

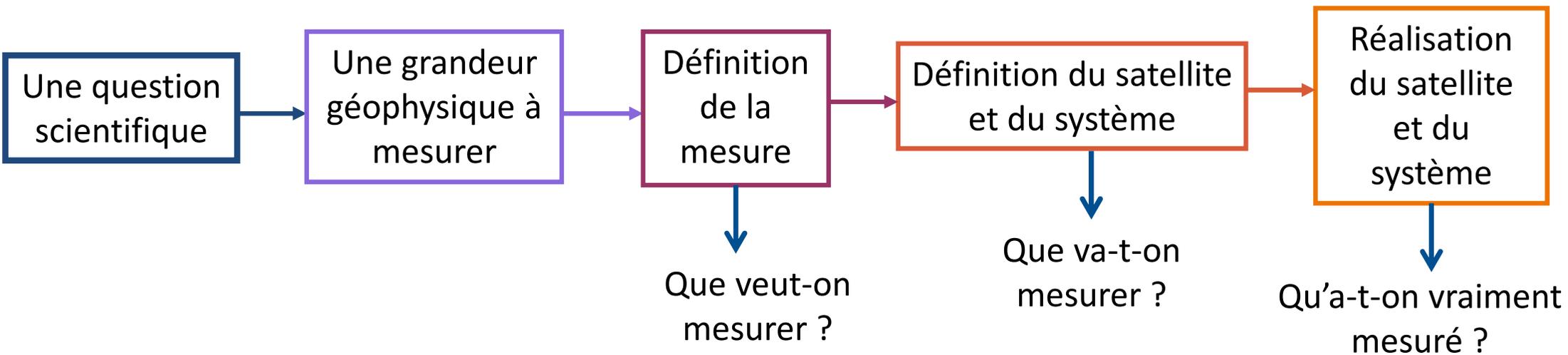
# Applications aux instruments spatiaux

C. Pierangelo, A. Deschamps et tout le service  
“physique de la mesure optique”

CNES DCT/SI/MO

1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES
2. Quelques exemples
  1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
  2. Estimation de performance
  3. Algorithmie de traitement des données
  4. Exploitation de mesures réelles
  5. *Etudes transverses*
3. perspectives

# Introduction : le positionnement du CNES



Laboratoires scientifiques



Industriels

**Système** : ensemble des éléments qui constituent la mission spatiale (instrument et plate-forme, mais aussi orbite, segment sol, traitements, opérations...)



# La physique de la mesure optique au CNES

- ❑ Au centre spatial de Toulouse, pour les projets spatiaux, sont conduites des activités liées à la physique de la mesure de télédétection optique et au traitement des données issues d'instruments optiques :
  - prise en compte du besoin scientifique,
  - algorithmes de traitement,
  - étalonnage et inter-étalonnage.
- ❑ Les types de mission concernées sont à vocation généralement environnementale ou scientifique :
  - Imagerie spatiale
  - Sondage atmosphérique passif (spectroscopie) et actif (lidar)
- ❑ Les domaines spectraux concernés par cette présentation sont le visible et l'infrarouge.
  - Le CNES est également impliqué dans des activités de physique de la mesure dans le domaine radar et micro-ondes

## L'utilisation du transfert radiatif : à toutes les étapes des projets

- ❑ Le transfert radiatif est un outil phare pour toutes les étapes du projet :
  - Phase 0/phase A : étude de concept, étude de faisabilité
  - phase B/C/D : phase de définition détaillée puis de réalisation et test d'un satellite / d'un instrument / d'un segment sol
  - Phase E : Exploitation, lors de la recette en vol du satellite, puis pour le suivi en vol
  
- ❑ En plus du cadre des projets spatiaux, le transfert radiatif est une composante majeure de notre expertise métier, et fait l'objet d'études transverses, par exemples des études de Recherche et Technologie (R et T)...

Projet : développement d'un  
satellite / instrument /  
segment sol

# Les grands domaines d'utilisation du transfert radiatif au CNES

---

- ❑ Capacité à modéliser le signal en entrée de l'instrument :
  - Pour le design de l'instrument : niveau de flux, degré de polarisation...
  - Pour l'analyse du contenu en information géophysique pour proposer de nouveaux concepts
  
- ❑ Estimation de performance :
  - Pour le dimensionnement d'un instrument
  - Avec prise en compte de l'impact des paramètres géophysiques
  
- ❑ Algorithme de traitement des données :
  - Préparation des segments sol,
  - pôles thématiques
  
- ❑ Exploitation de mesures réelles :
  - Étalonnage des capteurs sur satellite
  - instruments sol, aéroportés, maquettes...

## Des besoins variés

---

- Variété des missions (thématiques et concepts de mesure) :
  - Atmosphère : météorologie, gaz à effet de serre, chimie atmosphérique, aérosols, nuages...
  - Surface : biosphère, couleur de l'eau, terres émergées
  
- sans cesse renouvelées :
  - Des dizaines de missions différentes
  - entre 3 et 5 nouvelles missions à l'étude chaque année
  
- ➔ Besoin de nombreux codes dans notre « boîte à outils », « prêt à l'emploi », avec toujours plus de fonctionnalités :
  - Raie par raie / bandes
  - Avec ou sans polarisation
  - Calcul ou non des jacobiens (dérivées)
  - Diffusion / absorption
  - Modélisation de la surface
  - Codes rapides ou très précis...

## Quelques codes utilisés par le CNES

---

- ❑ 4A/OP (version TIR, version SWIR, version Merlin)
- ❑ OS / OSOA (avec ou sans absorption)
- ❑ MODTRAN / Comanche
- ❑ 6S
- ❑ SMAC
- ❑ SMART-G
- ❑ RTTOV
- ❑ DART
- ❑ ...

Les autres codes, même non utilisés directement par le CNES, ont pu servir à la validation, à des comparaisons, ou à des études réalisées pour le compte du CNES chez les partenaires (ex: LBLRTM, LBLDOM, ATMOSFIT...)

---

1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

## 2. Quelques exemples

**1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument**

2. Estimation de performance

3. Algorithmie de traitement des données

4. Exploitation de mesures réelles

5. *Etudes transverses*

3. perspectives

## Modélisation du signal en entrée instrument (1) Estimation du flux

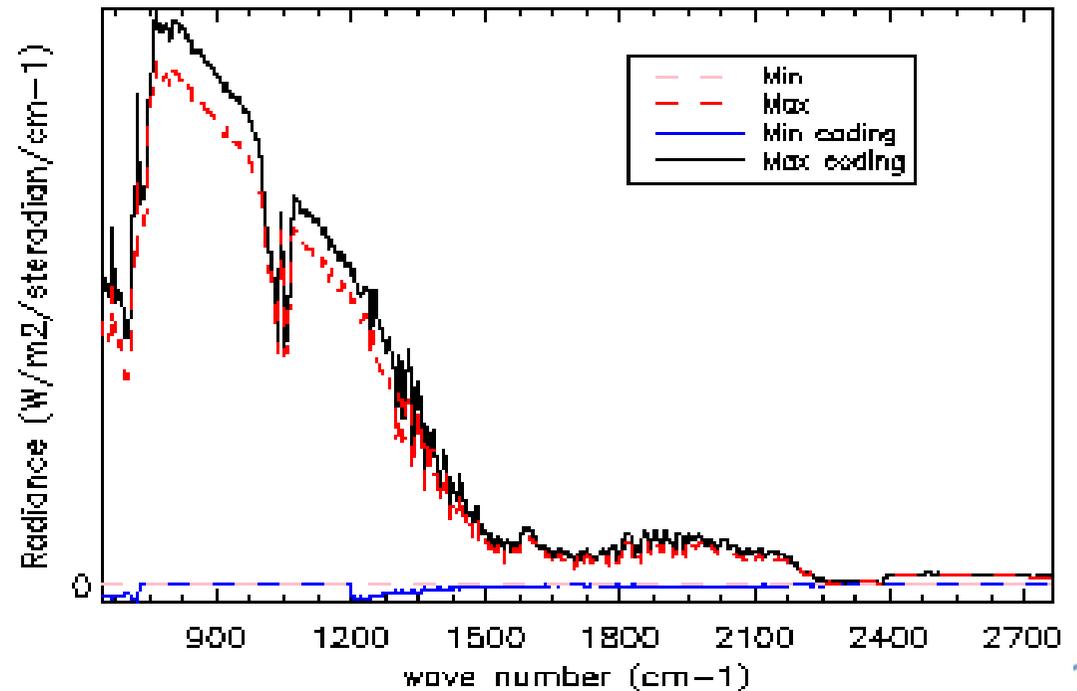
- ❑ Pour dimensionner un instrument, on doit connaître le flux typique entrant dans l'instrument, ainsi que ses variations en fonction de la scène
  - Scène « max » pour éviter la saturation
  - Scène « min » pour garantir un rapport signal-à-bruit suffisant
  
- ❑ Exemple IASI : Simulation des spectres extrêmes conditions atmosphériques extrêmes) afin de dimensionner les plages minimum et maximum des tables de codage des spectres bord de l'instrument.

### IASI :

Interféromètre dans l'infrarouge thermique

3 modèles dont 2 en vol

Mission à haute résolution spectrale ( $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ) dans l'infrarouge thermique ( $[645 - 2760] \text{ cm}^{-1}$  soit  $[3.6 - 15.5] \mu\text{m}$ )



## Modélisation du signal en entrée instrument (2) Etude d'impact

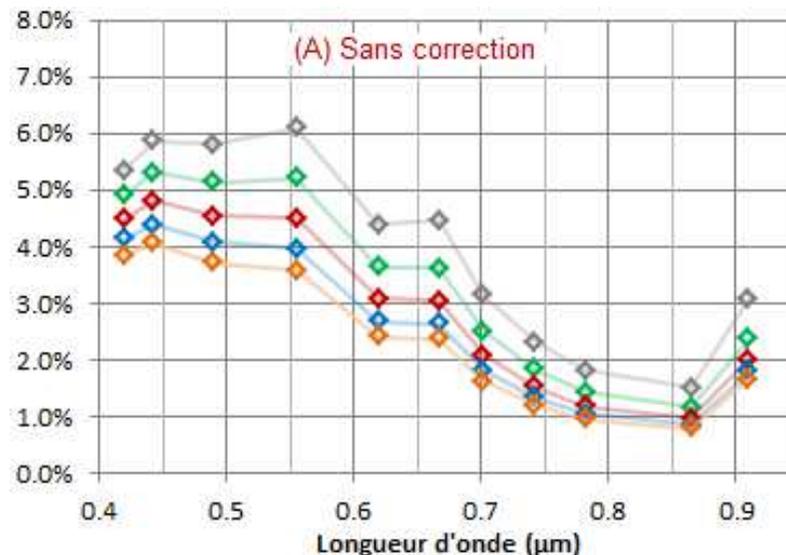
- ❑ comportement instrumental non satisfaisant ou dont on souhaite améliorer la connaissance et limiter l'impact.
- ❑ exemple : forte sensibilité instrumentale à la polarisation, ou forte variation spectrale dans le champ : analyses actuelles sur projet VEN $\mu$ S
  - estimation de signatures typiques suffisamment réalistes incluant le comportement spectral et polarisé (code 6S-V)
  - traduction en erreur radiométrique (bilans)
  - évaluation de l'acceptabilité, voire mise en place de correction premier ordre

### VEN $\mu$ S :

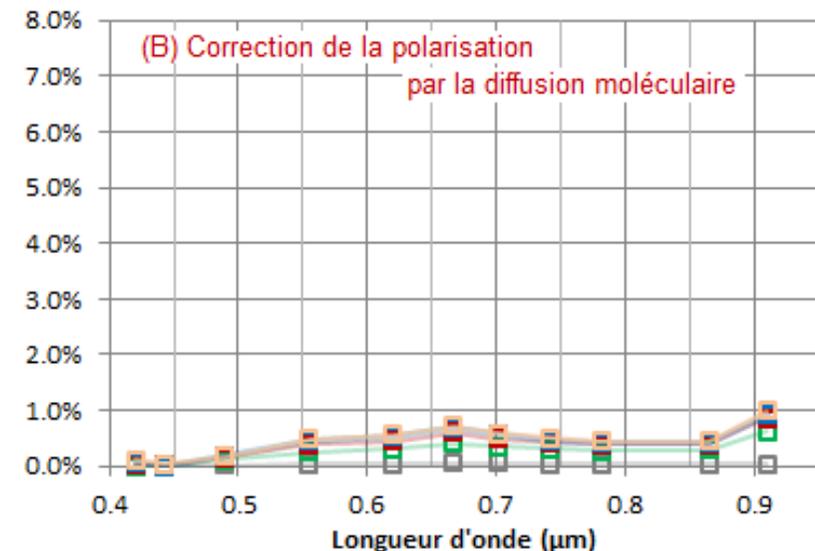
Imageur multispectral pour les surfaces continentales  
Fréquente revisite temporelle sur sites privilégiés  
Précurseur Sentinel-2  
Tir prévu en 2015

### VENUS Sensibilité à la polarisation

$\theta_v = 40 \text{ deg}$   
 $\theta_s = 60 \text{ deg}$   
 $\Delta\phi = 90 \text{ deg}$   
Aérosol : CONTINENTAL  
AOD : 0.01 à 0.4



Erreur causée par la polarisation de l'atmosphère sur le signal mesuré (réflectance TOA) par la caméra Ven $\mu$ s pour différentes épaisseurs optiques (à 550nm)  
0.01 (gris); 0.1 (vert); 0.2 (rouge); 0.3 (bleu); 0.4 (orange)



## Modélisation du signal en entrée instrument (3) hyperspectral

### □ Polarisation pour imageur hyperspectral :

#### **HYPXIM:**

Imageur hyperspectral dans le domaine 0.4 – 2.5  $\mu\text{m}$

Phase 0 puis phase A gelée

Projet civil et militaire

- Suite à la phase 0 HYPXIM, la question du taux de polarisation du signal en entrée d'un instrument hyperspectral s'est posée
- Etude de sensibilité, pour les différentes longueurs d'ondes du domaine réflectif : 0,4-2,5 $\mu\text{m}$
- Impact du type d'aérosol et des conditions de visée

→ développement d'un simulateur dédié : voir poster Saphyre (Nobileau et al.)

---

# 1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

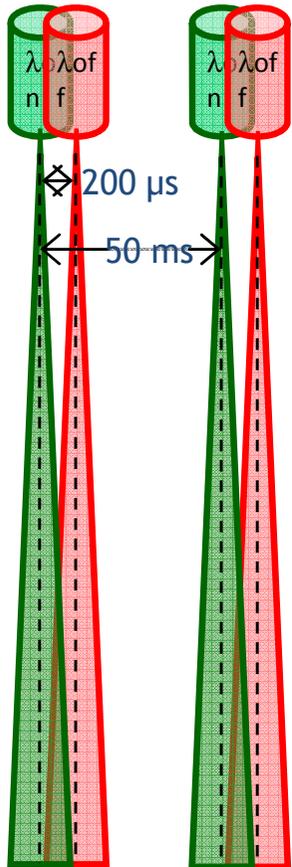
## 2. Quelques exemples

1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
- 2. Estimation de performance**
3. Algorithmie de traitement des données
4. Exploitation de mesures réelles
5. *Etudes transverses*

## 3. perspectives

# Estimation des performances

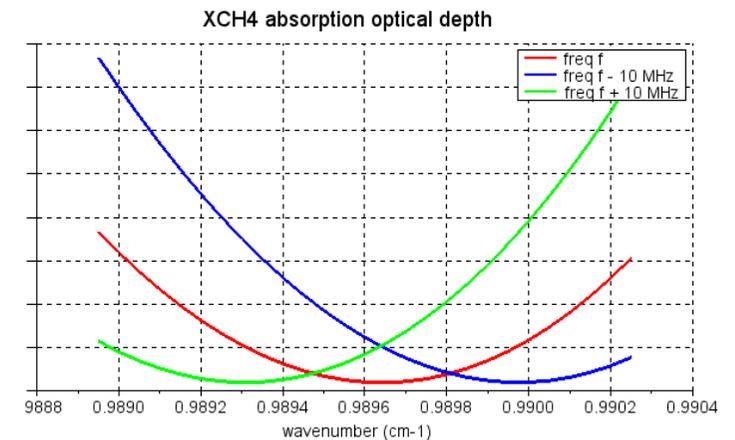
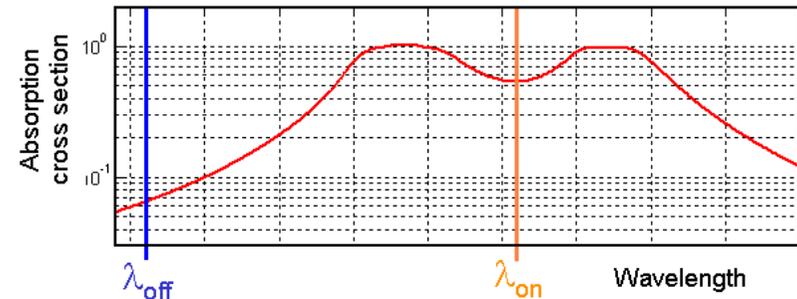
## □ Impact de la méconnaissance de la fréquence du laser pour MERLIN



### MERLIN:

Lidar IPDA pour la mesure du méthane  
Projet en coopération CNES-DLR  
En phase B, tir en 2019

- Le lidar mesure une épaisseur optique différentielle  $\delta(\lambda_{on}) - \delta(\lambda_{off})$
- Le passage à la fraction molaire  $XCH_4$  nécessite la connaissance des sections efficaces  $\sigma(\lambda_{on})$  et  $\sigma(\lambda_{off})$
- L'impact d'une méconnaissance de la fréquence de 10 MHz sur l'erreur de  $XCH_4$  est estimé à partir de simulation avec le code 4A-OP adapté à MERLIN (LMD)
- La sensibilité à la largeur de la raie laser, ou le besoin en pureté spectral, sont étudiés similairement.



# Estimation des performances

## □ Dimensionnement d'une mission CO<sub>2</sub>, MicroCarb

### MicroCarb:

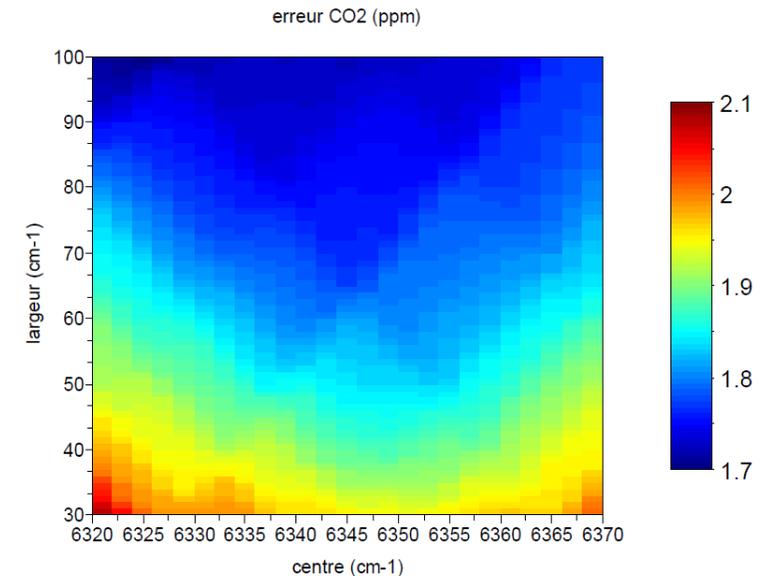
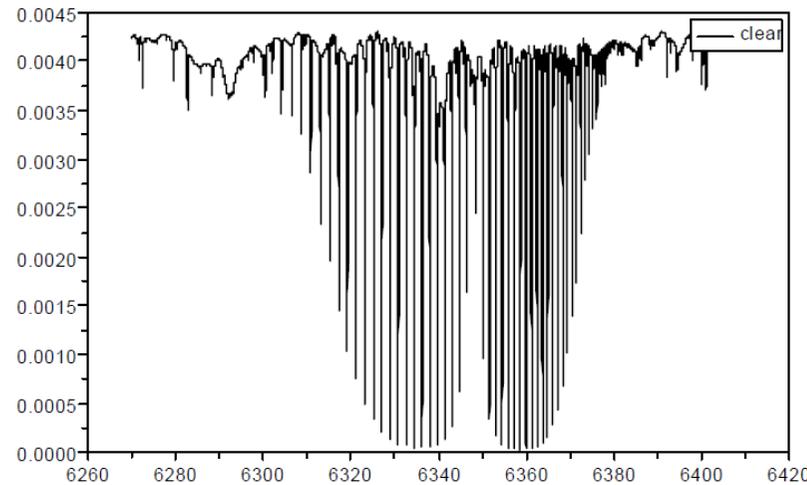
Spectromètre à réseau  
dans le SWIR (0.76, 1.6  
et 2  $\mu\text{m}$ )

Mesure du CO<sub>2</sub>

atmosphérique

Etudes de phase A

achevées



- La mesure du CO<sub>2</sub> doit être faite à mieux que 1 ppm.
- En phase 0 puis phase A, il fallu sélectionner la résolution spectrale, la largeur de bande et le rapport signal-à-bruit :
  - → extension de 4AOP au domaine du SWIR
  - Utilisation d'un code de transfert radiatif pour calculer les jacobiens et ainsi estimer, linéairement, l'erreur résultante sur le CO<sub>2</sub>, par estimation bayésienne (Rodgers, 2000): logiciel 4ARTIC (cf poster)
- L'effet des diffusants atmosphérique complexifie l'inversion:
  - Prise en compte des aérosols dans 4ARTIC

---

## 1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

## 2. Quelques exemples

1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
2. Estimation de performance
3. Algorithmie de traitement des données
4. Exploitation de mesures réelles
5. *Etudes transverses*

## 3. perspectives

# Algorithmes de traitement de données

## THEIA:

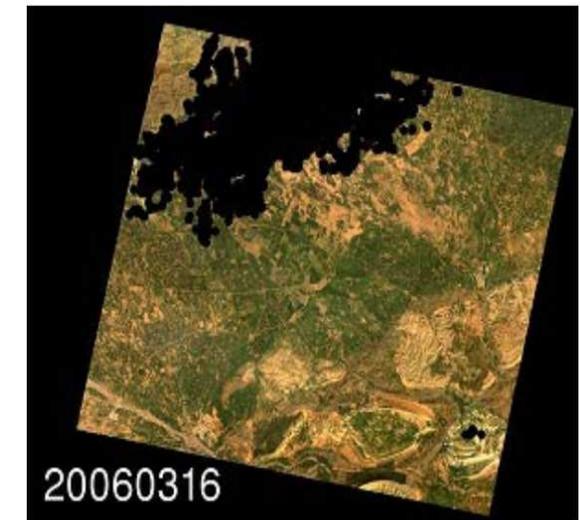
Le pôle thématique « surfaces continentales »

<https://www.theia-land.fr/>

Production/distribution de données de niveau 2 :

- sur toute la France : Landsat 5-7-8, bientôt Sentinel-2
- dans le monde : Spot4/Take5, bientôt Spot5/Take5

- Utilisation du transfert radiatif pour les corrections atmosphériques
  - Reflectance TOA => Reflectance BOA
- Utilisation de l'outil MACCS : Multi-mission Atmospheric and Cloud Correction Software
  - Diffusion : AOT (Dark Dense Vegetation + multi-Temporel, type fixé ), Rayleigh => SOS
  - Absorption atmosphérique :  $O_2$  (altitude MNT),  $O_3$  (exogène OMI),  $H_2O$  (absorption relative ou climato),  $CH_4$ ,  $CO_2$ ...=> SMAC (6S)



---

# 1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

## 2. Quelques exemples

1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
2. Estimation de performance
3. Algorithmie de traitement des données
4. **Exploitation de mesures réelles**
5. *Etudes transverses*

## 3. perspectives

# Exploitation de mesures réelles (1) : étalonnage

« Atelier d'étalonnage » SADE / MUSCLE (logiciel et base de données)

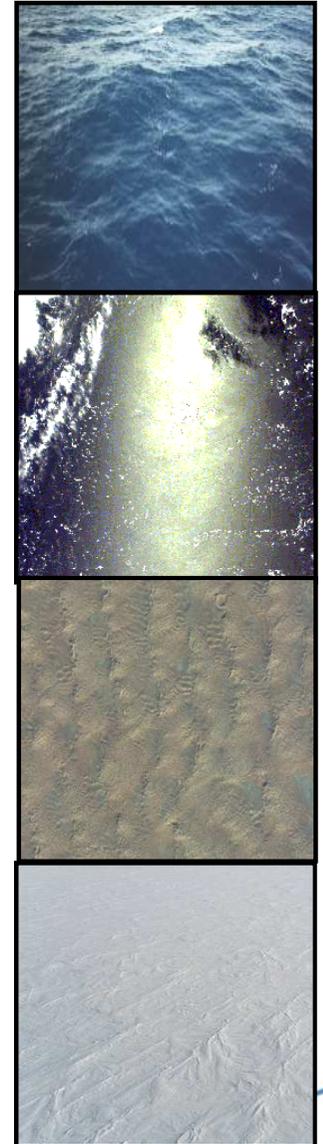
But = Simuler de façon très précise ce que voit le capteur

Sélection de scènes très appropriées

En général découplage absorption gazeuse de diffusion/réflexion

Étalonnage de plus de 30 capteurs : SPOTs, Végétation, MODIS, MERIS, Polder...

- ❑ Etalonnage sur la diffusion Rayleigh et le glitter (sunlint)
  - scènes claires, peu turbides
  - simulation diffusion / réflexion incluant la polarisation
  - code Ordres Successifs de Diffusion code SOS (Deuzé et al., 1989)
  - absorption gazeuse : approche simplifiée code SMAC (6S) (Rahman et al., 1994)
  
- ❑ Etalonnage sur les sites désertiques ou neigeux (Antarctique)
  - scènes stables (claires) « Pseudo-Invariant Calibration Sites »
  - simulation diffusion/absorption/réflexion basée sur approche simplifiée code SMAC (6S) (Rahman et al., 1994)
  - actuellement remplacé par des LUT calculées directement par code 6S (Vermote et al., 1997)

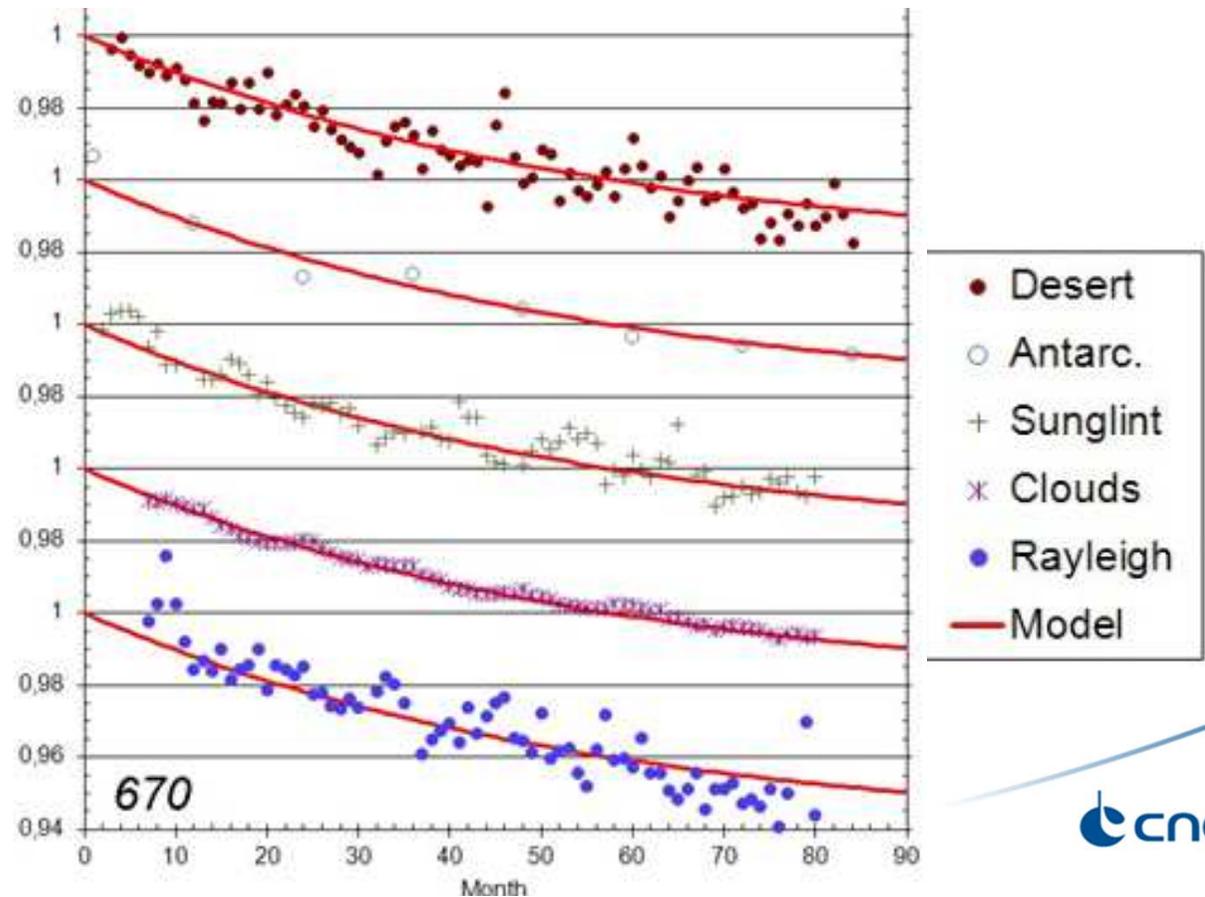


## Exploitation de mesures réelles (1) étalonnage - suite

- Etalonnage sur les nuages convectifs denses (DCC)
  - scènes diffusion très intense
  - simulation diffusion d'un cumulonimbus
  - code Ordonnées Discrètes code OD (Stamnes et al., 1988)



Exemple :  
dérive de la bande 670nm de PARASOL  
observée à travers les 5 méthodes



## Exploitation de mesures réelles (2) : mesures aéroportées

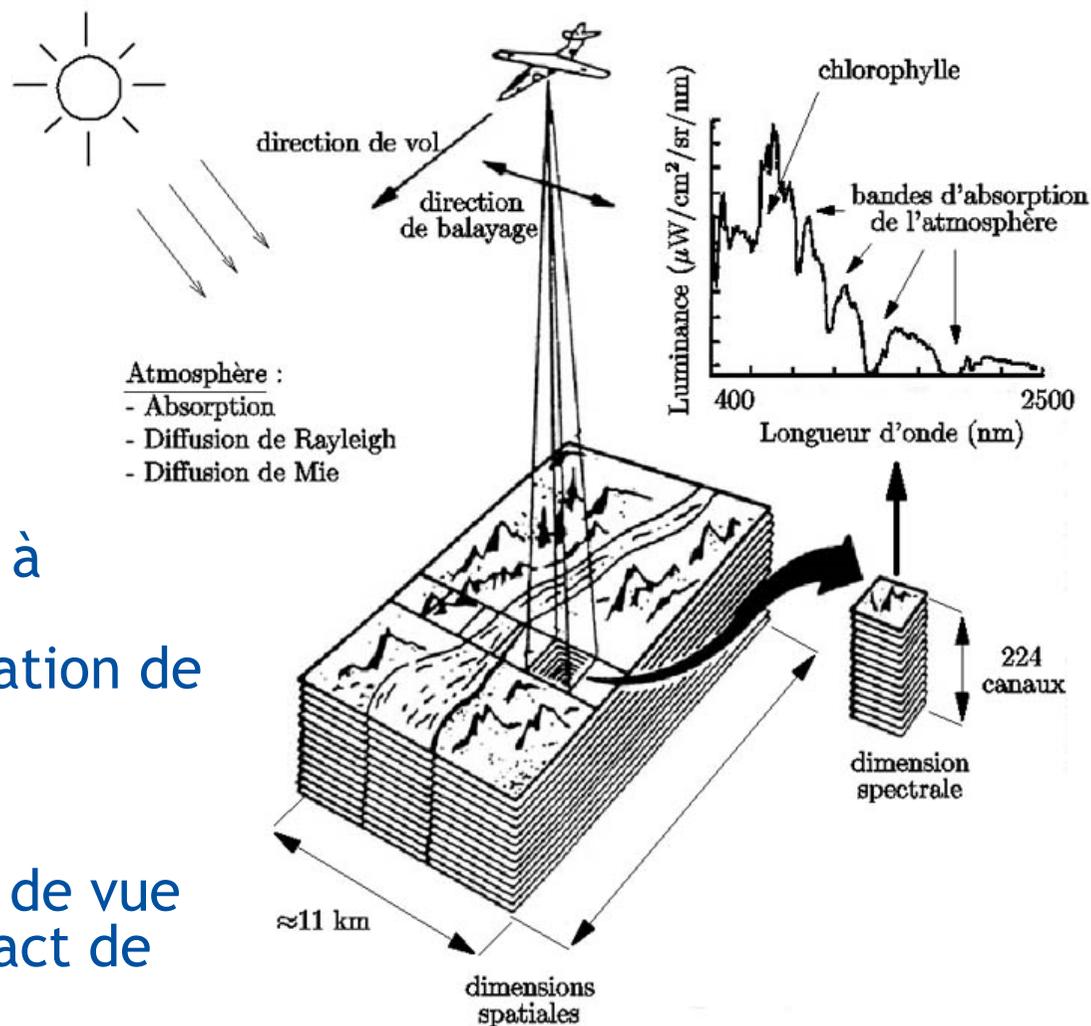
### **HYPEX :**

Contrat de recherche piloté par la DGA, impliquant plusieurs organismes publics

➔ But : Quantifier l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour les thématiques opérationnelles de la défense

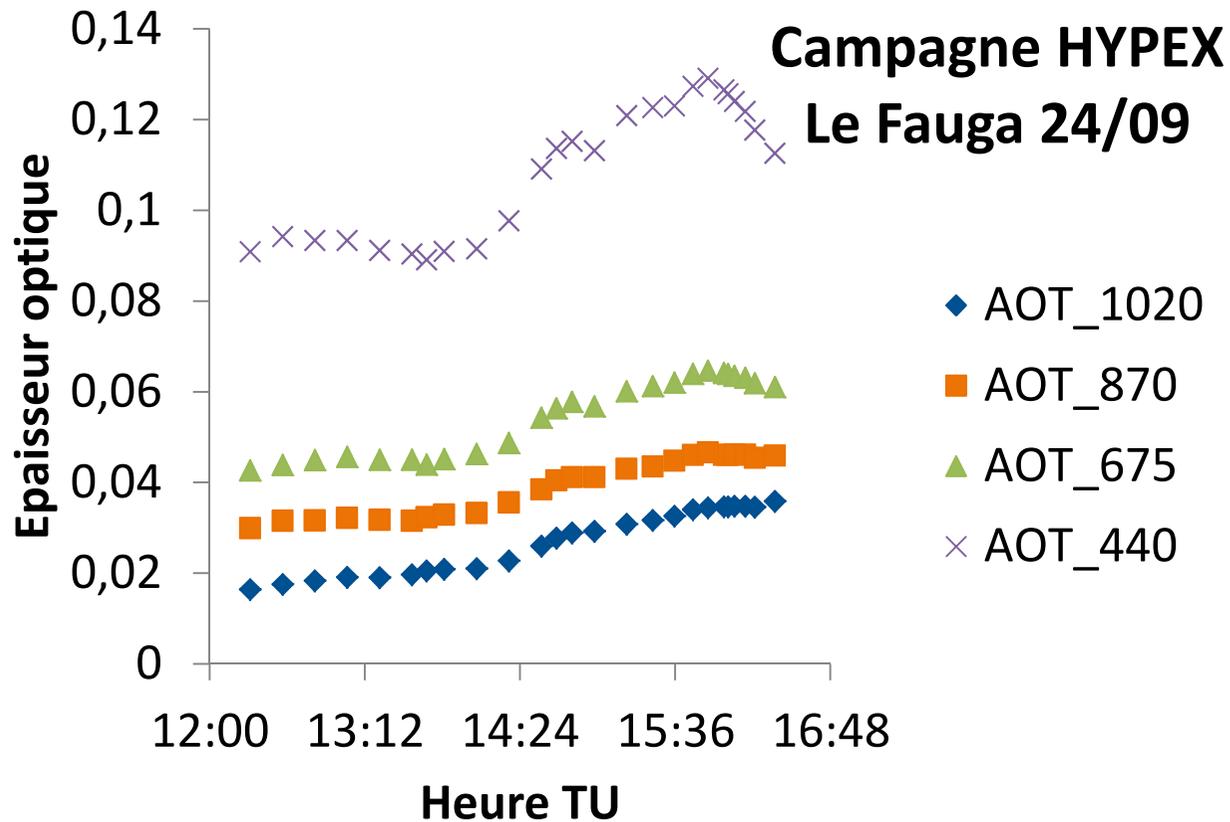
### ❑ Modélisation de luminances TOA à partir de luminance avion, en coopération avec l'ONERA (utilisation de Comanche)

- Simulation de la couche d'atmosphère
- Prise en compte d'un champ de vue plus large entraînant un impact de la diffusion différent
- Ajout des bruits instrumentaux



## Exploitation de mesures réelles (3) : mesures sol du CIMEL

- Utilisation de mesures sol pour l'étalonnage
- Les mesures du CIMEL traitées par AERONET fournissent des AOT
- Les AOT sont utilisées en entrée 6S
- Les simulations de transfert radiatif réalisées permettent l'étalonnage des imageurs spatiaux



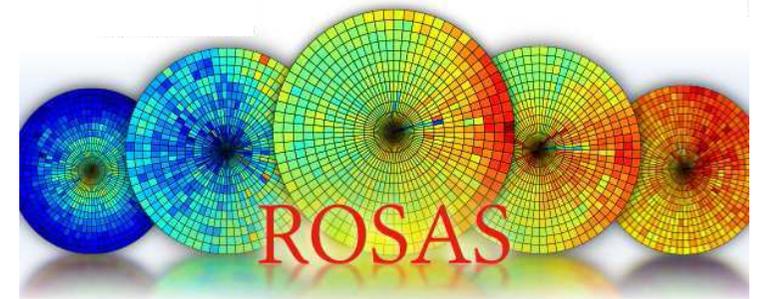
### CIMEL :

Photomètre solaire du réseau AERONET  
4 bandes polarisées 440, 675, 870, 1020  
1 situé à La Crau : AOT + BRDF  
1 portable : AOT  
Opérés par le CNES



## Exploitation de mesures réelles (3) : mesures sol du CIMEL - suite

- Le photomètre situé à La Crau effectue également des mesures de réflectance bi-directionnelles (BRDF) sur 10 longueurs d'onde (vis-SWIR)



A **R**Obotic **S**tation for **A**tmosphere and **S**urface characterization dedicated to on-orbit calibration and L2a products validation

# Exploitation de mesures réelles (4) : la mission IASI

## IASI :

Interféromètre dans l'infrarouge thermique

3 modèles dont 2 en vol

Mission à haute résolution spectrale ( $0.5 \text{ cm}^{-1}$ ) dans l'infrarouge thermique ( $[645 - 2760] \text{ cm}^{-1}$  soit  $[3.6 - 15.5] \mu\text{m}$ )

Code de transfert radiatif utilisé : 4A/OP

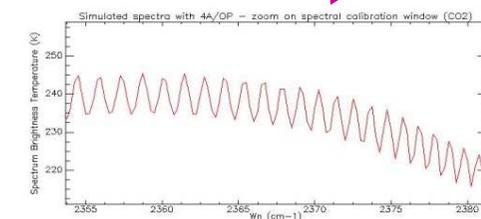
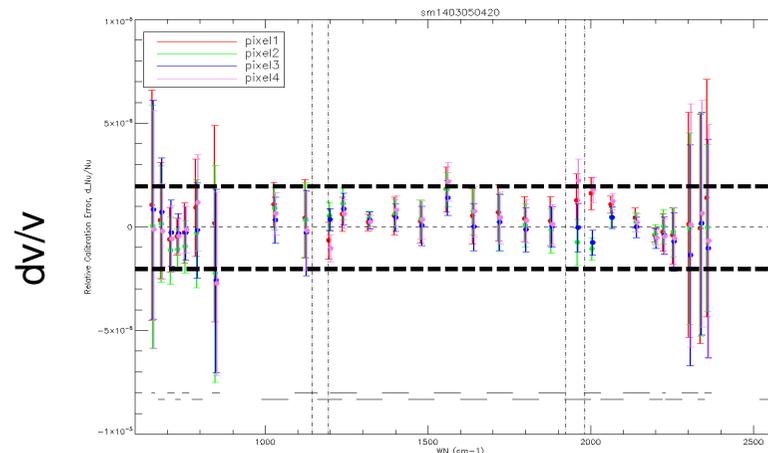
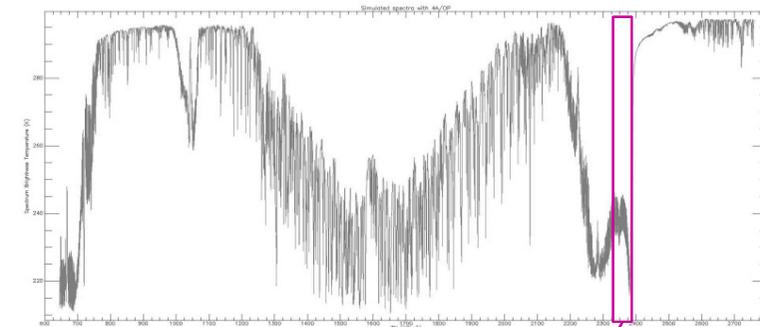
Etalonnage spectral : simulation d'un spectre de référence pour la calibration spectrale de IASI.

- Utilisation de la fenêtre du CO<sub>2</sub> (branche R) autour de  $2369 \text{ cm}^{-1}$

Vérifications de performances :

- Vérification de la calibration spectrale (TEC IASI) en CalVal et routine.

Corrélation des spectres IASI avec des spectres simulés (4A/OP avec les profils T° et H<sub>2</sub>O ECMWF), sur des zones homogènes, chaudes et claires.



Spécification :  
 $\pm 2 \text{ ppm}$

---

## 1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

## 2. Quelques exemples

1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
2. Estimation de performance
3. Algorithmie de traitement des données
4. Exploitation de mesures réelles
5. *Etudes transverses*

## 3. perspectives

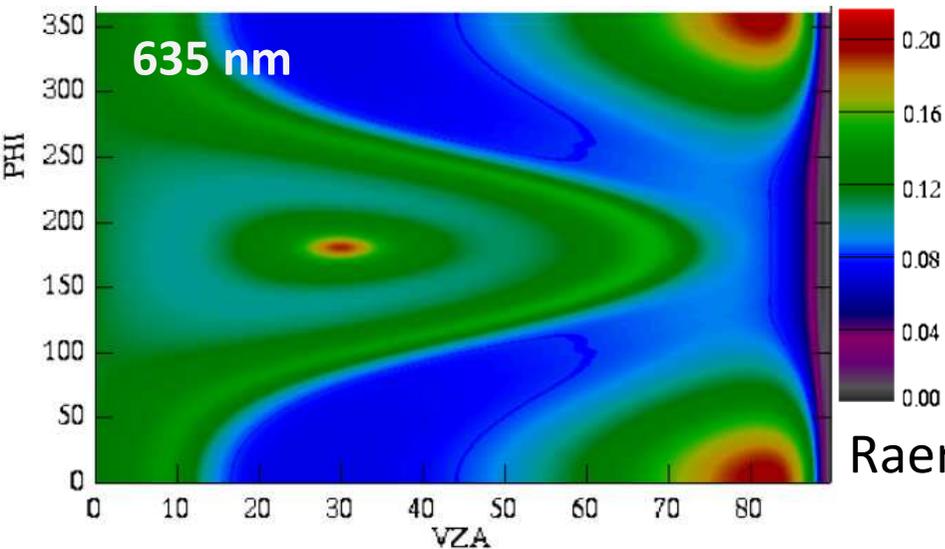
# Etudes transverses (1) transfert radiatif sur carte GPU

□ Pour les besoins de GéOCAPi, (Dimensionnement et études de sensibilité), des simulations ont été réalisées :

## GeoCAPi :

Géostationnaire couleur de l'eau  
Phase 0

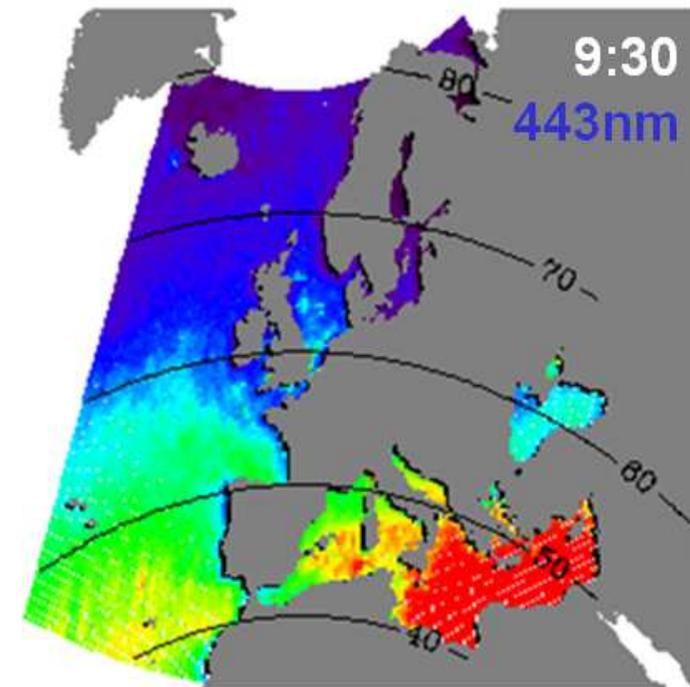
- particularité = géométrie sphérique → simulation de géométries « extrêmes »
  - caractérisation de l'effet masse d'air
  - description de la proportion de signal utile nécessite une précision très élevée
- Historiquement, aides au développement d'un code Monte-Carlo sphérique (SPORT-MC, Trattoria 2008)
- puis étude en R et T amélioration et portage sur Carte Graphique GPU (2013) code SMART-G



Rw / Rtoa

(%)

0.0 4.0 8.0 12.0 16.0 20.0



## Etude transverse (2) spectroscopie dans 4A/OP

- ❑ Le CNES s'implique dans des études de transfert radiatif en amont des projets, ou pour préparer des projets futurs (IASI-NG, MicroCarb)

### **IASI-NG :**

Interféromètre dans l'infrarouge thermique

Mission à haute résolution spectrale dans l'infra-rouge thermique ([645 – 2760] cm<sup>-1</sup> soit [3.6 - 15.5] μm)

Bruit et résolution spectrale améliorés d'un facteur 2 par rapport à IASI

Actuellement en phase B, 3 modèles de vol prévus.

- ❑ Pour 4A/OP, les améliorations proposées par le LMD au vu des retours IASI sont intégrées dans la version opérationnelle de 4A par NOVELTIS, avec un financement et un suivi technique du CNES.
  - Séparation H<sub>2</sub>O / HDO
  - Pressure shift
  - Line-mixing

*Cf poster E. Bernard*

---

## 1. Généralités sur l'utilisation du transfert radiatif au CNES

## 2. Quelques exemples

1. Modélisation du signal en entrée de l'instrument
2. Estimation de performance
3. Algorithmie de traitement des données
4. Exploitation de mesures réelles
5. *Etudes transverses*

## 3. perspectives

## Besoins futurs (et aperçus de quelques études CNES en cours)

---

- ❑ Améliorer les connaissances spectroscopiques pour les futures missions de sondage, à haute résolution spectrale :
  - travaux projet MERLIN (LISA et GSMA)
  - validation de 4AOP avec les mesures TCCON (LMD)
- ❑ Améliorer les capacités de modélisation de la polarisation (atmosphère et surface) pour les différents types de code
  - Validation de la prise en compte de l'absorption dans les OS
  - introduction de VLIDORT dans 4AOP (NOVELTIS)
- ❑ Disposer de bases de données de qualité :
  - réflectances, notamment polarisées, adaptée à la haute résolution spatiale (métrique à kilométrique) ou à différentes configurations géométriques (rétrodiffusion)
  - Aérosols : introduction de climatologies d'AOT dans les étalonnages (CS, Capgemini), à poursuivre
- ❑ Prise en compte des effets d'environnement et codes 3D

## Besoins futurs (et aperçus de quelques études CNES en cours)

---

- ❑ Diminuer les temps de calcul
  - Pour les codes « line-by-line », particulièrement avec diffusion (accélération de la diffusion pour 4A/OP - NOVELTIS)
  - Parallélisation de codes, parfois difficile selon la structure du code (OS)
  - Poursuite des recherches autour des GPU
  
- ❑ Améliorer la prise en compte des entrées et sorties pour mieux répondre aux différents besoins (notamment les inter-comparaisons)
  - Faciliter l'interfaçage avec des données exogènes type météo ou surface
  
- ❑ Disposer d'outils plus modulaires, interfacés avec différents codes de transfert radiatif :
  - Développement de SAPHYRE, contenant OS et MODTRAN (Capgemini)

---

**Merci de votre attention!**