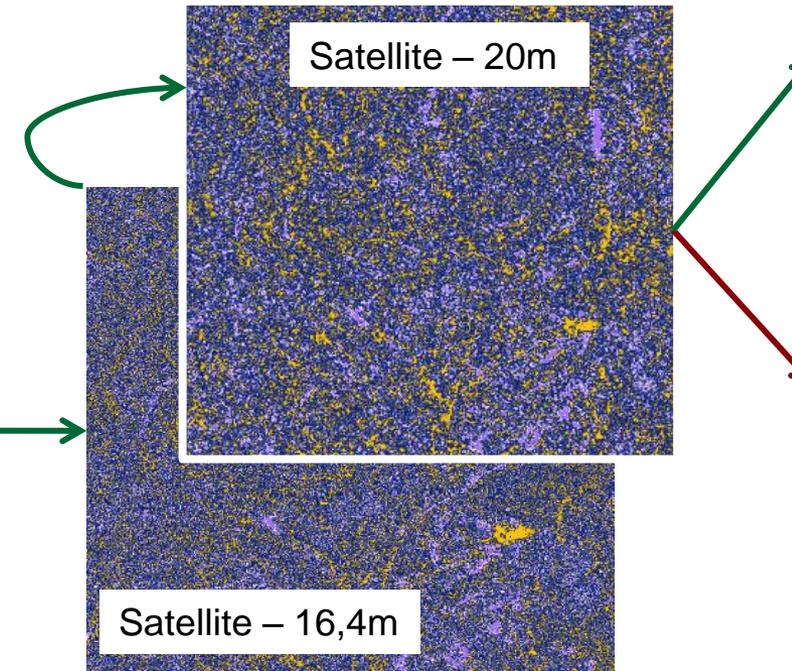
# RÉSULTATS DES DÉGRADATIONS SUCCESSIVES

Mount Storm : Pixel : 16,4m - Altitude avion : 19,2km - Emission de CO<sub>2</sub> : 9,5.10<sup>6</sup> tonnes/an

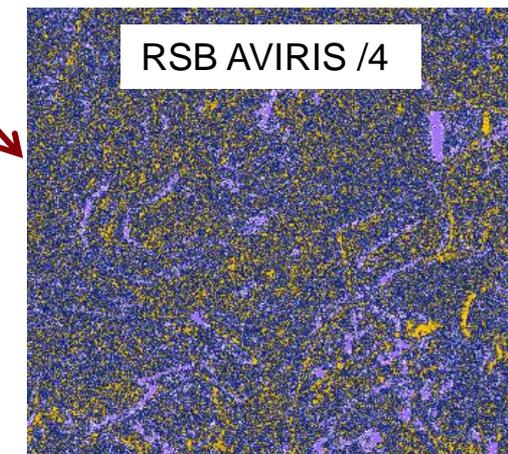
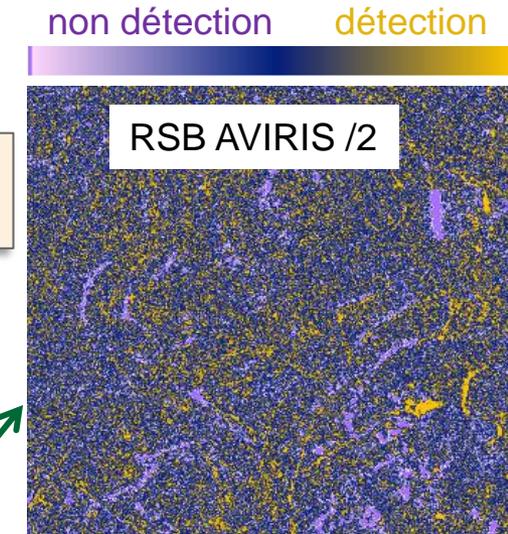


originale

$$\frac{AVIRIS_{RSB}}{4} < HYPXIM_{RSB} < \frac{AVIRIS_{RSB}}{2}$$



ajout atmosphère & dégradation spatiale



modification du RSB

## Conclusions

- La détection du CO<sub>2</sub> par imagerie hyperspectrale satellite est possible (ajout de l'atmosphère)
- Le CO<sub>2</sub> est détectable jusqu'à environ 8m de résolution spatiale (Hypxim P)
- Au-delà de 15-20m (Hypxim C, EnMAP, Prisma, ...), seules les industries rejetant de fortes quantités de CO<sub>2</sub> sont détectées (cf Mount Storm, émission =  $9,5 \cdot 10^6$  tonnes/an)
- Les panaches de CO<sub>2</sub> des sites industriels à forte émission sont détectés avec des RSB HYPXIM, alors que pour des sites de moindre importance il faut un meilleur RSB (aéroporté)

## Perspectives

- Impact de la résolution spectrale sur les résultats de la détection CTMF
- Analyse d'images pour des sites présentant d'autres effluents gazeux que le CO<sub>2</sub>
- Synthétiser une image hyperspectrale d'une scène (vérité terrain numérique) afin de simuler d'autres images Hypxim et analyser l'inversion du problème