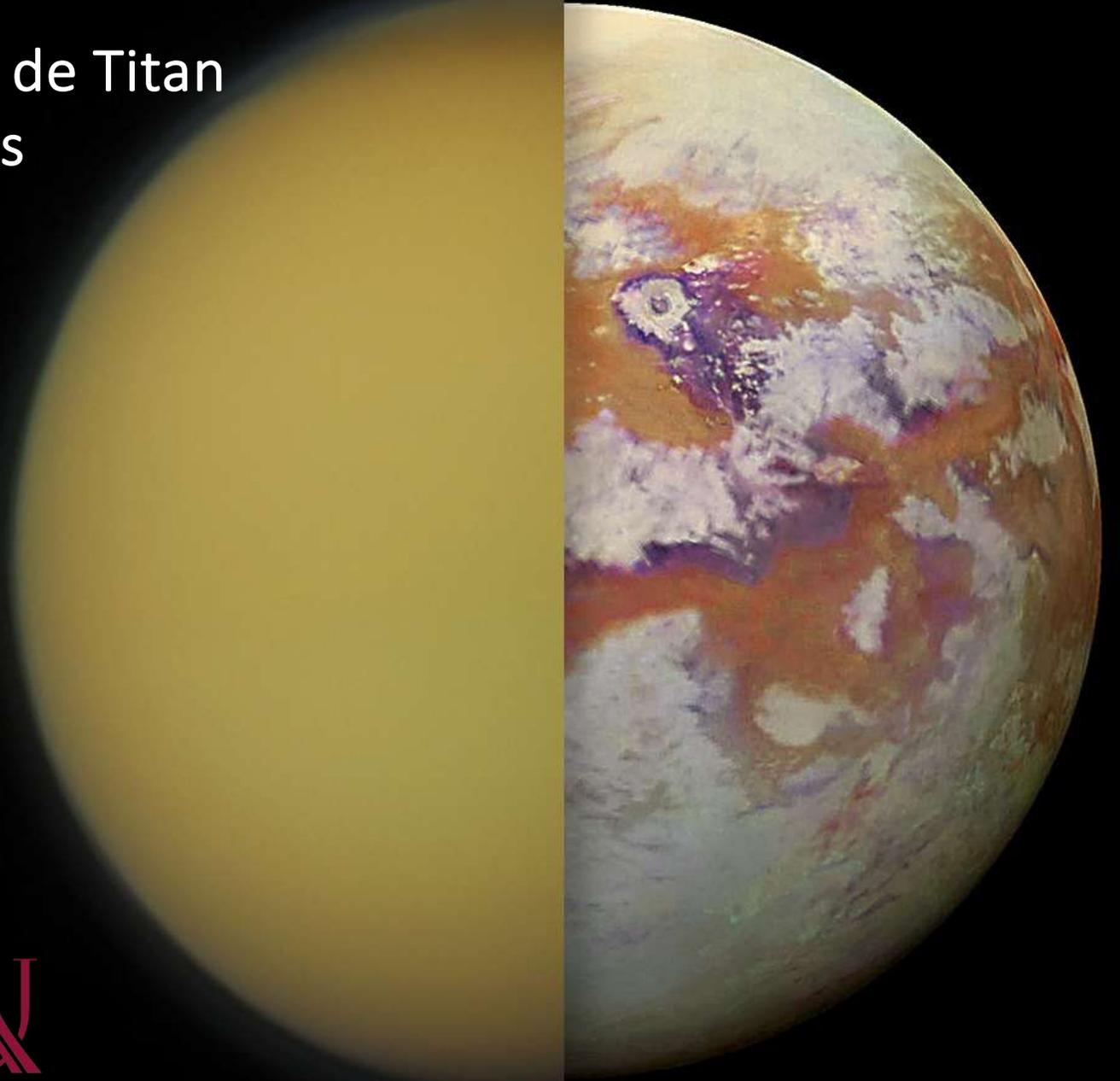


Un regard vers la surface :
Cartographie de l'albédo de surface de Titan
à l'aide des données hyperspectrales
infrarouges de Cassini/VIMS



Maël Es-Sayeh

Institut de Physique du Globe de Paris

Université Paris Cité

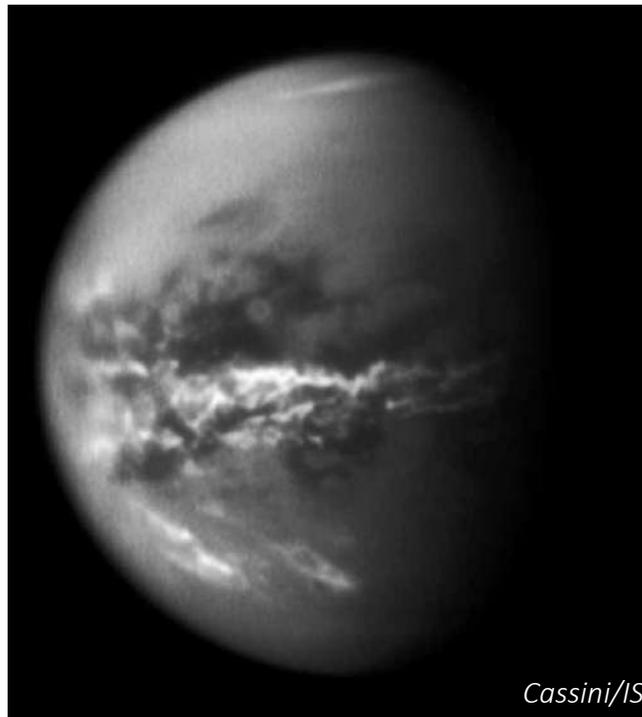
Colloque Hyperspectral

5-6 Juillet 2023, Paris



Un corps similaire à la Terre

- Seule lune avec une atmosphère
- Seul corps extraterrestre avec un liquide à sa surface

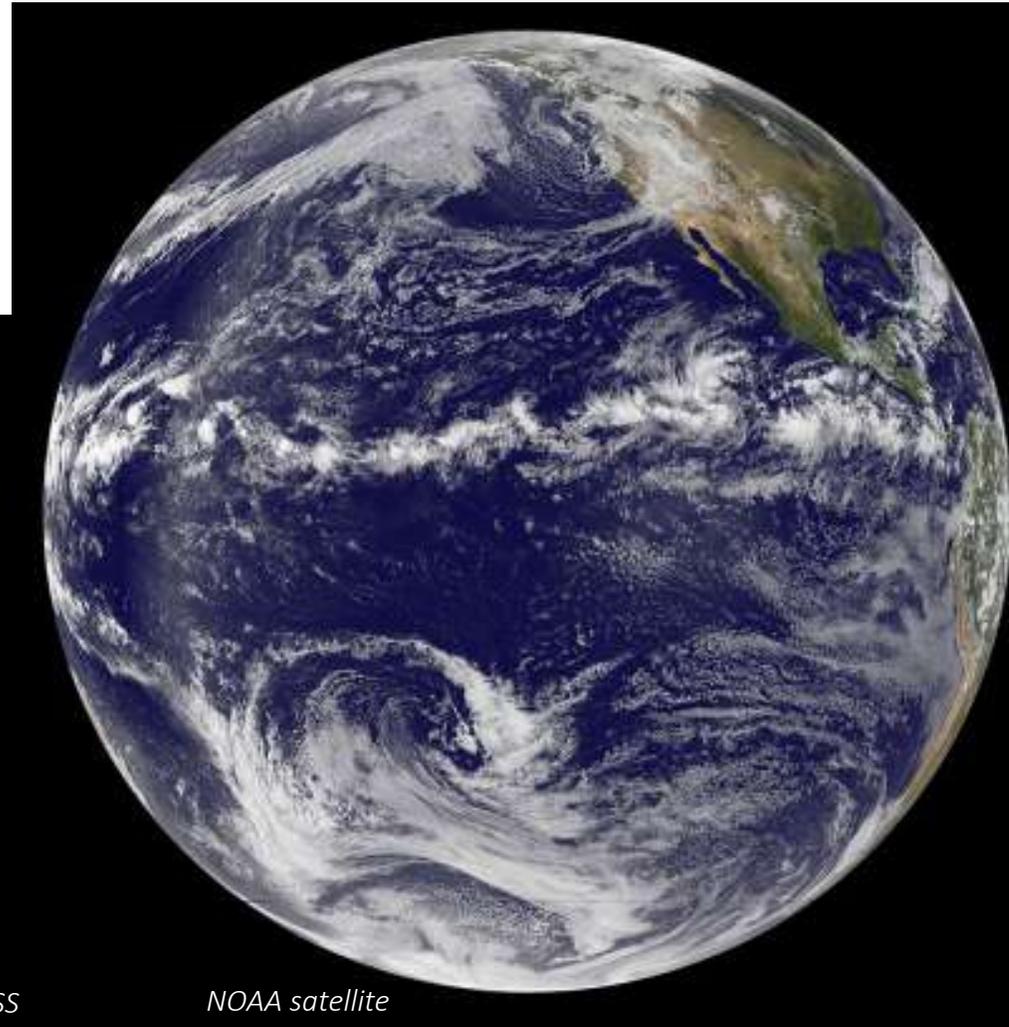


$R_T = 2575 \text{ km}$

$P_{\text{surf}} = 1.45 \text{ atm}$

$T_{\text{surf}} = 94 \text{ K}$

Composition: N_2 , CH_4 , C_2H_6 , Ar



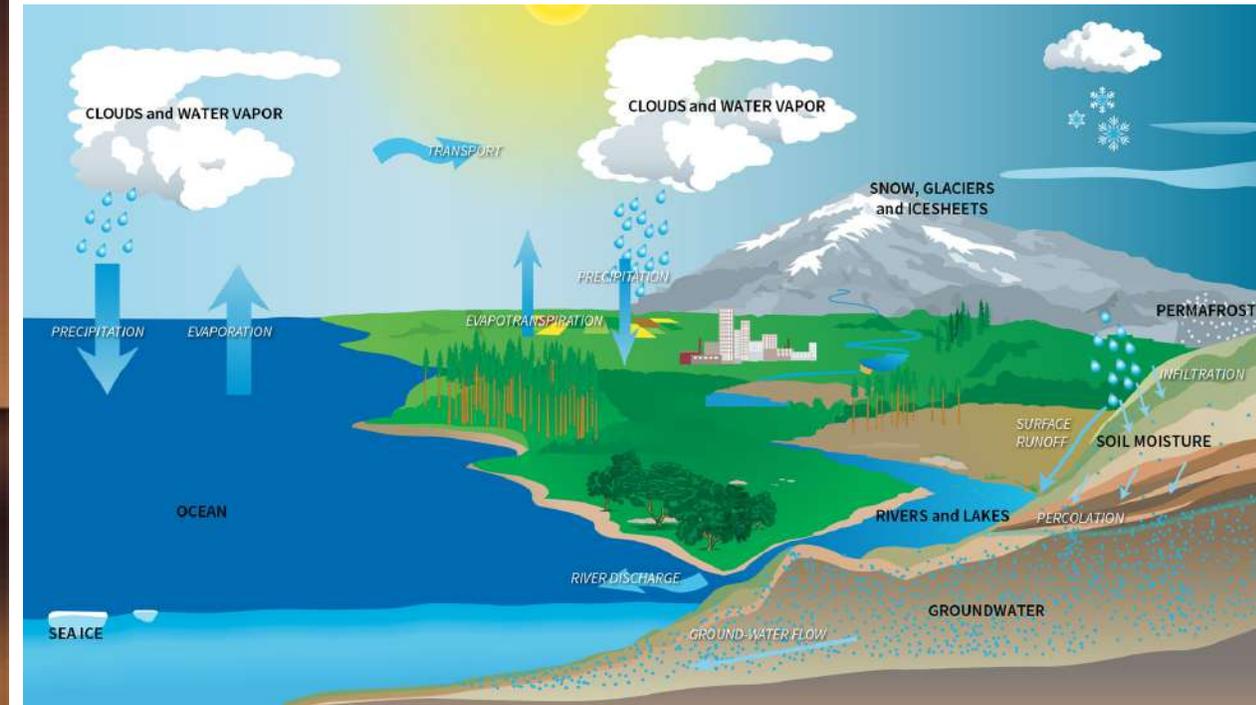
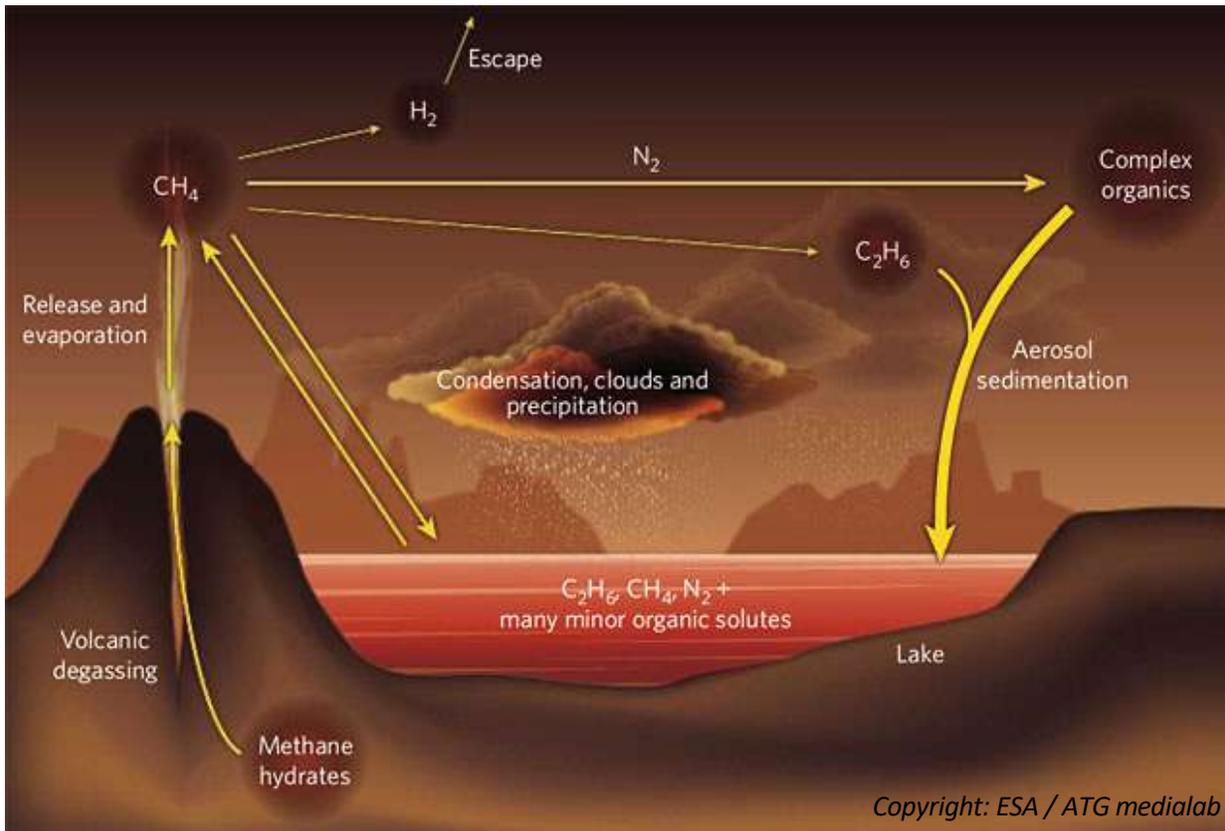
$R_E = 6371 \text{ km}$

$P_{\text{surf}} = 1 \text{ atm}$

$T_{\text{surf}} = 288 \text{ K}$

Composition: N_2 , O_2 , H_2O , Ar

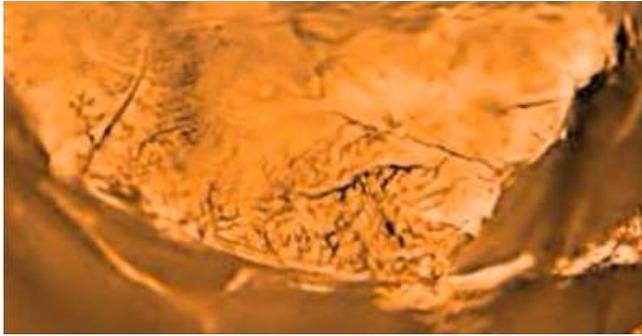
Cycle du méthane analogue au cycle de l'eau sur Terre



Pluies érodent la surface, creusant vallées et canyons par érosion fluviale et pluviale → Géologie en relation avec le climat

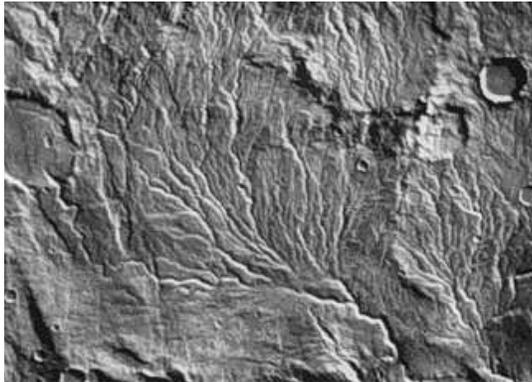
Réseaux de rivières

Titan (15 km altitude)



ESA, NASA, JPL, University of Arizona

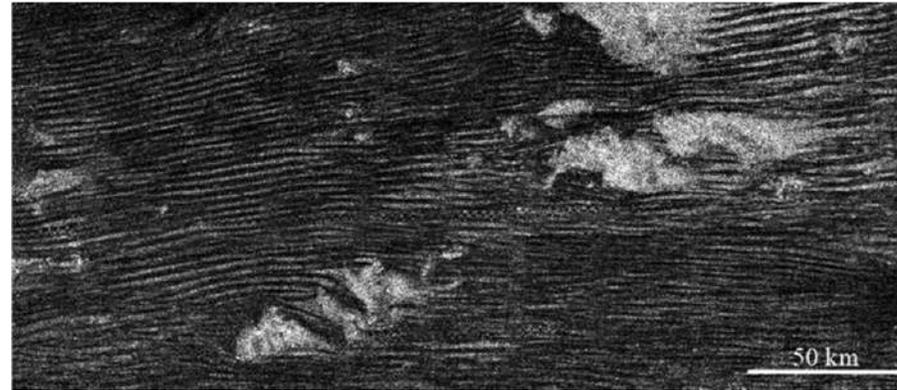
Mars



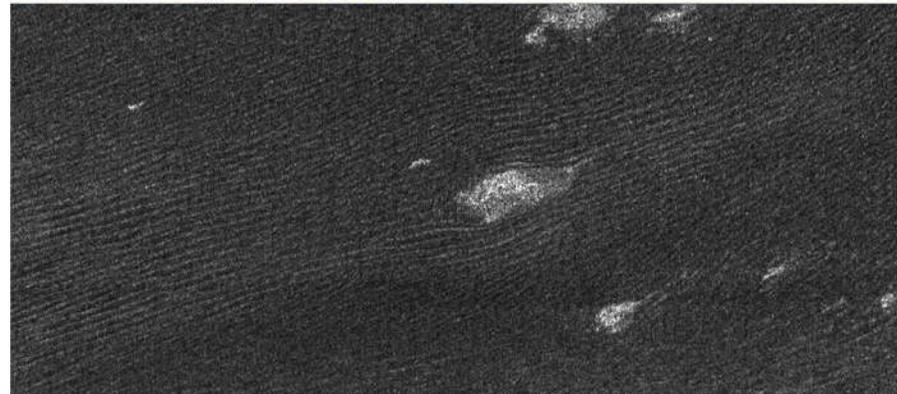
Yemen, Earth



Champs de dunes à l'équateur (vents capables de soutenir leur développement)

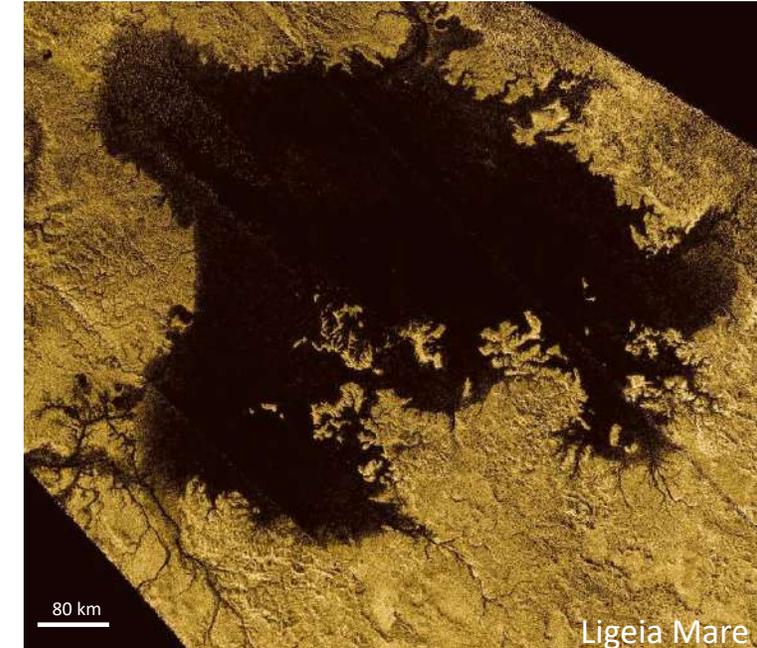


Namibia, Earth

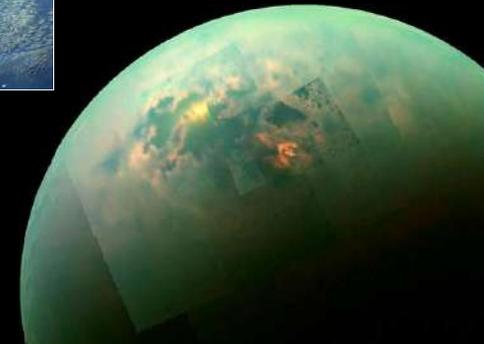


ESA, NASA, JPL

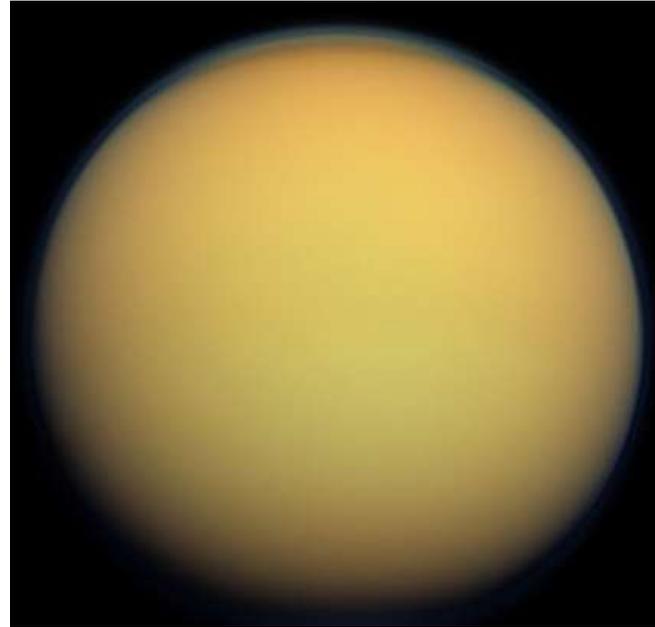
Mers et lacs d'hydrocarbures aux pôles



Ligeia Mare



- Chimie atmosphérique complexe déclenchée par la photolyse du méthane et du diazote par les photons solaires
- Productions d'hydrocarbures et de nitriles : chimie prébiotique
- Brume orange dans le visible

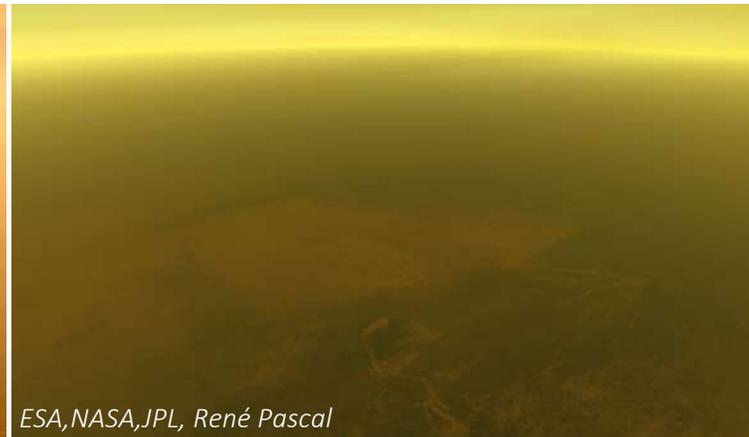


Londres sous la pollution

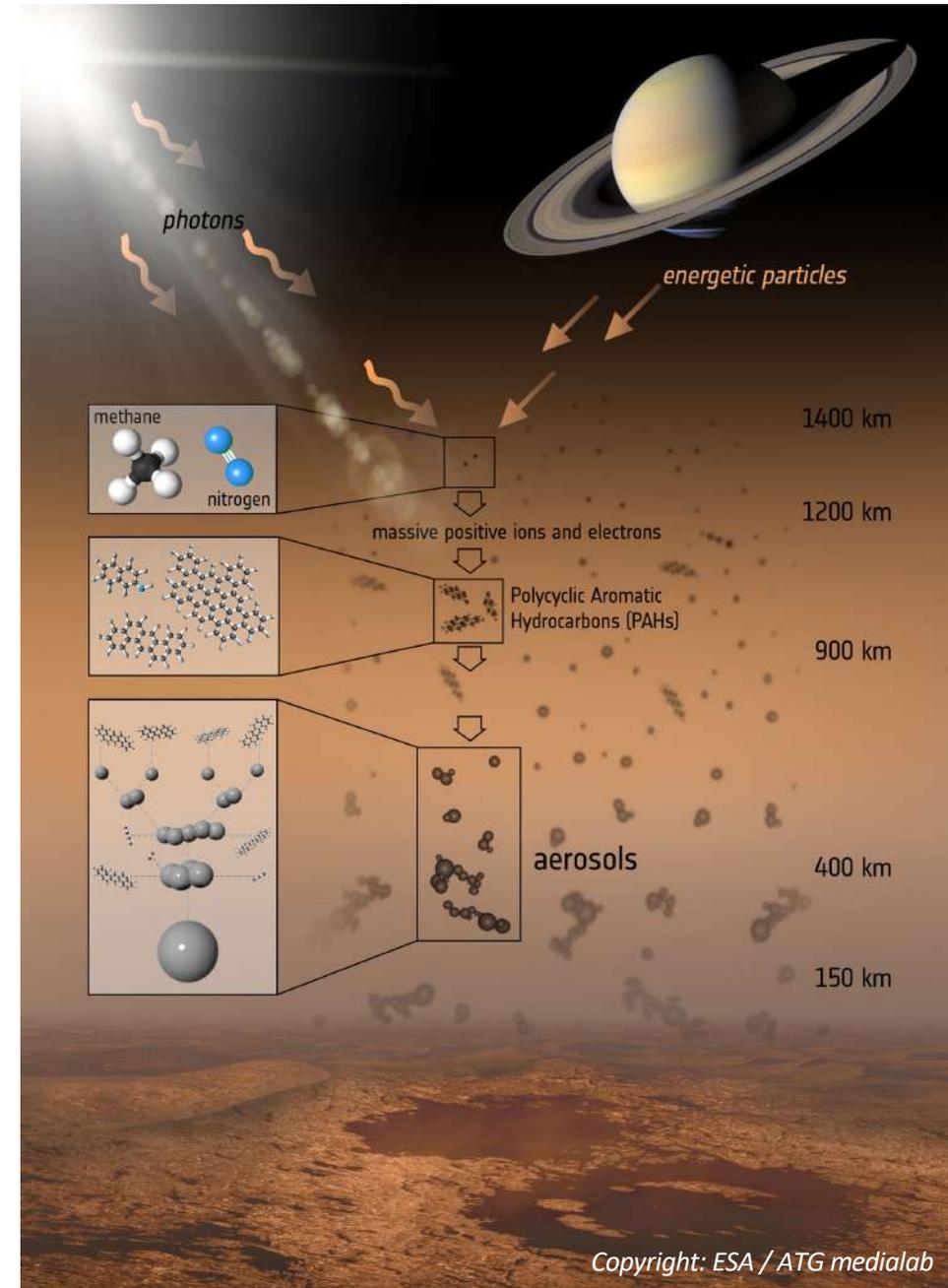


Andrew Holt

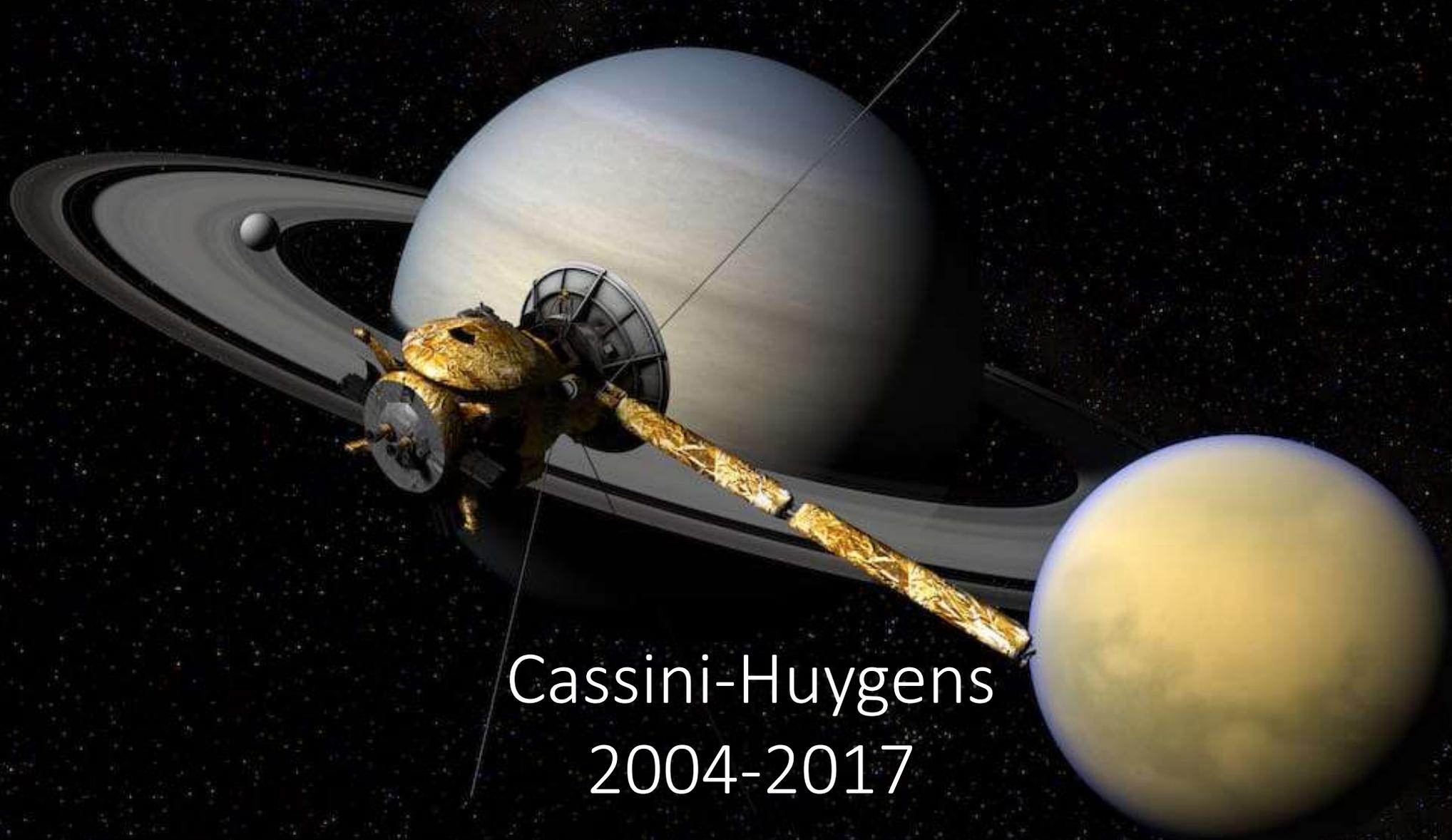
Titan par Huygens (70 km altitude)



ESA, NASA, JPL, René Pascal



Copyright: ESA / ATG medialab



Cassini-Huygens
2004-2017

VIMS (Visual and Infrared Mapping Spectrometer)

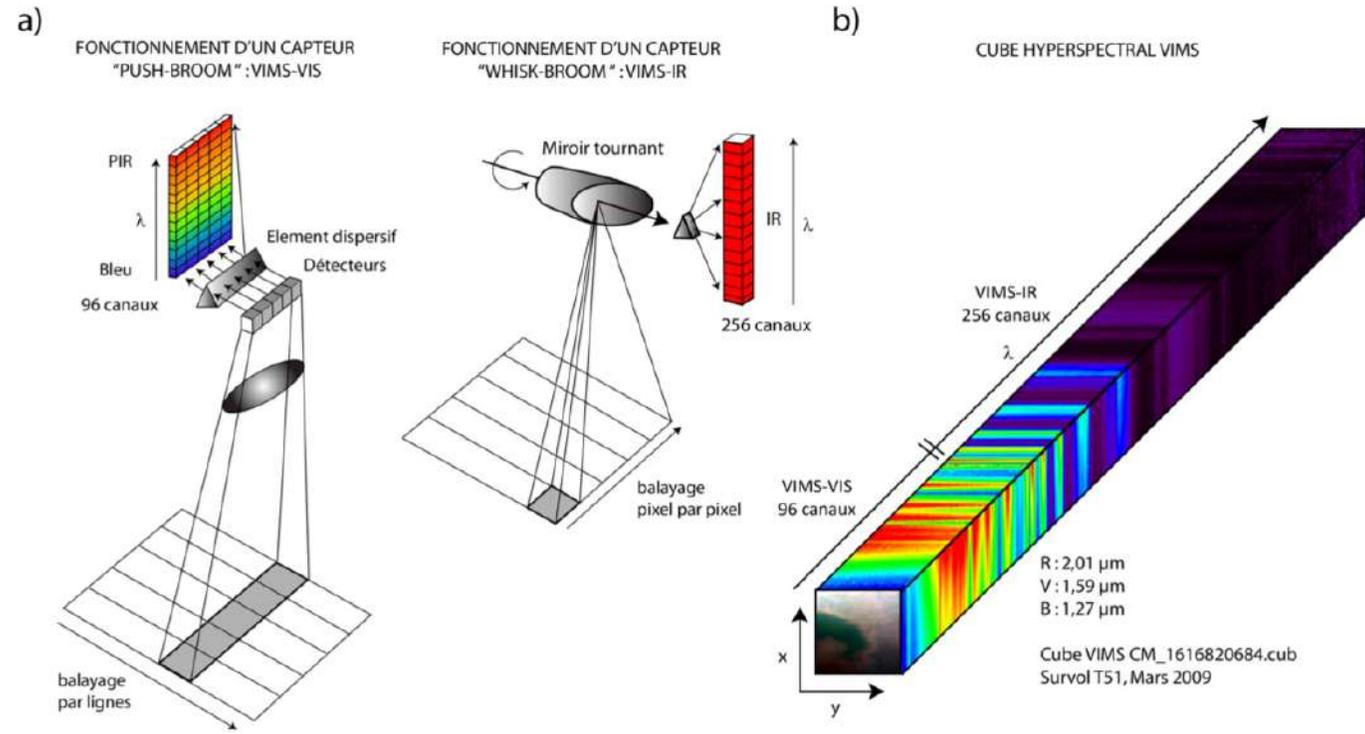
Spectro-imageur :

Cubes hyper-spectraux (x,y,λ) :

→ 64x64 pixels, 352 canaux spectraux

2 détecteurs distincts :

- VIMS-visible: $0.35 \mu\text{m} \rightarrow 1.05 \mu\text{m}$, 96 canaux



Titan's cold case files - Outstanding questions after Cassini-Huygens

Nixon et al. (2018)

- Was methane captured into Titan's interior, or formed later?
- What is the relative balance of methane resupply/destruction, and is there a net positive or negative flux into the atmosphere today?
- Has Titan's atmosphere collapsed in the past (see e.g. Lunine 1997a)?
- Is ethane being entirely sequestered in the interior?
- Is Titan currently, or has it been in the past, cryovolcanically active?
- Has Titan post-formation experienced large scale plate tectonics or crustal upheaval?
- How has internal activity affected the surface age in various different terrains?
- Has activity allowed for the formation of a subsurface ocean?
- What simple and complex compounds are covering Titan's surface, and how do these vary from region to region?
- How does the surface change on short and long timescales, e.g. rain storms, erosion, and deposition?
- Were the potential paleobasins that have been identified in the south polar terrain truly once liquid filled?
- How are lacustrine basins, particularly the sharp edged depressions, formed?
- While available topography suggests at least local subsurface communication, the extent that the lakes are globally or regionally interconnected remains a mystery.
- Similarly, the transport pathways for methane and other hydrocarbons from the atmosphere to the lakes and seas remains a mystery.
- And finally, where there ever lakes and seas?
- What is the greatest depth of Kraken Mare, Titan's largest sea?
- Why is Ontario Lacus the only stable lake in the northern hemisphere?
- What is the interaction of storms with the north-polar lakes and seas (e.g., Tokano 2009, 2013)?
- What is the nature of the north-polar cloud features observed by VIMS at 2.1 μm but not by VIMS and ISS at other shorter and longer wavelengths (e.g., Turtle et al. 2016, Turtle et al. 2018)?
- What is the distribution of subsurface methane reservoirs (e.g., Lora et al. 2015; Newman et al. 2016)?

...

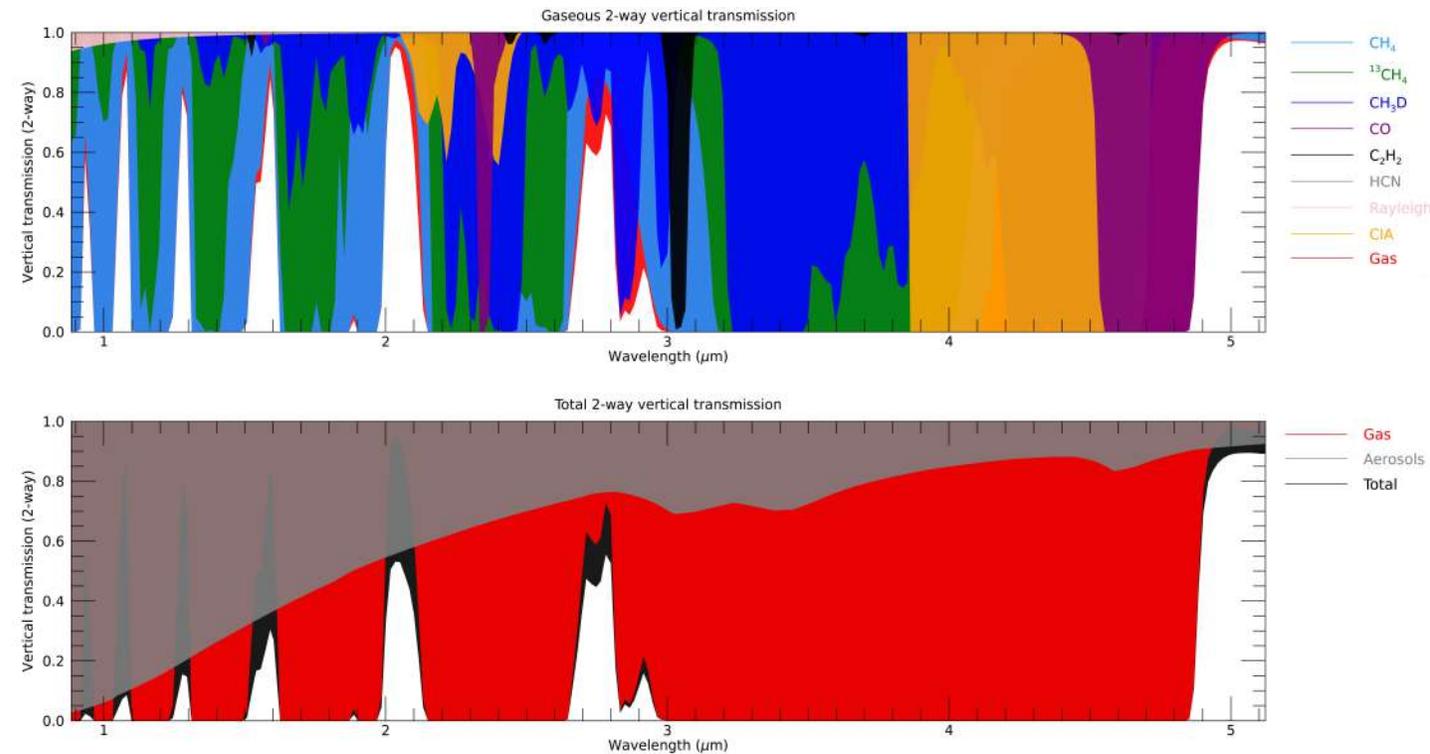
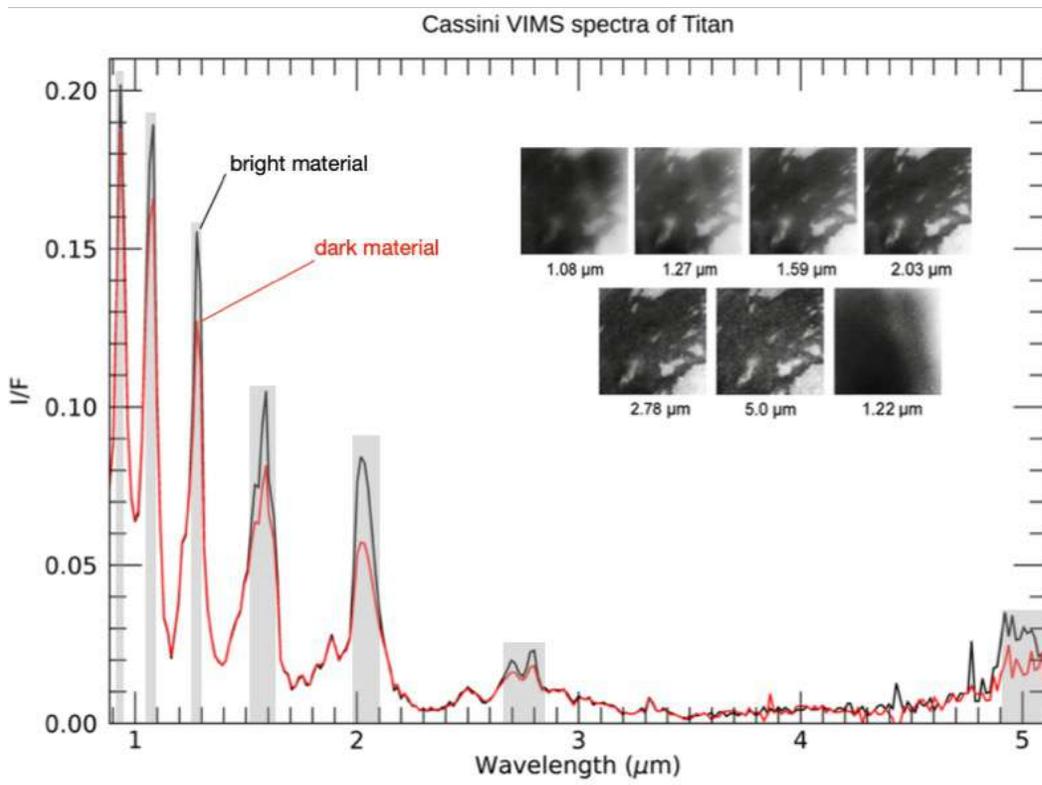
Titan's 2004 color map - Outstanding questions after Cassini Huygens

May 24, 2008

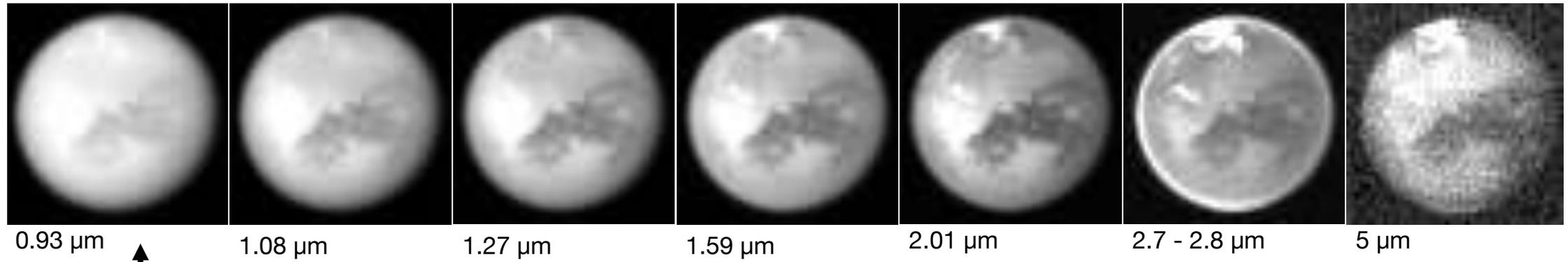
→ Composition de surface inconnue

Difficultés à distinguer le signal de surface du signal atmosphérique dans le proche-IR

- Absorption par les gaz (principalement méthane): surface visible seulement dans 7 « fenêtres » étroites
- Diffusion par les aérosols : images floues
- Géométrie d'observation variable (incidence, émergence, phase) entre survols: « coutures » entre les observations

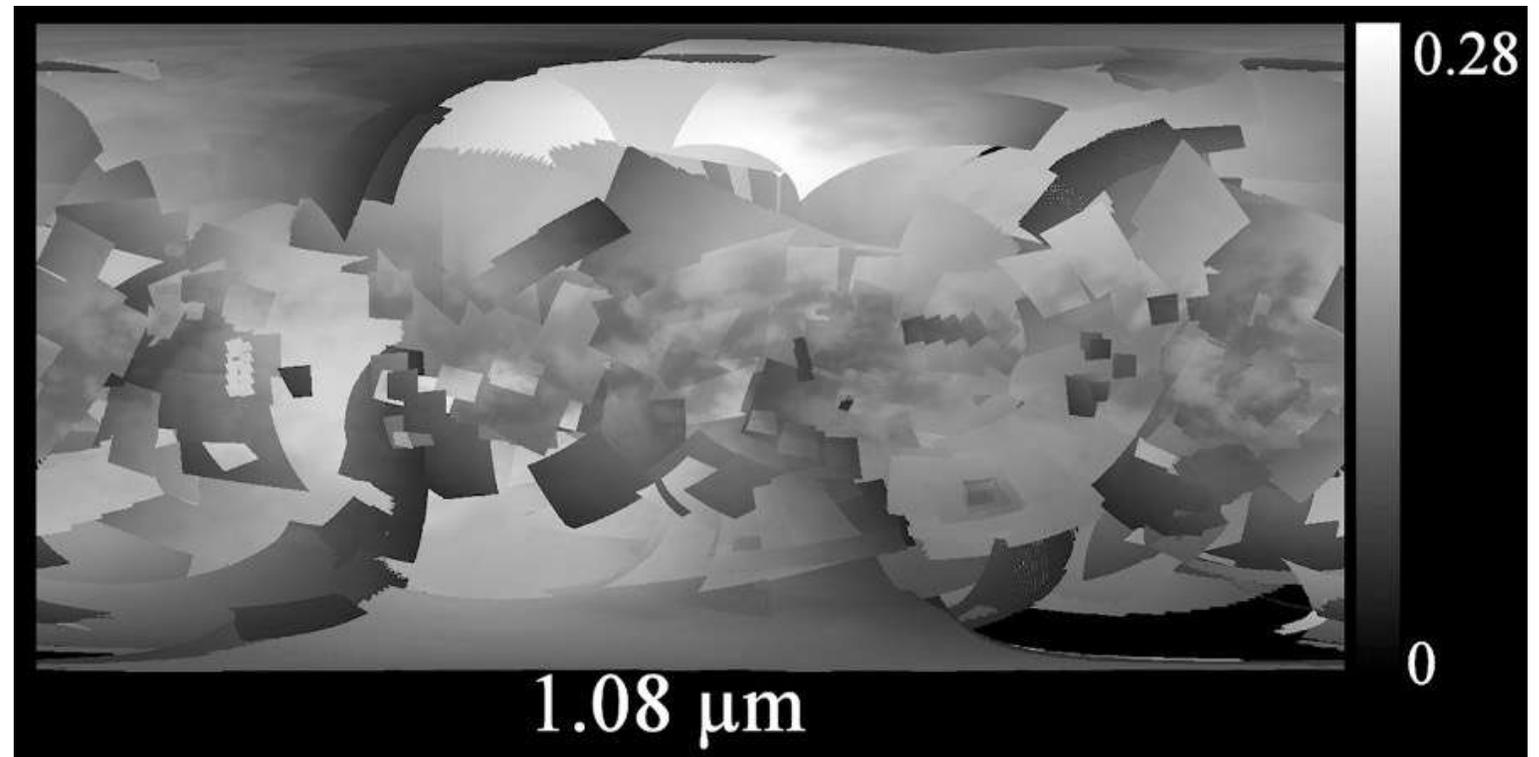


Cassini-VIMS cube 1477456872 (flyby TA)



Diffusion : images floues

Coutures entre les
observations dues aux
différentes géométries
d'observation



700 km

Structure atmosphérique:

- Profil Température-Pression

Gaz: abondances + listes de raies (coefficients k-corrélés)

- CH_4 , $^{13}\text{CH}_4$, CH_3D , CO , HCN , C_2H_2 , CIA, diffusion Rayleigh

Aérosols:

- Code de diffusion par agrégats fractals (Rannou et al. 2003) contraint par observations de Huygens (Doose et al. 2016) et VIMS (Rodriguez et al. in prep)
- Dimension fractale = 2.4
- > 55 km: haze (aérosols photochimiques)
- < 55 km: mist (mixture de haze et de matériaux condensés)

Surface lambertienne

0 km

70 layers of 10km

Modèle de transfert radiatif

Entrées atmosphériques fixes

- Structure (pression, température, nombre de couches, ...)
- Abondances gazeuses
- Raies d'absorption
- Propriétés optiques des gaz et aérosols

Géométrie d'observation variable

Incidence (i), émergence (e), phase (ϕ)

Solveurs des équations
du transfert radiatif
(SHDOMPP, Evans 2007)
(SPS-DISORT, Burras 2011)

Limite :
Émergence $< 55^\circ$

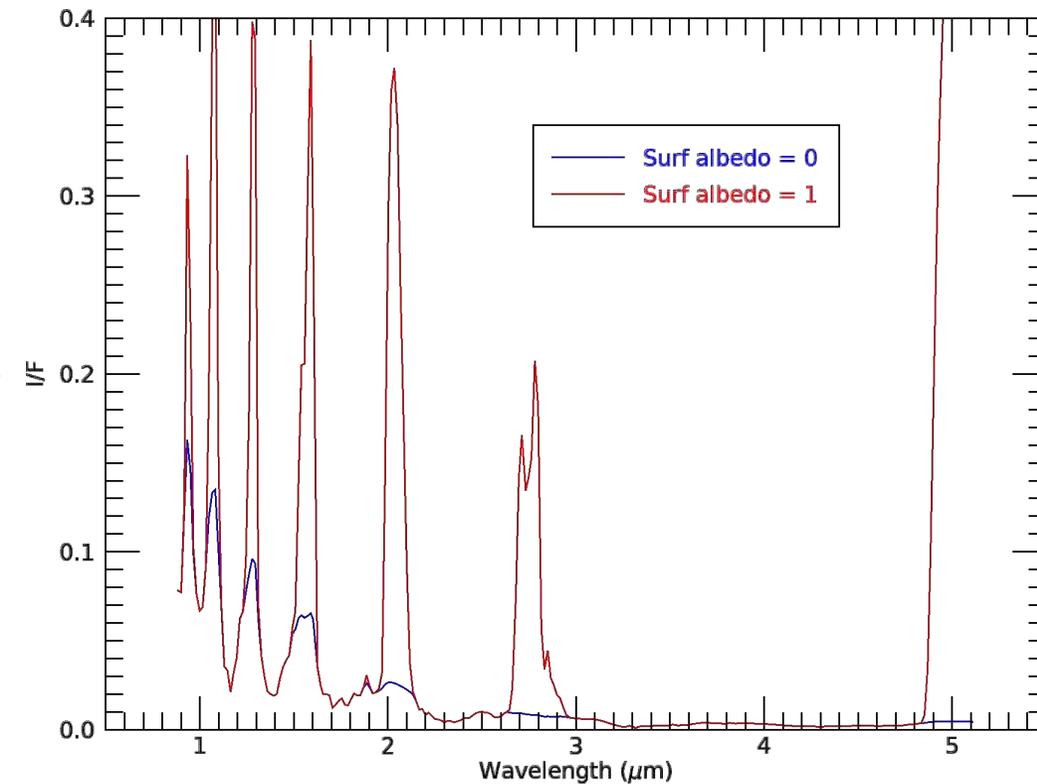
Propriétés atmosphériques variables

- Aerosol density scaling factor > 55 km
- Aerosol density scaling factor < 55 km

Surface : albédo de Lambert

A_L

Spectre simulé ($i = e = \phi = 0^\circ$)



1 spectre complet ≈ 4 min

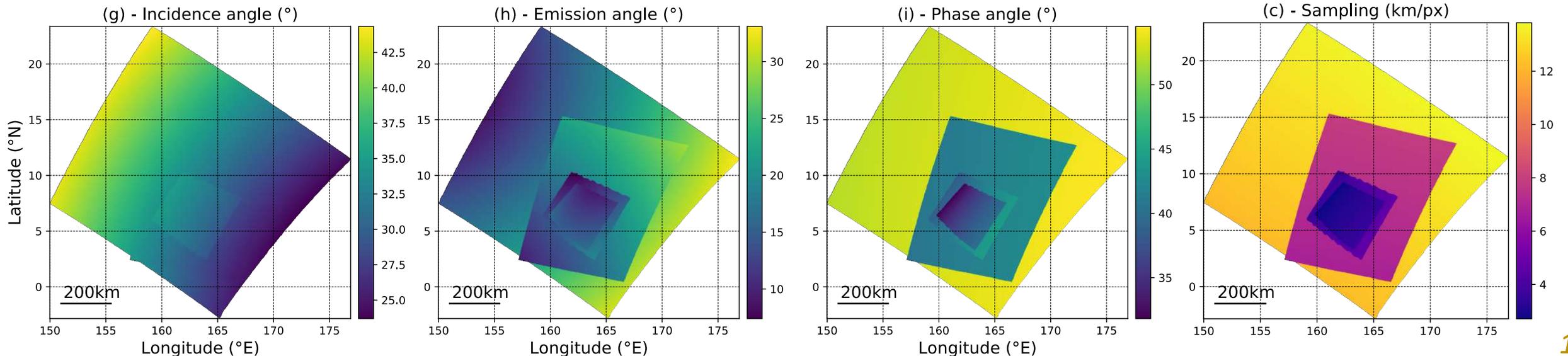
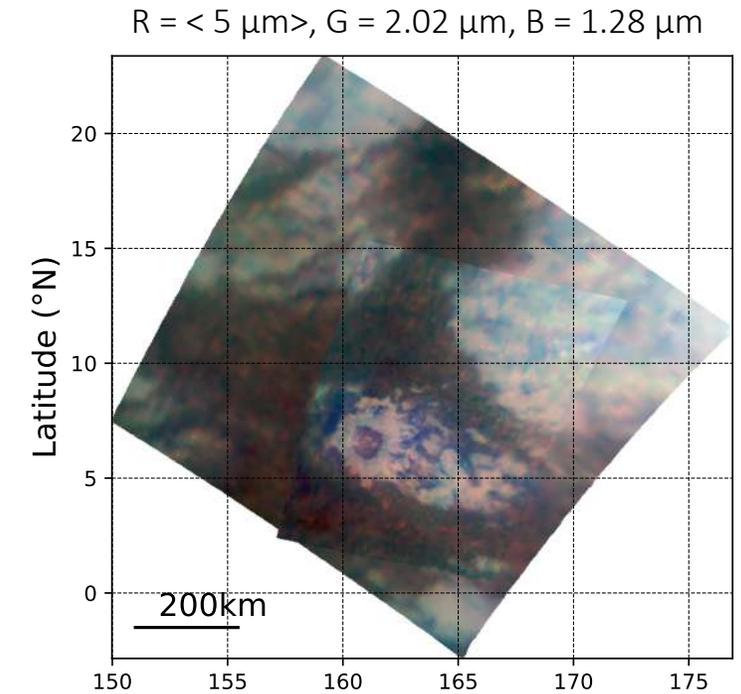
Application au cratère Selk

Proche de la région d'atterrissage de Dragonfly

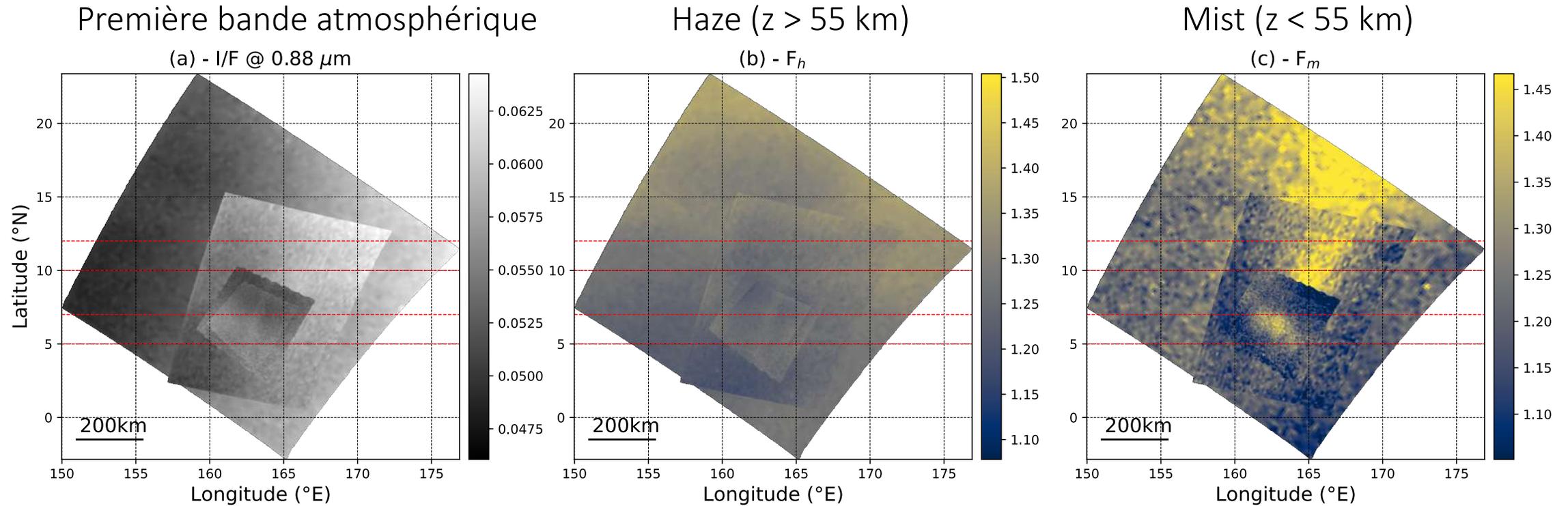
- pour **caractériser** les propriétés géologiques et climatiques de la région
- pour **proposer** des cibles d'exploration
- avec **4 cubes Cassini/VIMS** acquis à différentes dates avec des angles d'observations différents



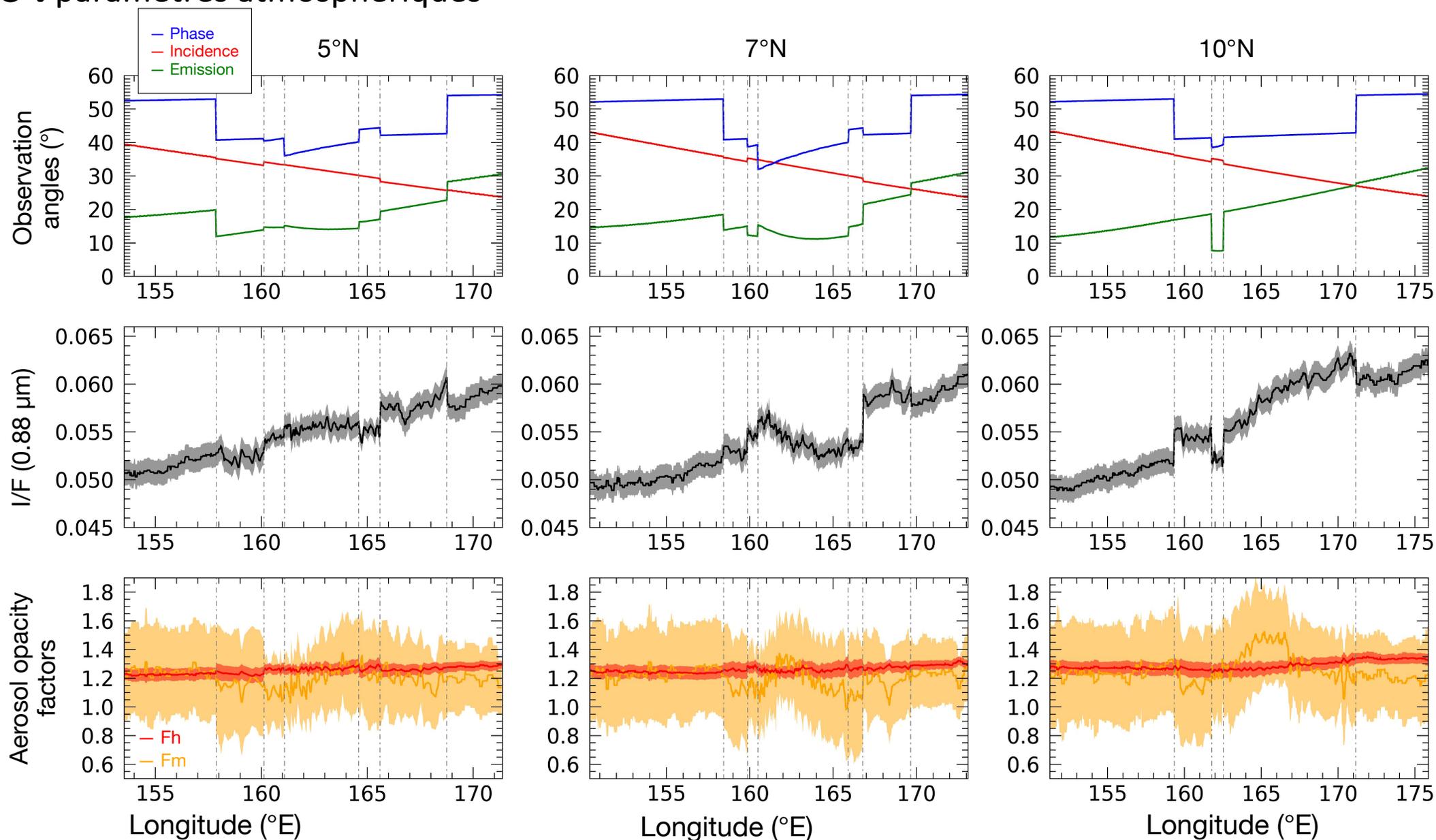
IMAGE CREDIT:
JOHNS HOPKINS APL



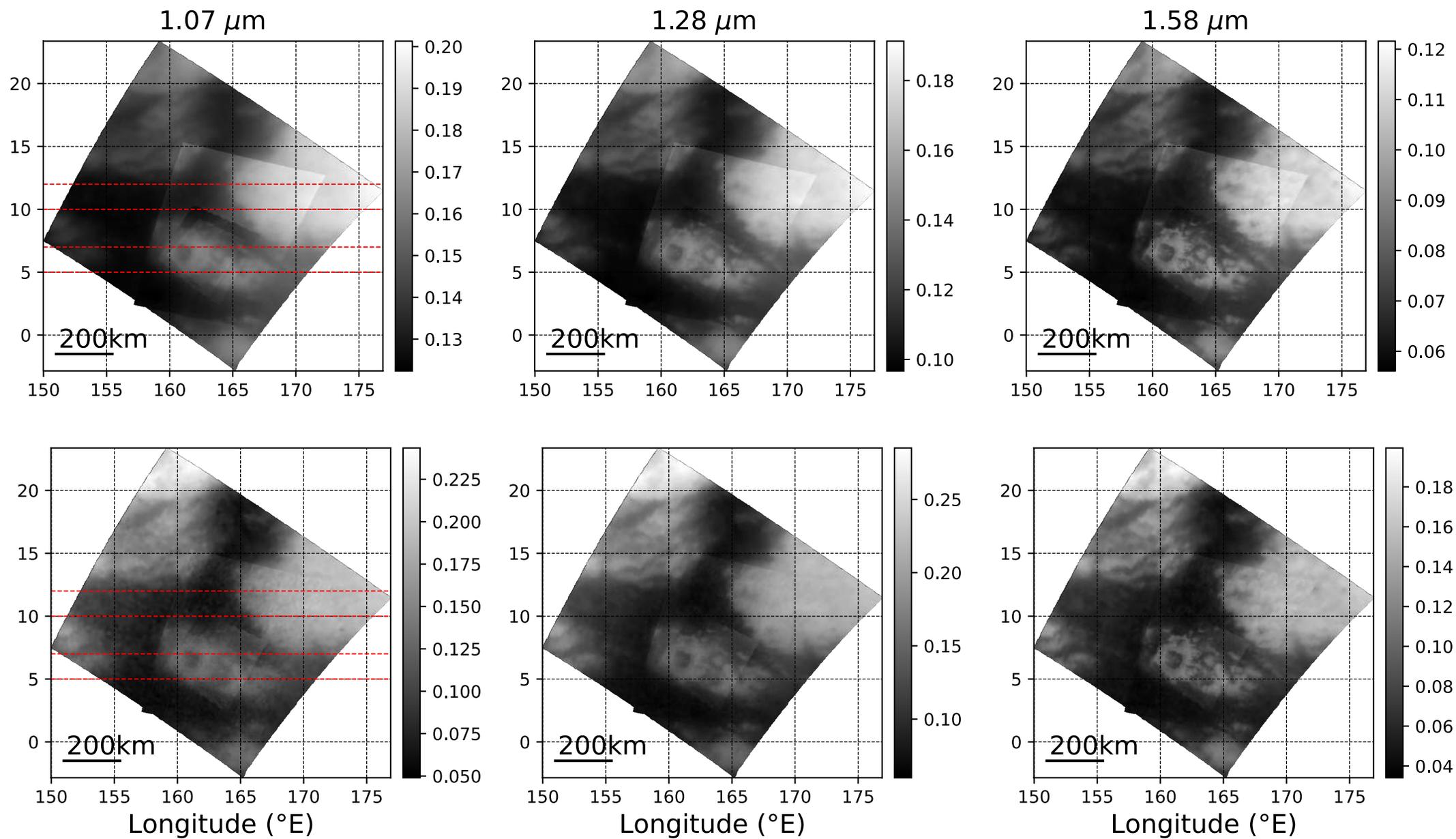
Résultats : paramètres atmosphériques



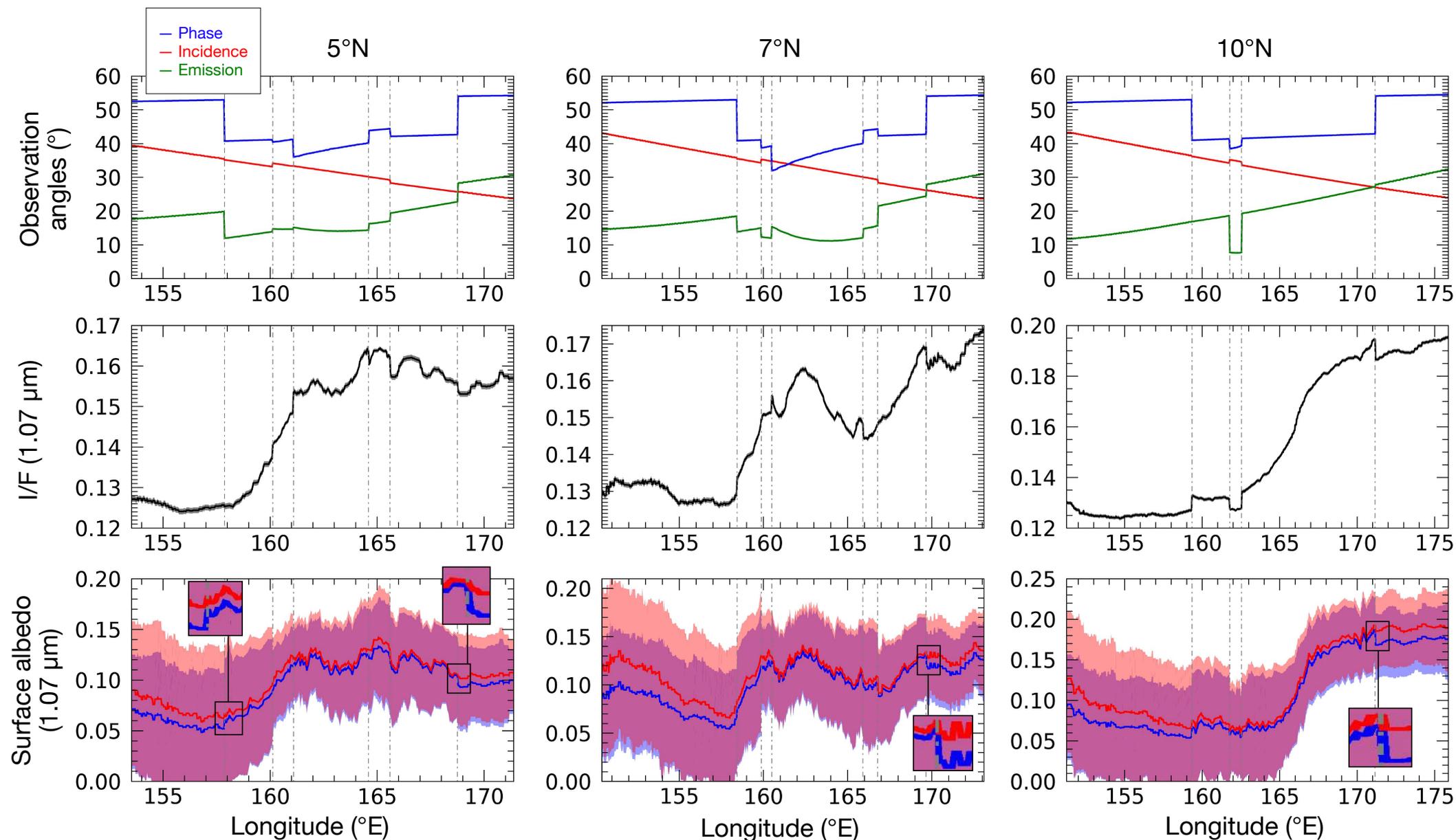
Résultats : paramètres atmosphériques



Résultats : albédo lambertien de surface (corrige empiriquement de la photométrie)

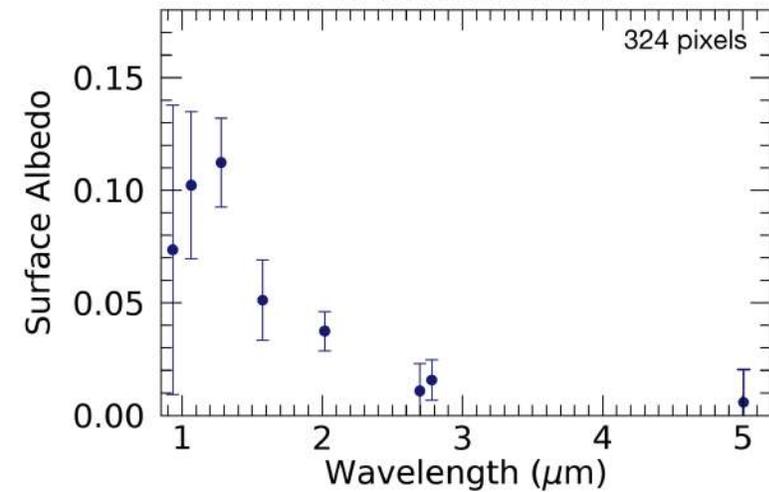


Résultats : albédo lambertien de surface (corrige empiriquement de la photométrie)



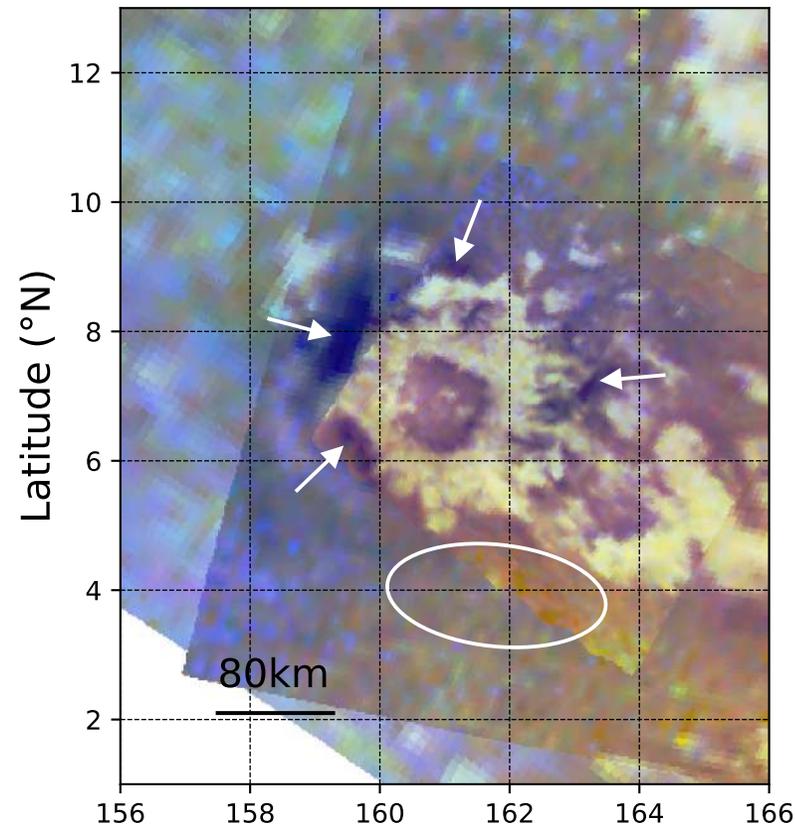
Résultats : Mosaïques RVB de rapports de bandes d'albédo de surface et d'un critère d'enrichissement en glace d'eau

(c) Dark blue unit

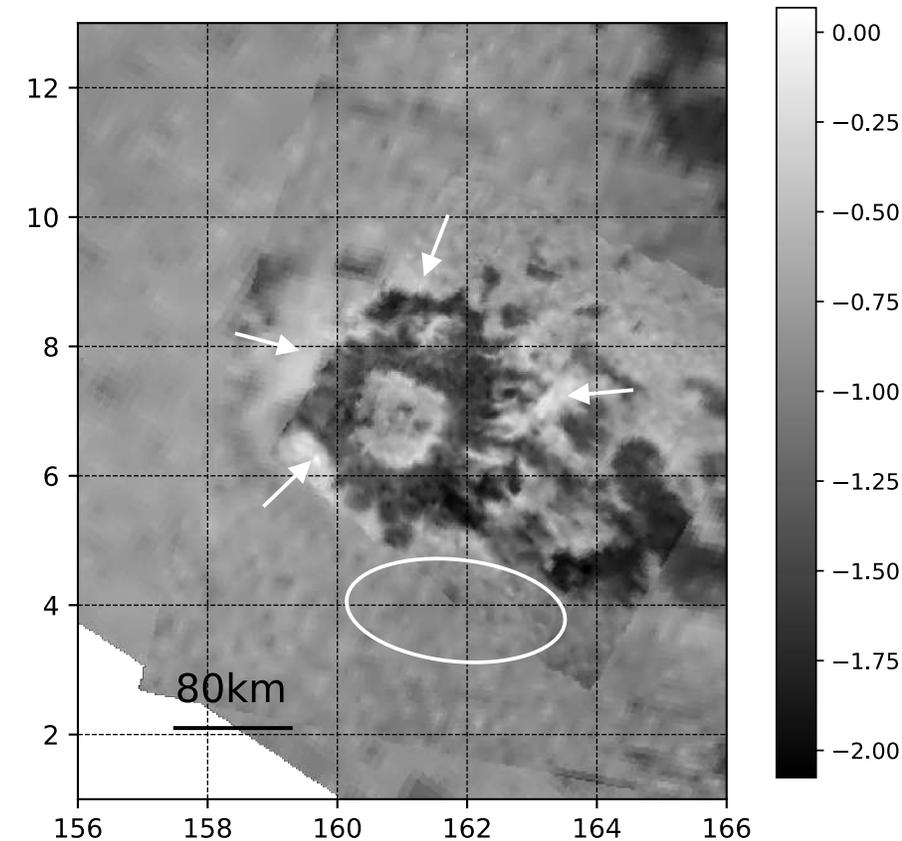


4 096 pixels :
2 semaines de calculs
parallèles sur machine à 40
cœurs

(a) - $R=1.58/1.28\mu\text{m}$,
 $G=2.02/1.28\mu\text{m}$,
 $B=1.28/1.08\mu\text{m}$

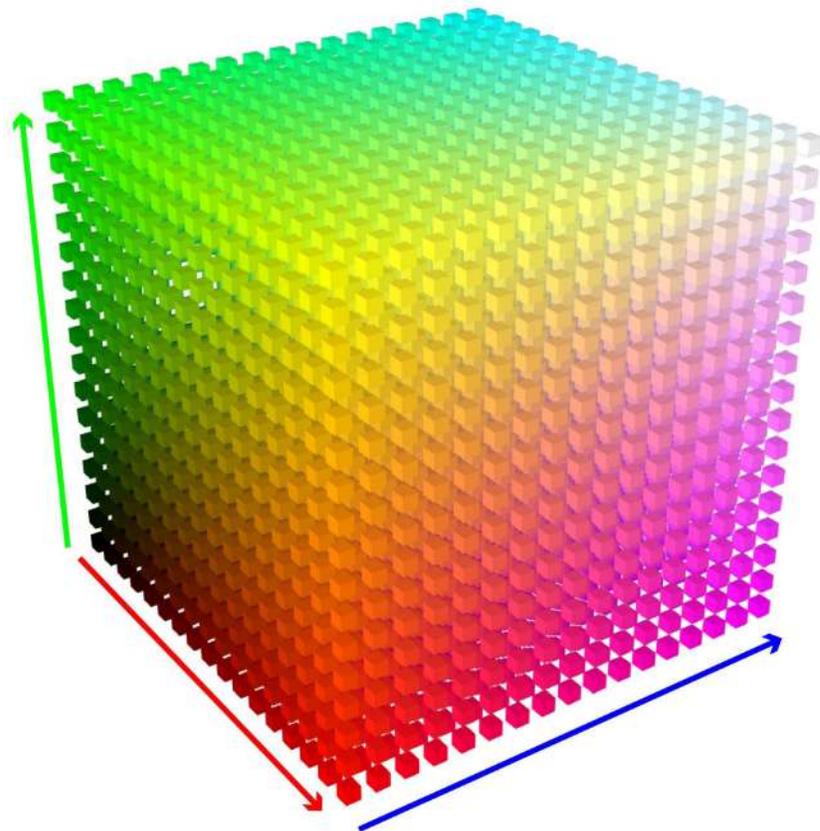


(b) - Water ice
enrichment criterion
(Coutelier et al. 2021)



Look-up-tables (LUTs)

Modèle de transfert radiatif
pour calculer **une seule fois**
les LUTs

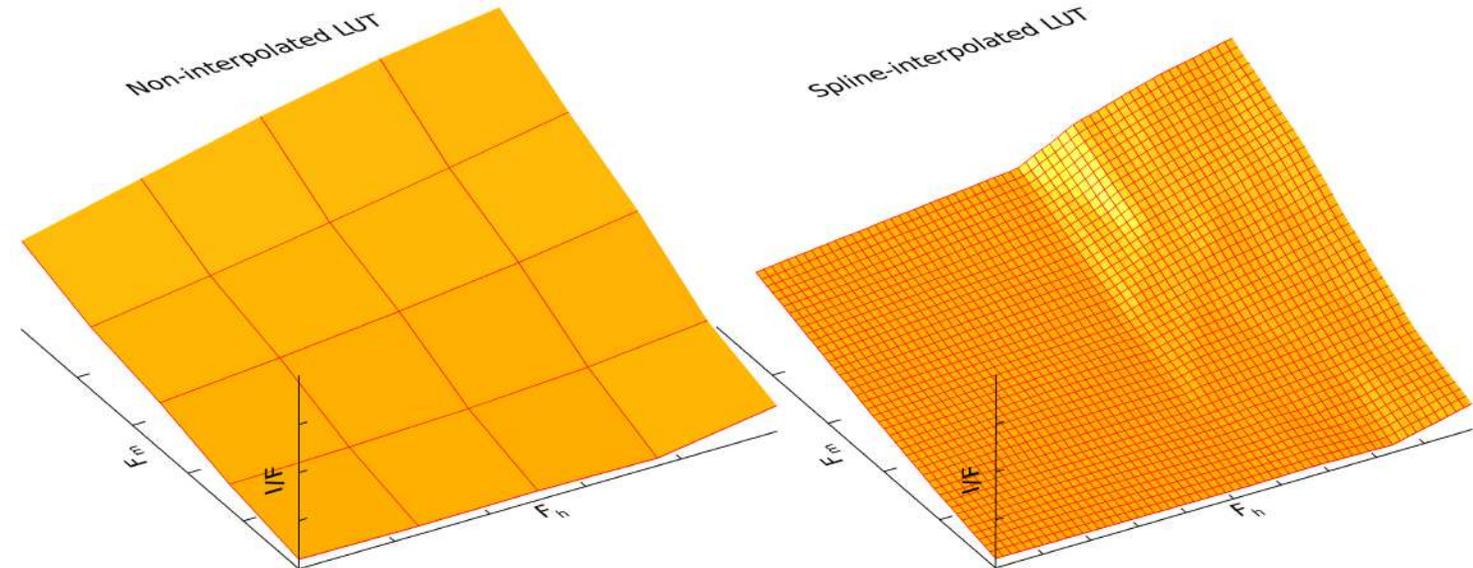


- Chaque axe : un paramètre (incidence, émergence, phase, F_h , F_m , albédo de surface, longueur d'onde)
- Chaque point: un spectre simulé de I/F

Nombre de nœuds \uparrow :

Précision \uparrow :

Temps de calcul : \uparrow



Compromis entre temps de calcul et précision pour
minimiser erreurs d'interpolation

Comment trouver le meilleur fit ?

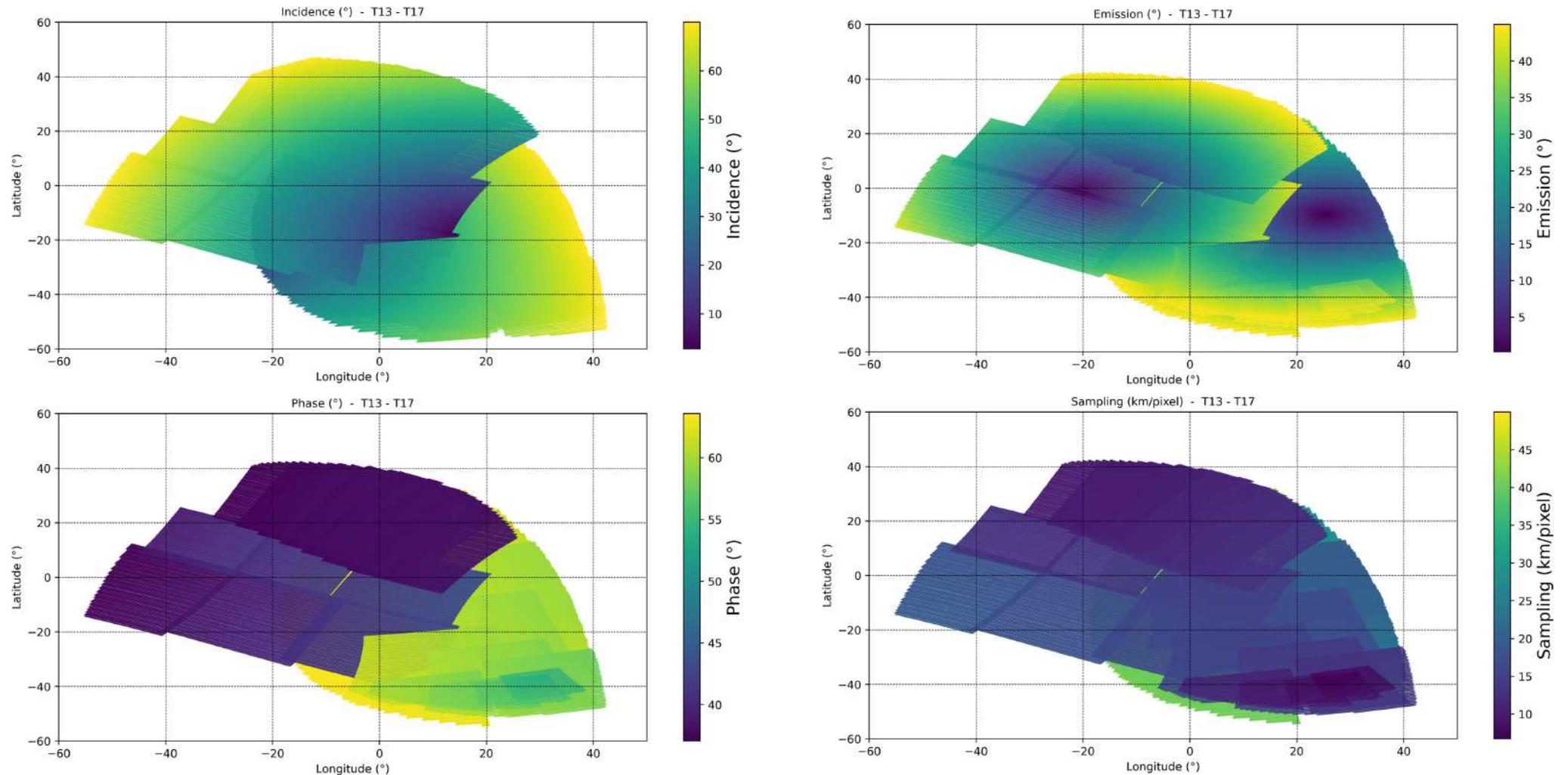
Descente du gradient



Look-up-table

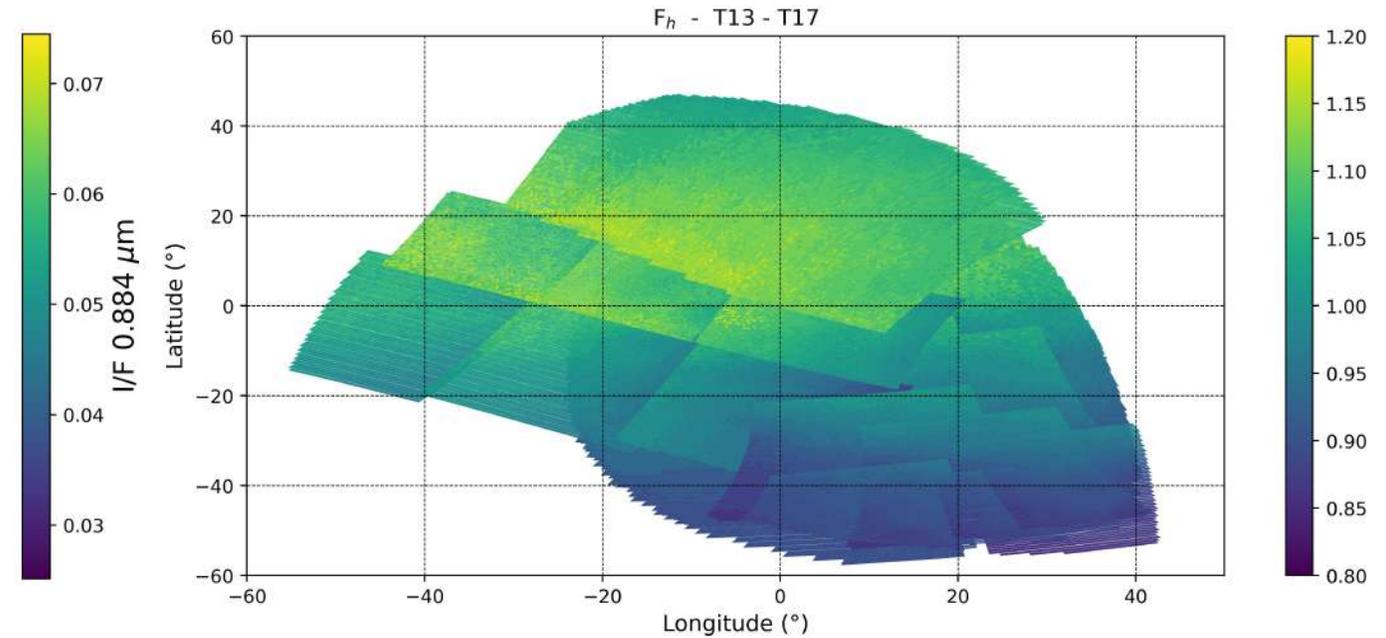
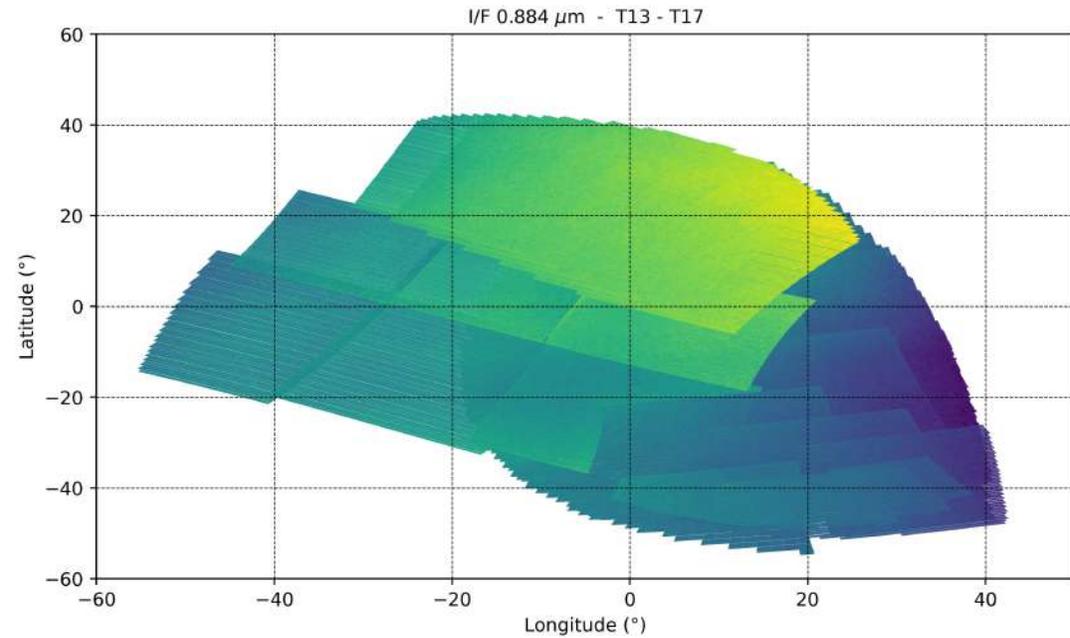


Premières inversions massives : survol T13 (30 Avril 2006) et T17 (7 Septembre 2006)



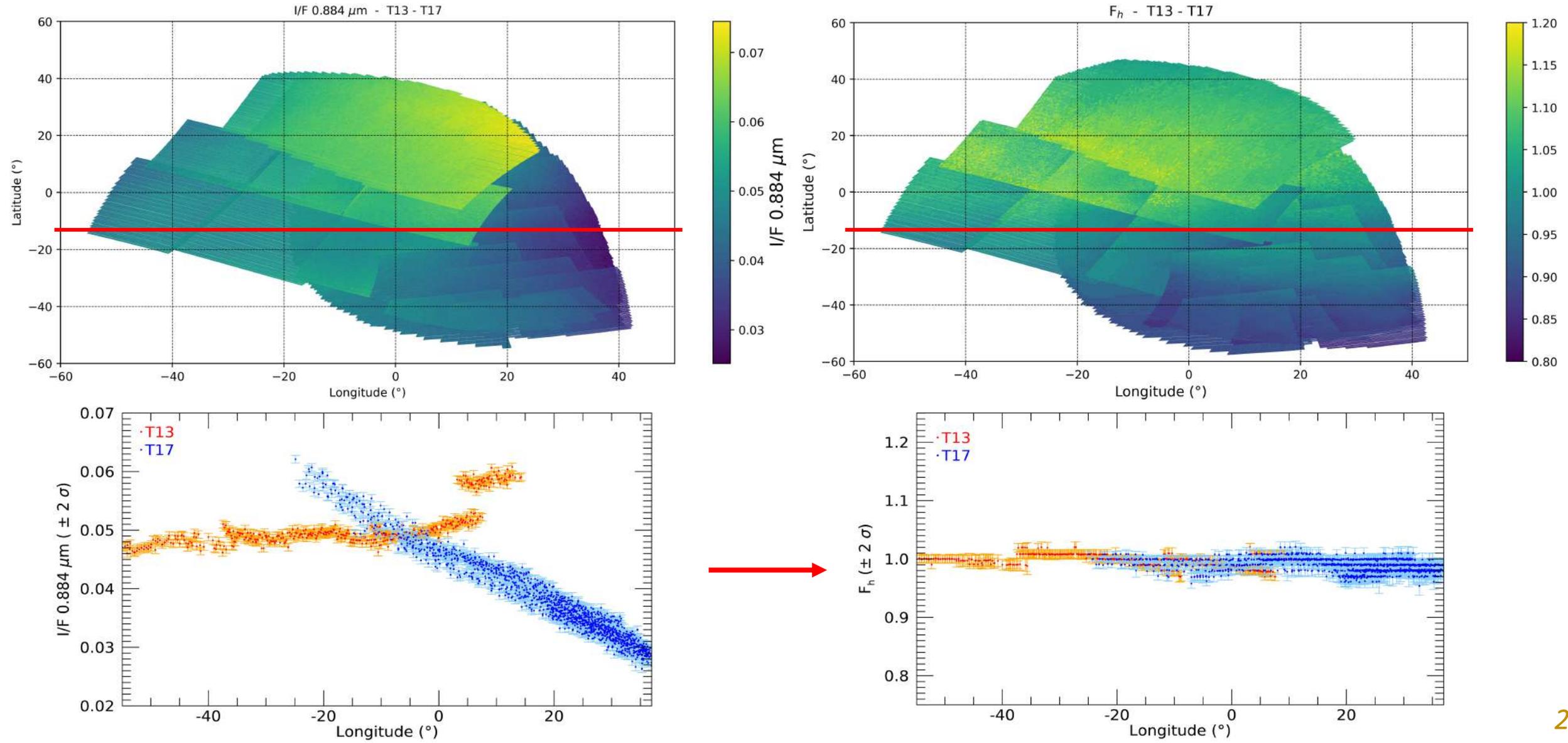
Premières inversion massives : survols T13-T17

1 – Paramètres atmosphériques



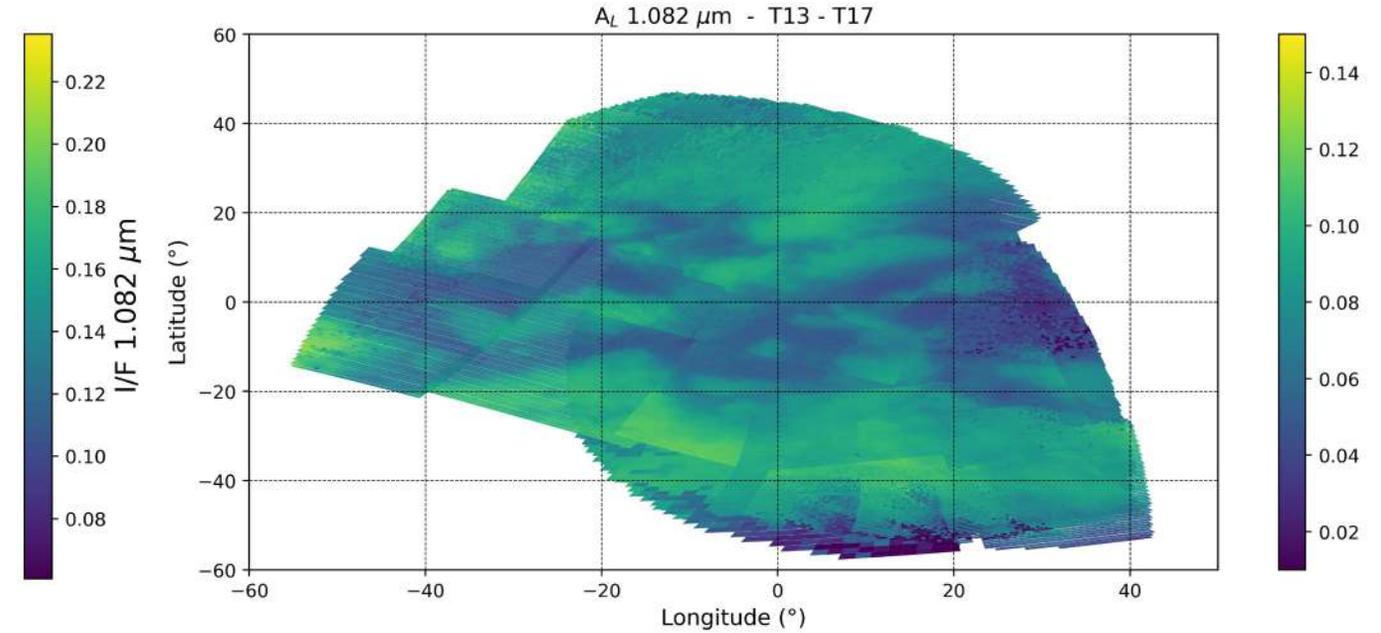
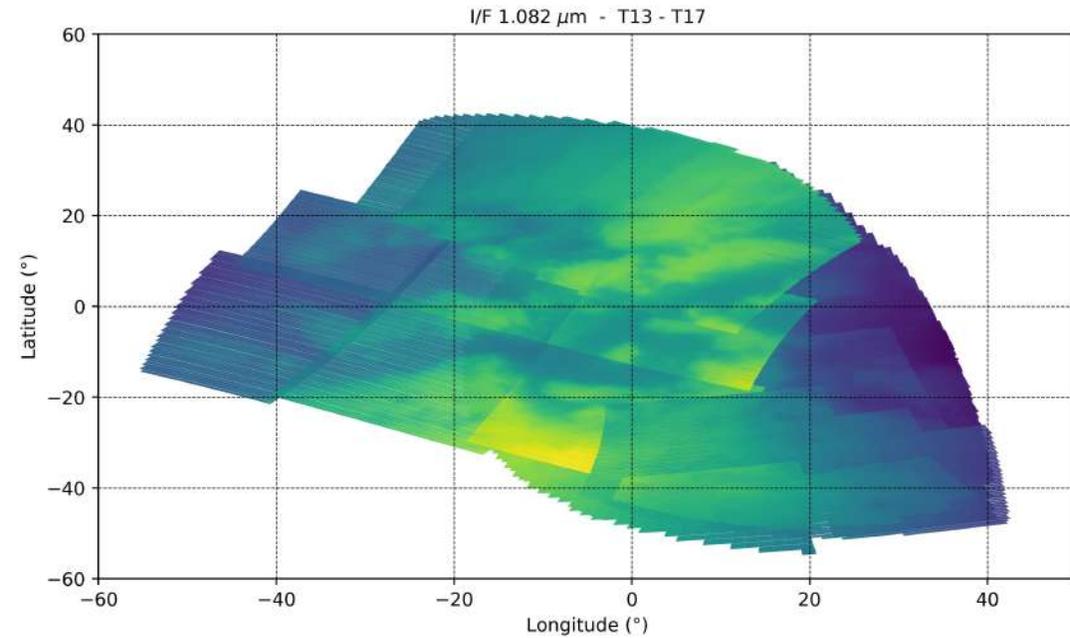
Premières inversion massives : survols T13-T17

1 – Paramètres atmosphériques



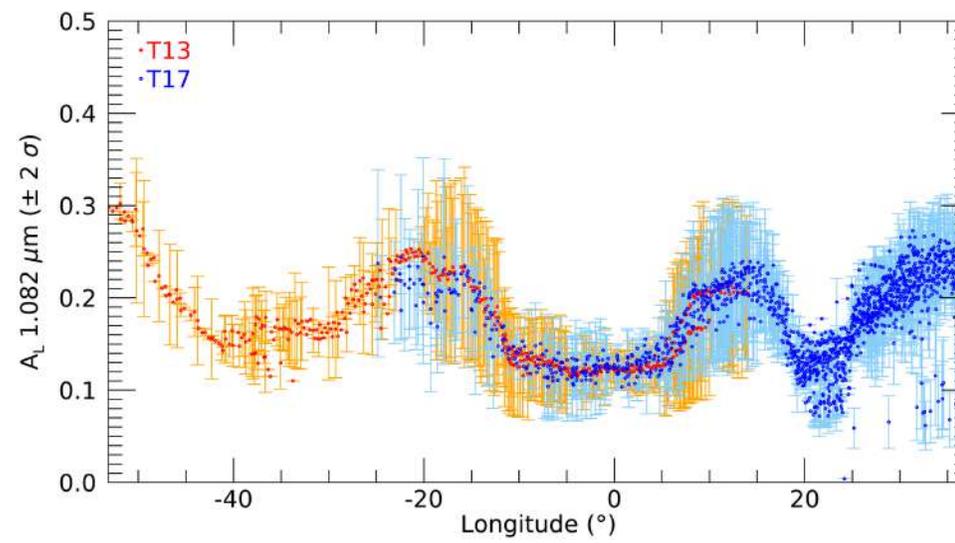
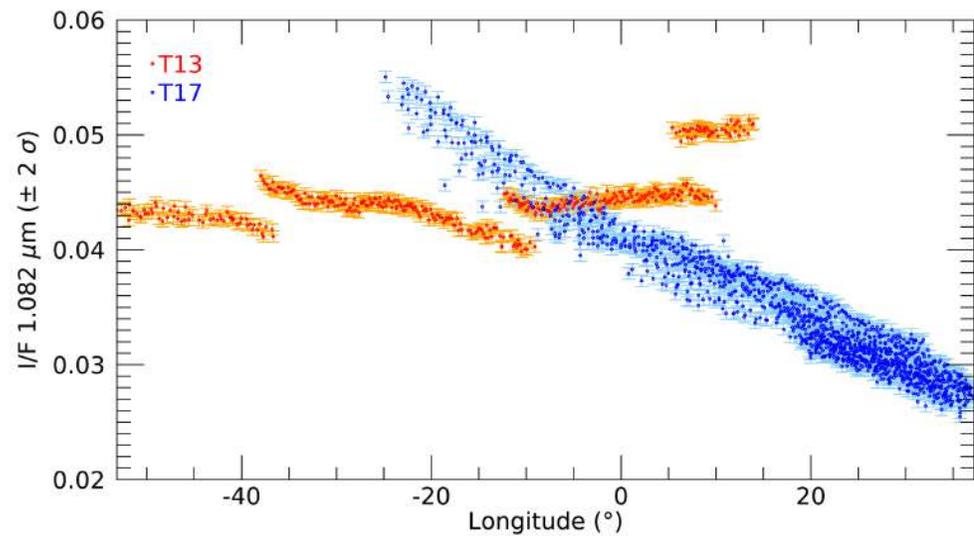
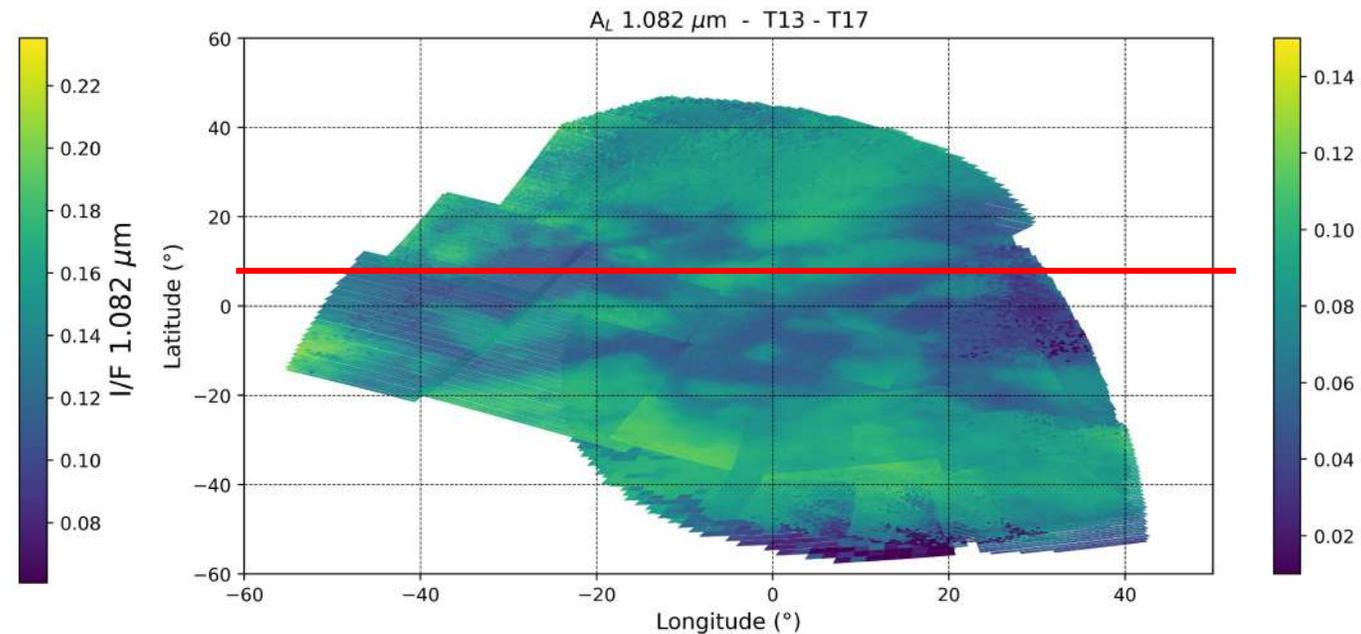
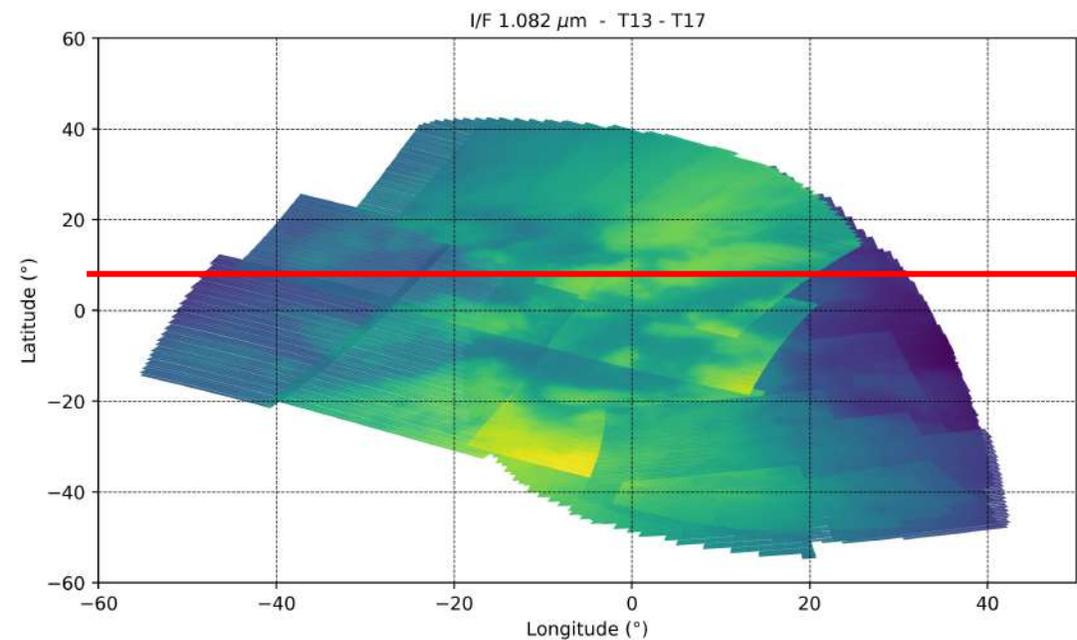
Premières inversion massives : survols T13-T17

2 – Albédo de surface (ici 1 longueur d'onde)



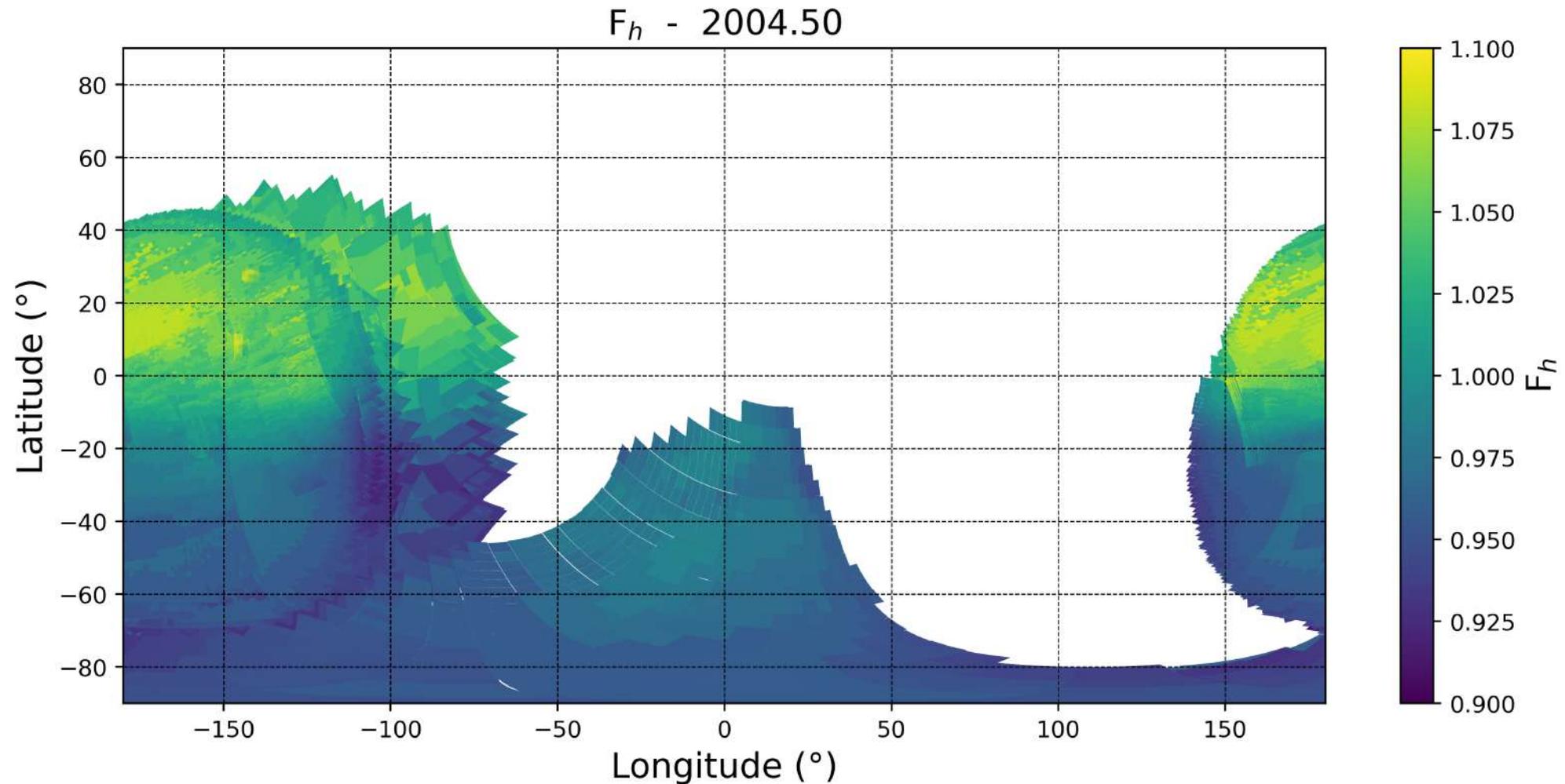
Premières inversion massives : survols T13-T17

2 – Albédo de surface (ici 1 longueur d'onde)

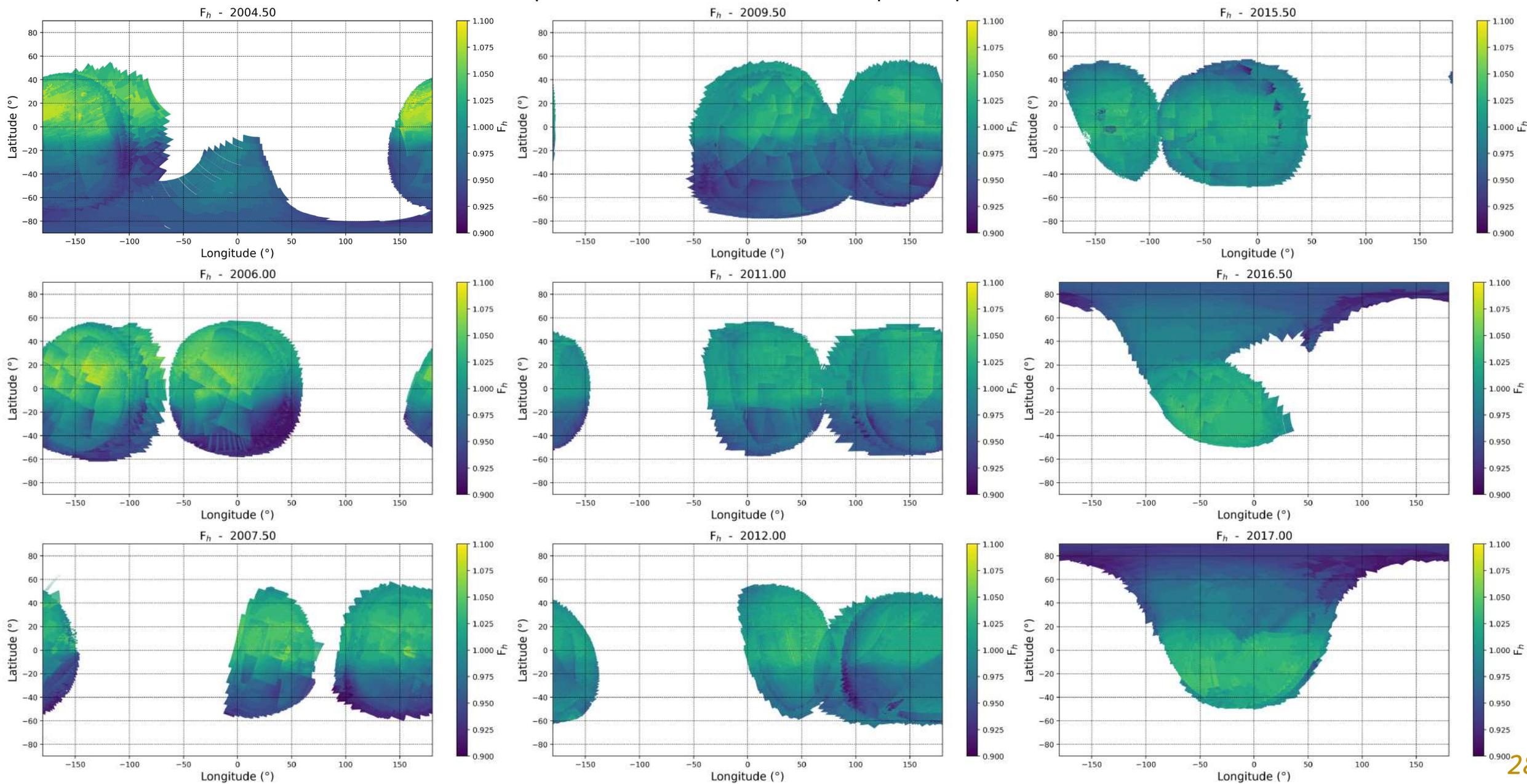


Inversion de la totalité des observations de Titan par VIMS (2 semaines de calculs sur mon laptop) :

1 – Paramètres atmosphériques, demi-année par demi-année

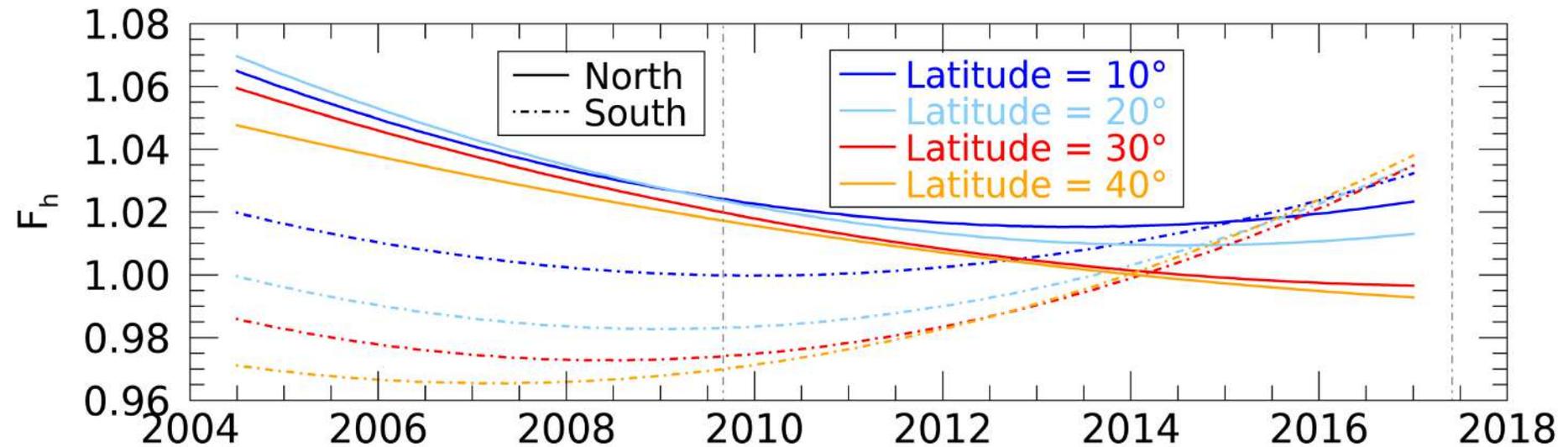
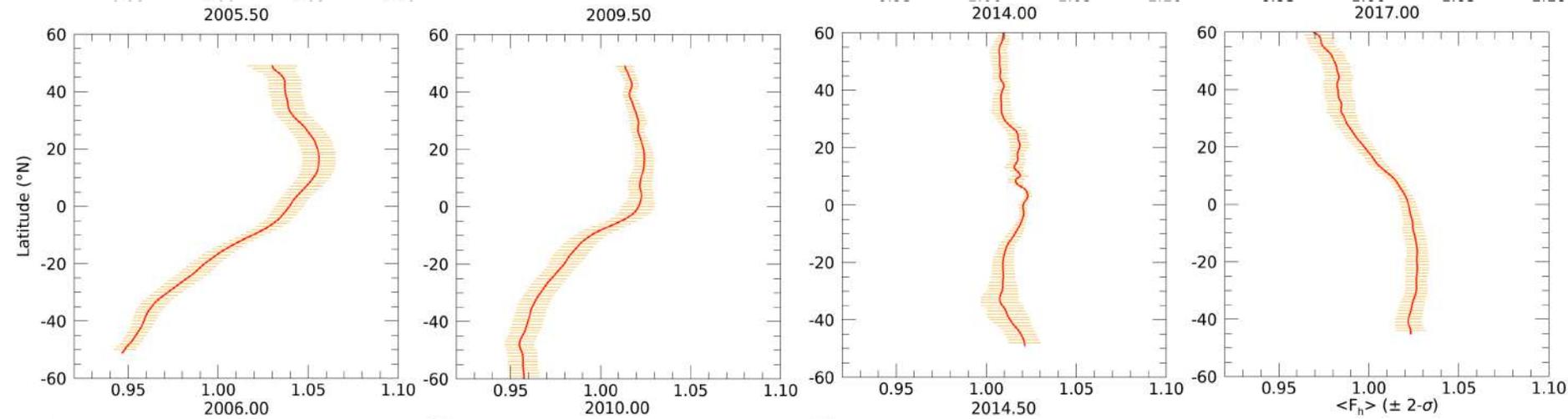


Population d'aérosols stratosphériques :

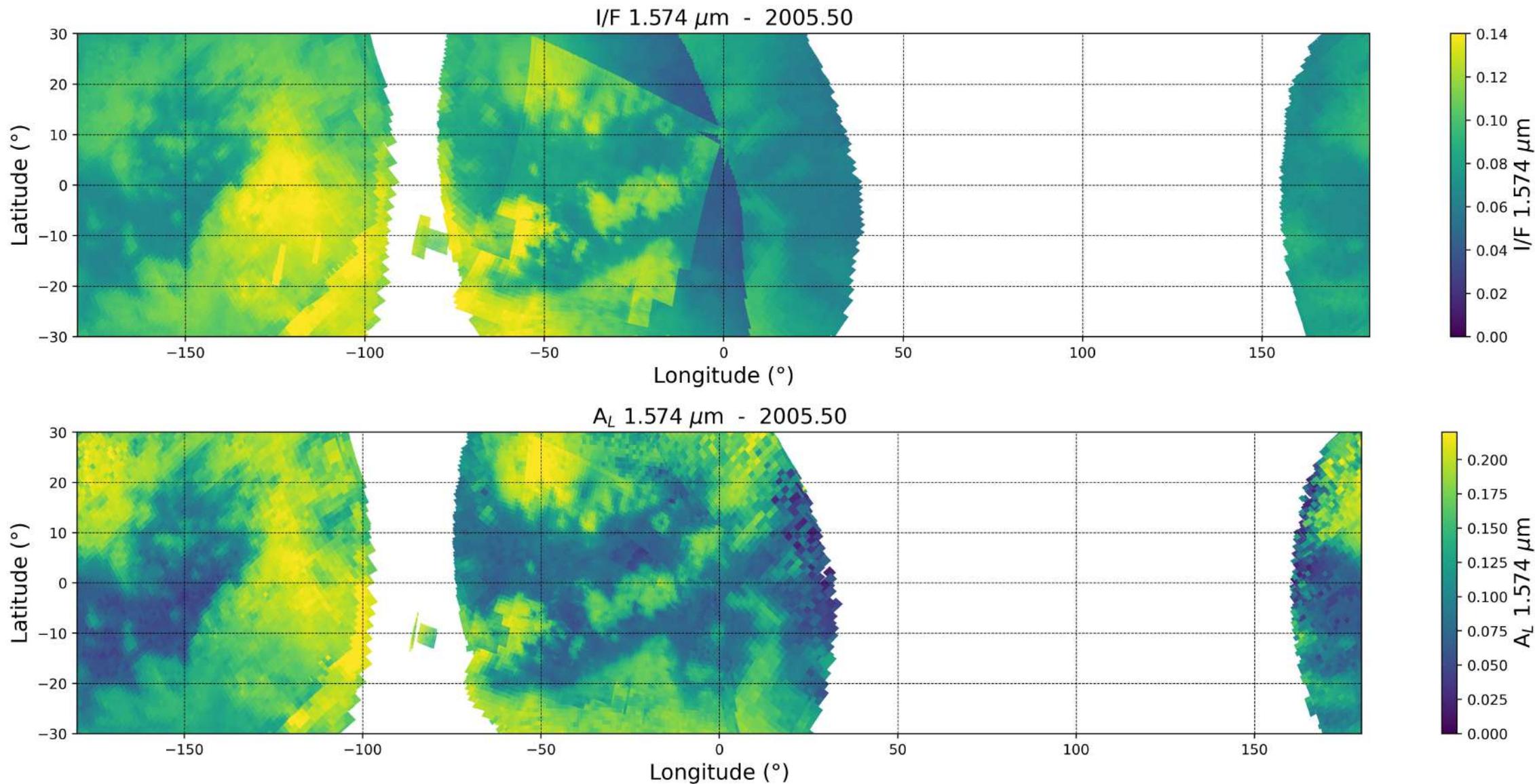


Profils latitudinaux de population d'aérosols stratosphériques en fonction du temps :

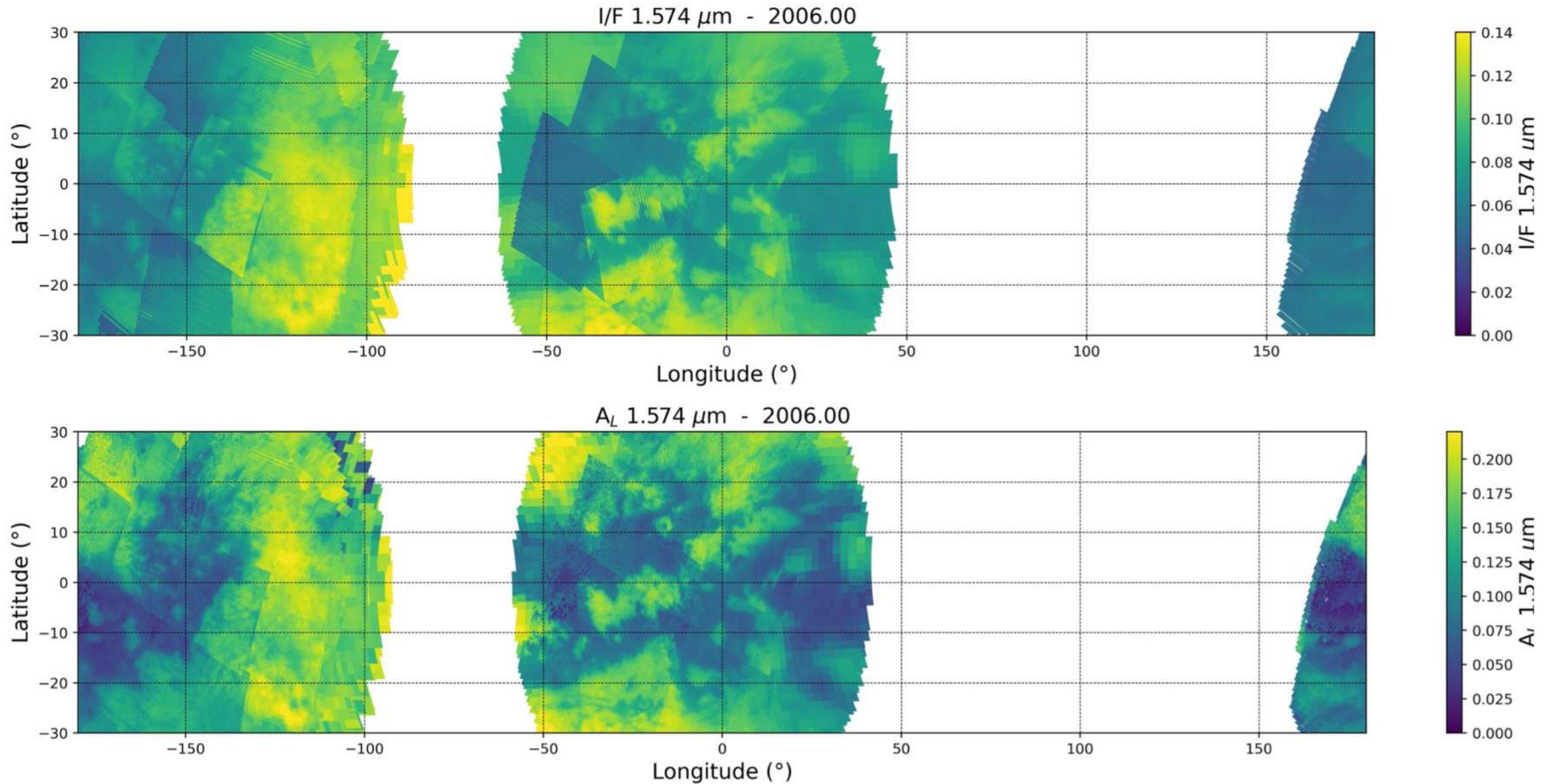
- Distribution Nord-Sud fonction des saisons
- Retard dû à l'inertie



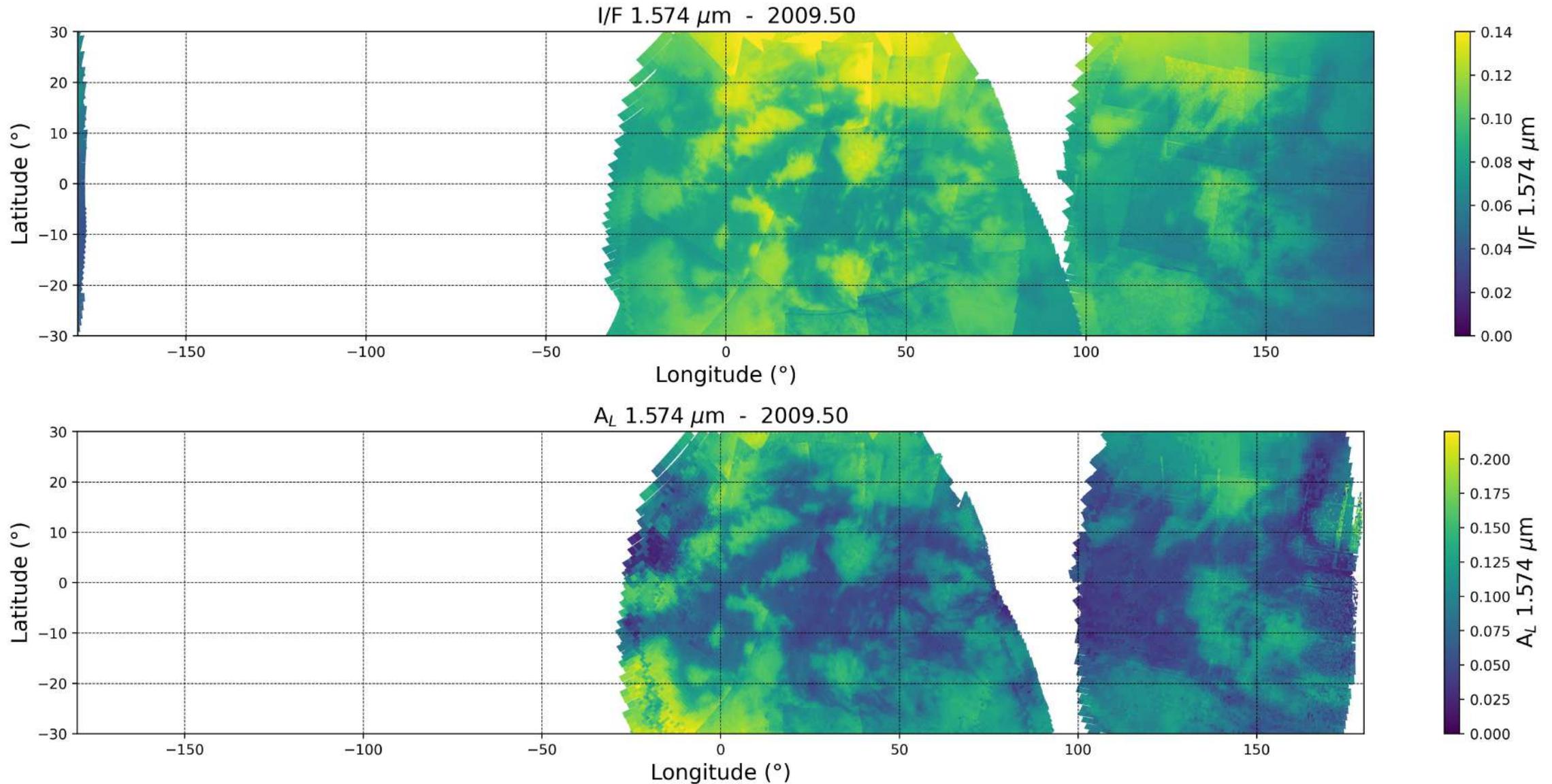
Inversion de la totalité de l'archive :
2 – Albédo de surface (ici à 1 longueur d'onde)



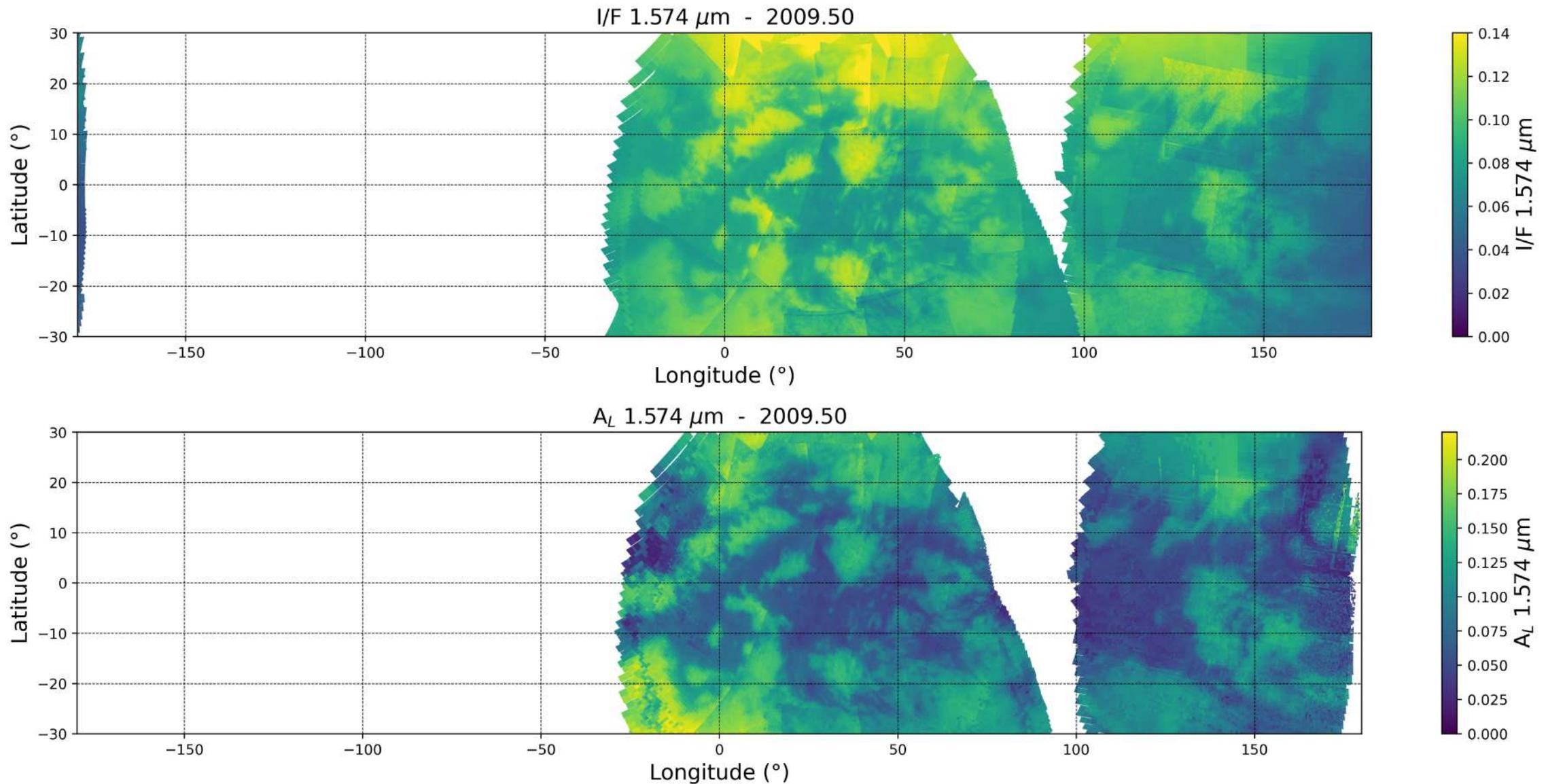
Inversion de la totalité de l'archive :
2 – Albédo de surface (ici à 1 longueur d'onde)



Inversion de la totalité de l'archive :
2 – Albédo de surface (ici à 1 longueur d'onde)

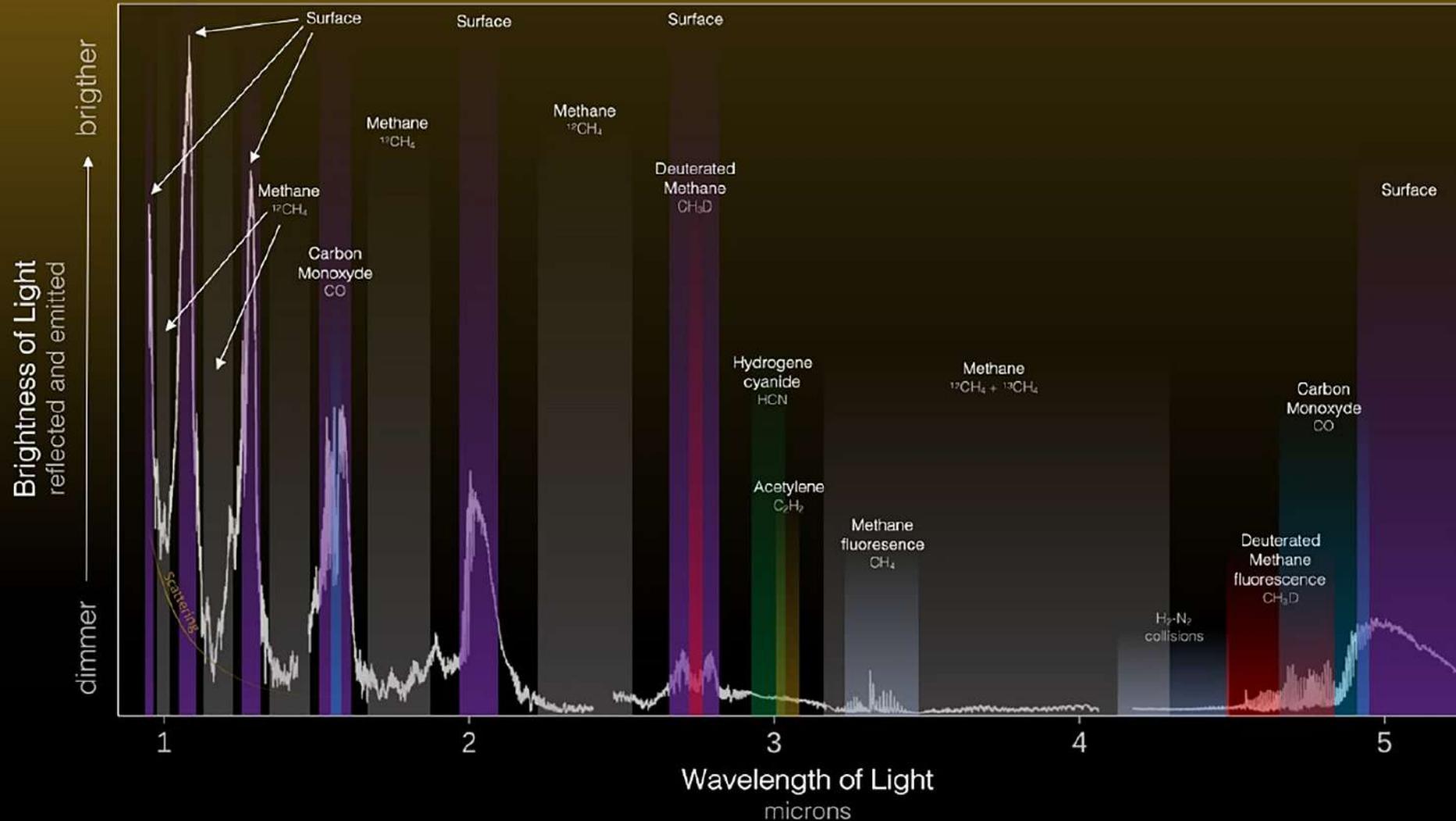


Inversion de la totalité de l'archive :
2 – Albédo de surface (ici à 1 longueur d'onde)



Télescope spatial James Webb (observations de Titan en Novembre 2022)

Résumé des observations :
Nixon et al. 2023 (EGU)



Résolution spectrale :
VIMS : 70 à 270
NIRSpec : 1 000 – 2 700

Cassini/VIMS

Atmosphère

- Evolution temporelle des populations d'aérosols en fonction de l'altitude
- Cycles saisonniers (Voyager, Hubble, JWST, télescopes au sol, ...)
- Inertie

➤ **Contraintes pour modèles de circulation générale**

Surface

- Carte globale d'albédo de surface en fonction de la longueur d'onde
- Correction photométrique de la surface
- Unités spectrales VS Unités géomorphologiques (dunes, plaines, cratères, ...)

➤ **Composition de surface à petite et grande échelles**

➤ **Texture des terrains (taille de grains des dunes, ...)**

James Webb

- Identification des bandes d'absorption/émission
- Amélioration de nos modèles (listes de raies, calcul des k-corrélés)
- LTE / Non-LTE
- Bandes d'absorption dans les fenêtres ?

➤ **Composition de (1) atmosphère et (2) surface**

➤ **Profils d'abondance et température**

➤ **Suivi saisonnier**