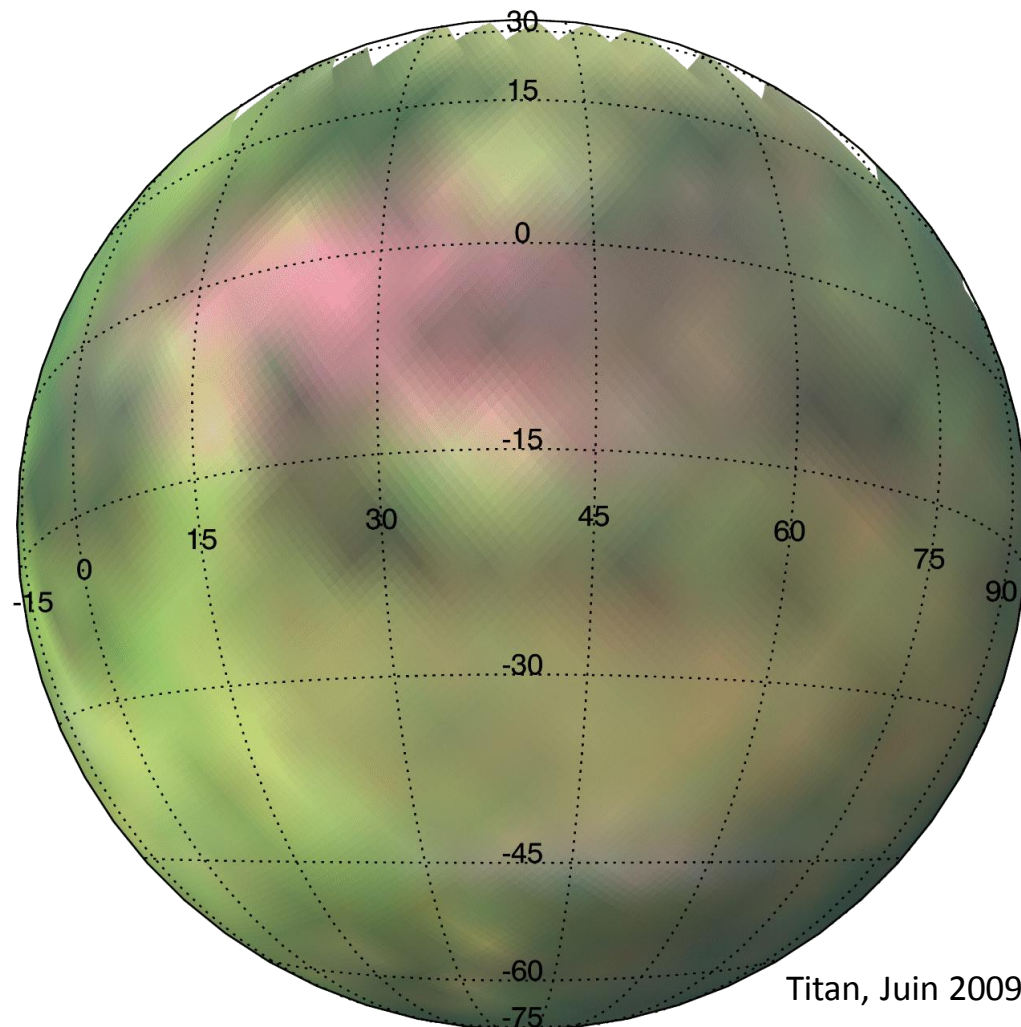
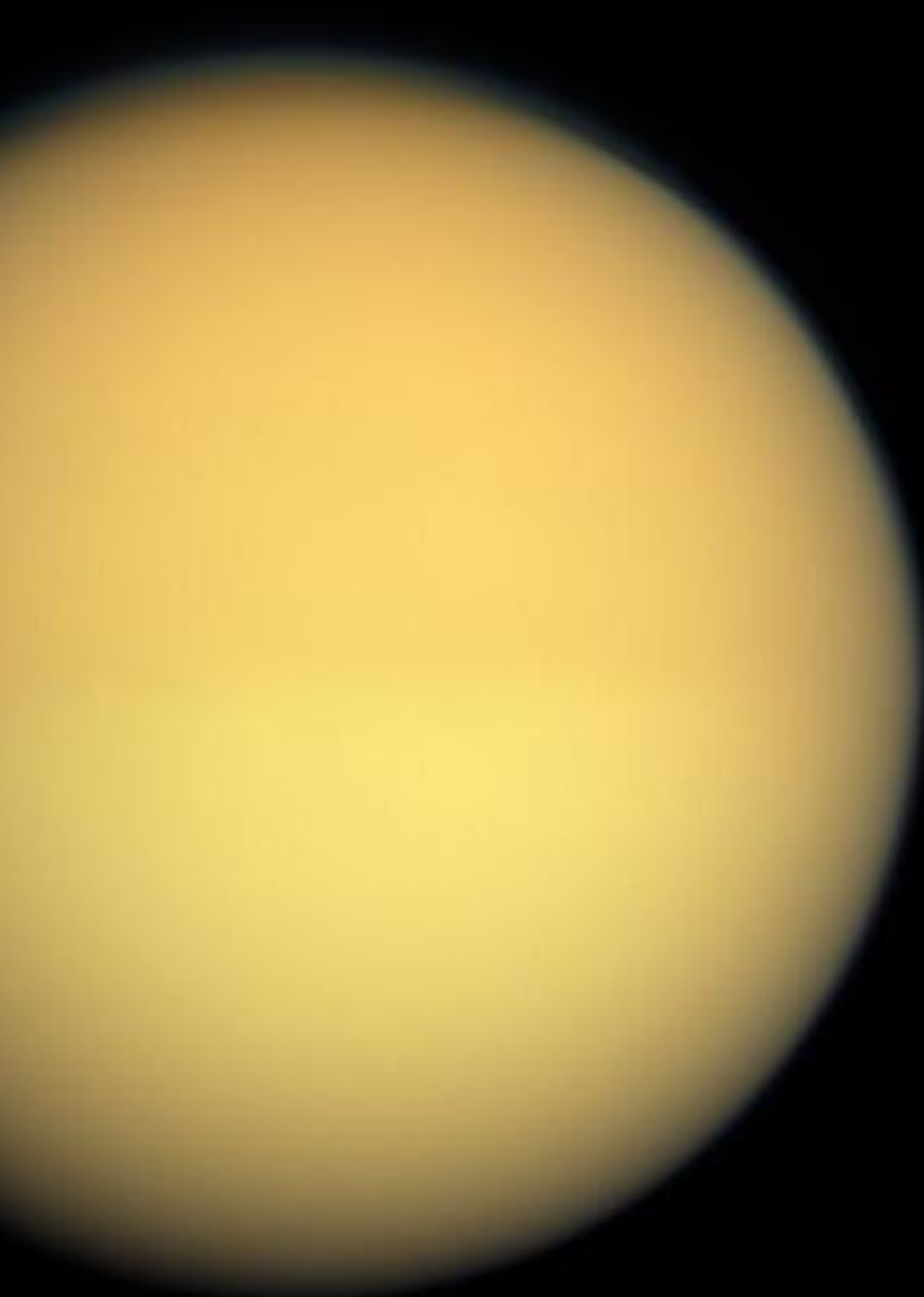


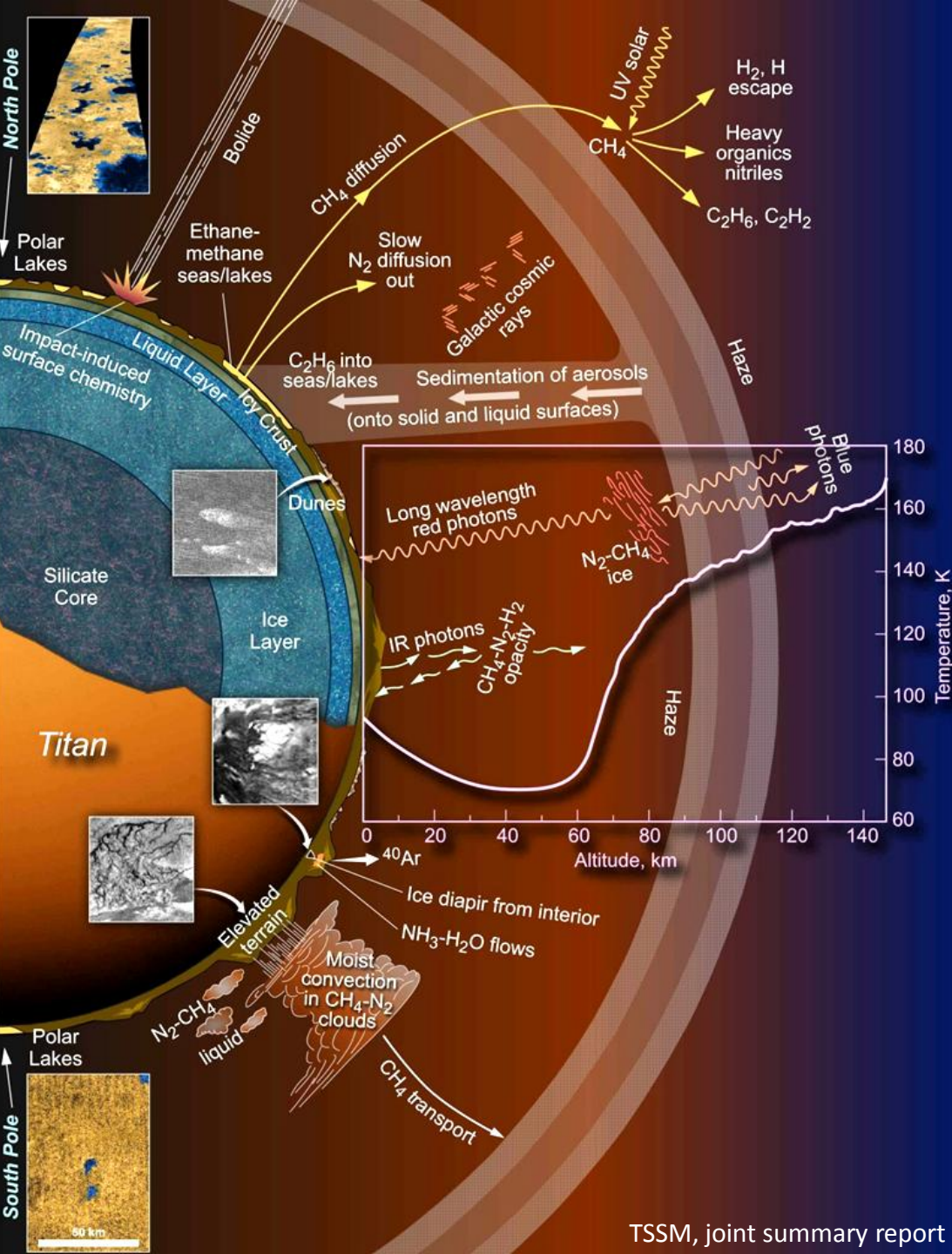
L'activité atmosphérique et le climat de Titan surveillés par l'imageur hyperspectral VIMS de la sonde Cassini

S. Rodriguez, S. Le Mouélic, J.W. Barnes,
M. Hirtzig, P. Rannou, S. Courrech du
Pont, J. Bow, G. Vixie, C. Sotin, R.H.
Brown, T. Cornet, O. Bourgeois, C.
Narteau, R. Jaumann, K. Stephan, C.A.
Griffith, A. Coustenis, K.H. Baines, B.J.
Buratti, R.N. Clark, P.D. Nicholson





- Atmosphère épaisse et étendue, principalement N_2 and CH_4 (1.4 bar & 94 K à la surface), impénétrable dans l'UV-Vis
- Chimie atmosphérique intense et complexe $\Rightarrow$ molécules {C, N, H + O}, les briques des particules d'aérosol qui forment un brouillard omniprésent
- CH_4 et C_2H_6 peuvent condenser et former des nuages



- Atmosphère épaisse et étendue, principalement N_2 and CH_4 (1.4 bar & 94 K à la surface)
- Chimie atmosphérique intense et complexe $\Rightarrow$ molécules $\{\text{C}, \text{N}, \text{H} + \text{O}\}$, les briques des particules d'aérosol qui forment un brouillard omniprésent
- CH_4 et C_2H_6 peuvent condenser et former des nuages
- Climat exotique : cycle des hydrocarbures, analogue au cycle hydrologique terrestre $\Rightarrow$ nuages, pluie, lacs/mers
- La surface de Titan présente de nombreuses similitudes avec celle de la Terre, et semble principalement modelée par le météo, avec des lacs polaires, des chenaux, et des dunes équatoriales

Cassini-Huygens (2004-2017)

Téledétection

UVIS
ISS
VIMS
CIRS
RADAR
RSS

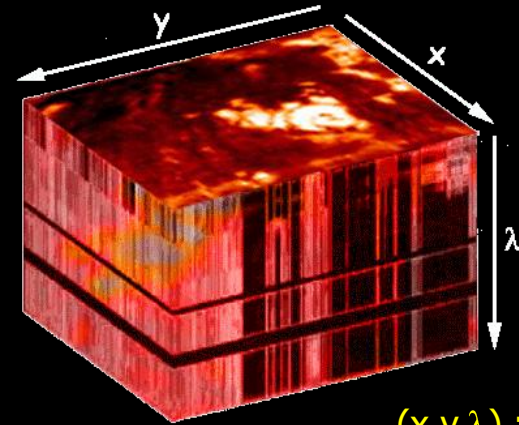


Visual and Infrared Mapping Spectrometer à bord de CASSINI

VIMS

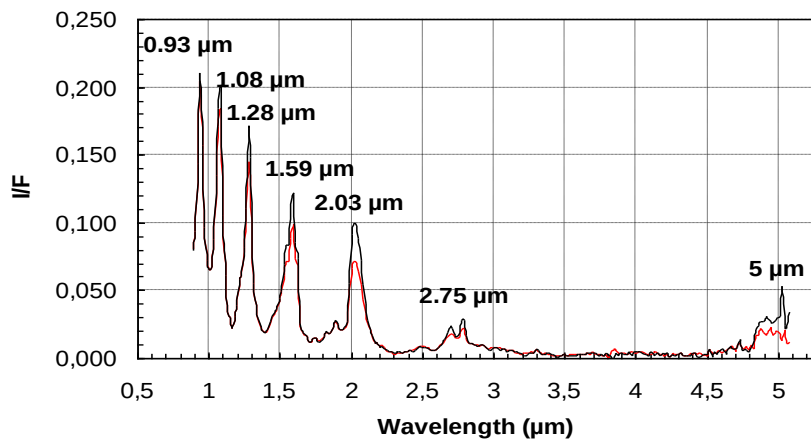
(Visual and Infrared Mapping Spectrometer)

Spectro-imageur (64x64 pixels),
avec 352 canaux spectraux entre
0.3 et 5.1 μm



(x,y,λ) : 2 dimensions
spatiales et 1
dimension spectrale

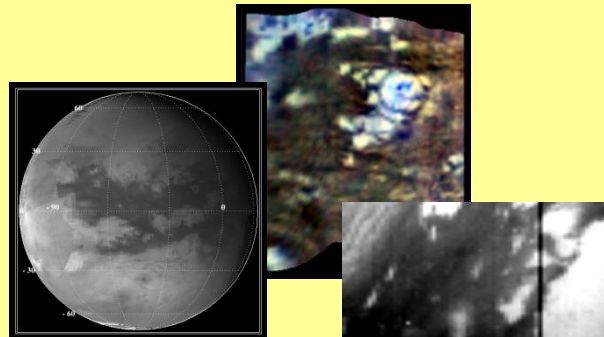
observant Titan ...



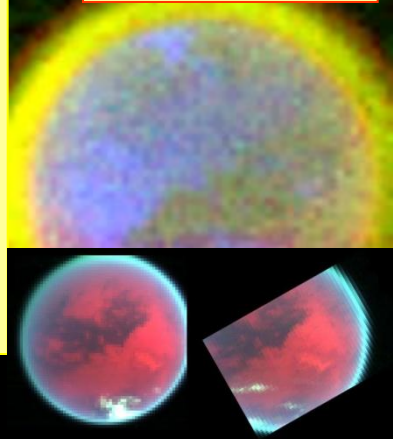
Spectres VIMS typiques de Titan

Surface : cartographie et analyse

- morphologie
- composition

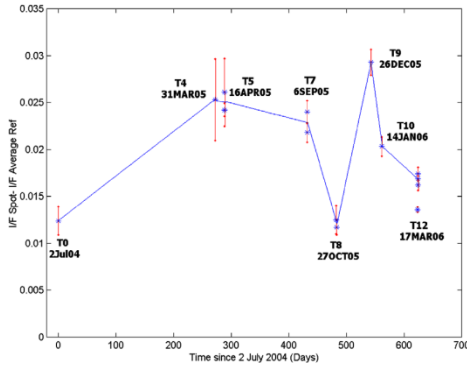
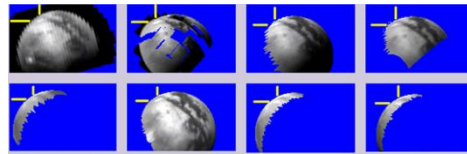


**Suivi de
phénomènes
atmosphériques**

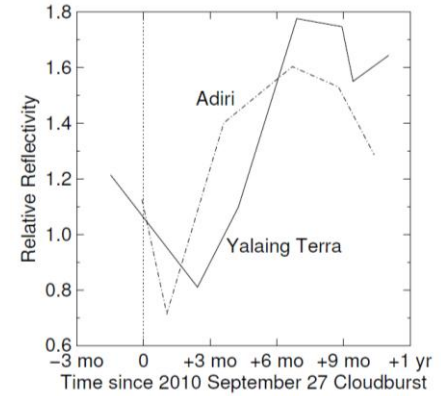
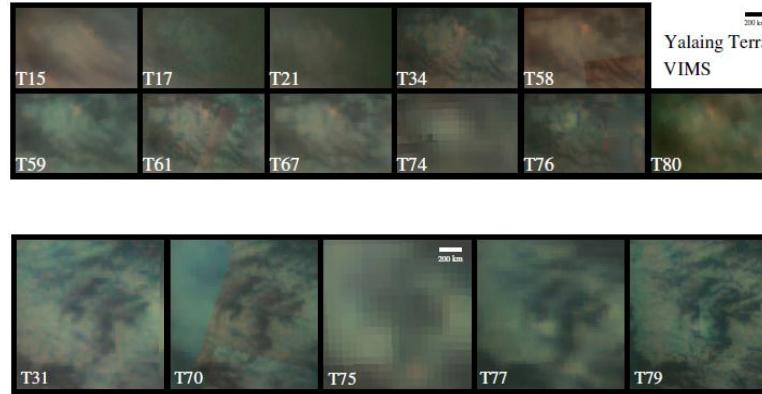


Détection des variations de brillance sur Titan avec VIMS

- Surface : Activité cryovolcanique & cycle mouillage/évaporation

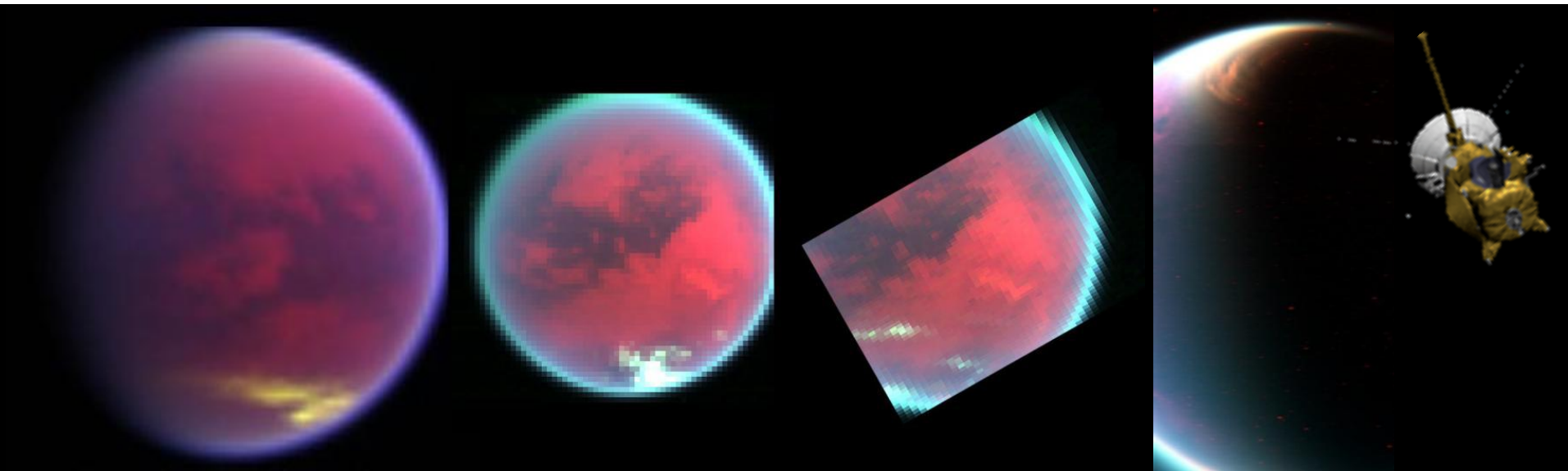


Nelson et al. (2009)



Barnes et al. (en révision)

- Atmosphère : Nuages d'hydrocarbures

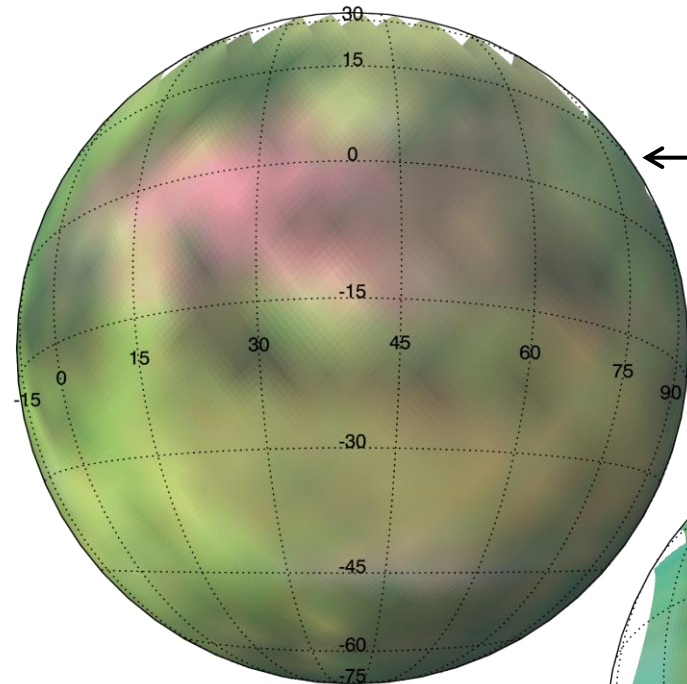


$\approx 420\,000\text{ km}^2$

T56

7 Juin 2009

Durée: au moins 11h

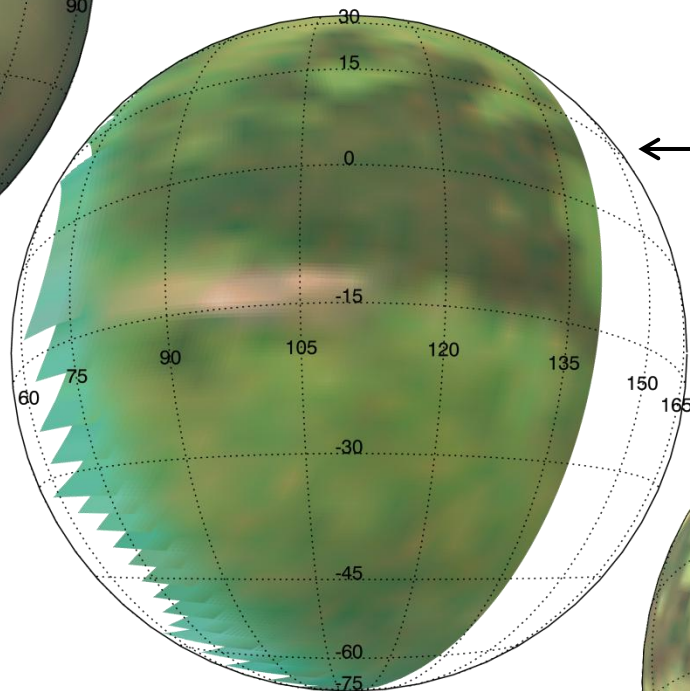


$\approx 250\,000\text{ km}^2$

T65

13 Janvier 2010

Durée : au moins 14h

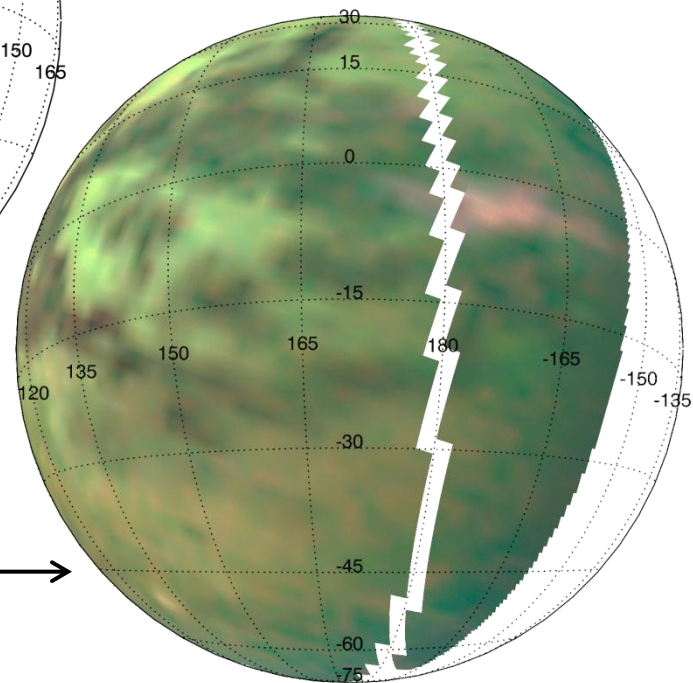


$\approx 180\,000\text{ km}^2$

T70

21 Juin 2010

Durée : au moins 14h



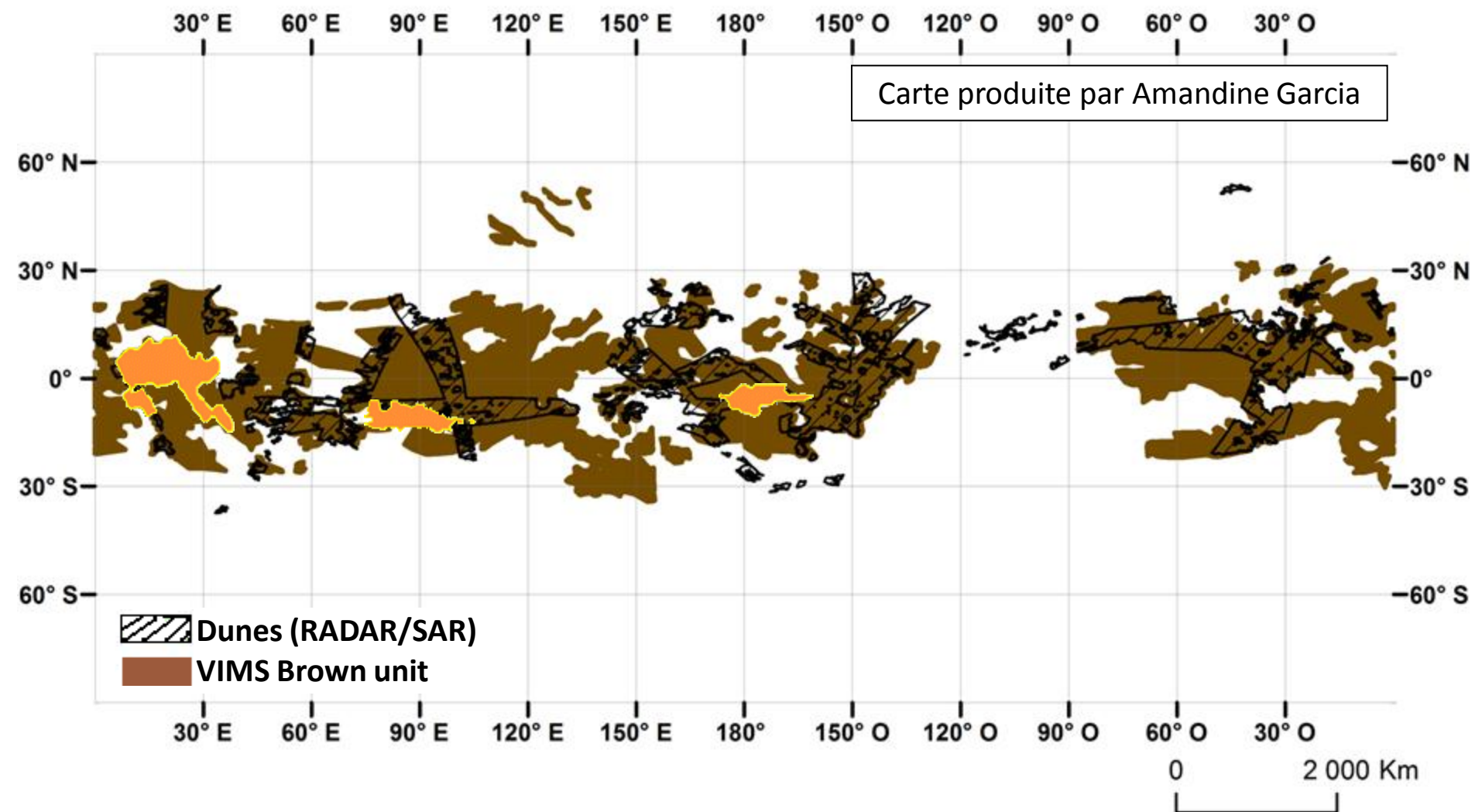
Red: 5 μm

Green: 2 μm

Blue: 2.78 μm

Où ?

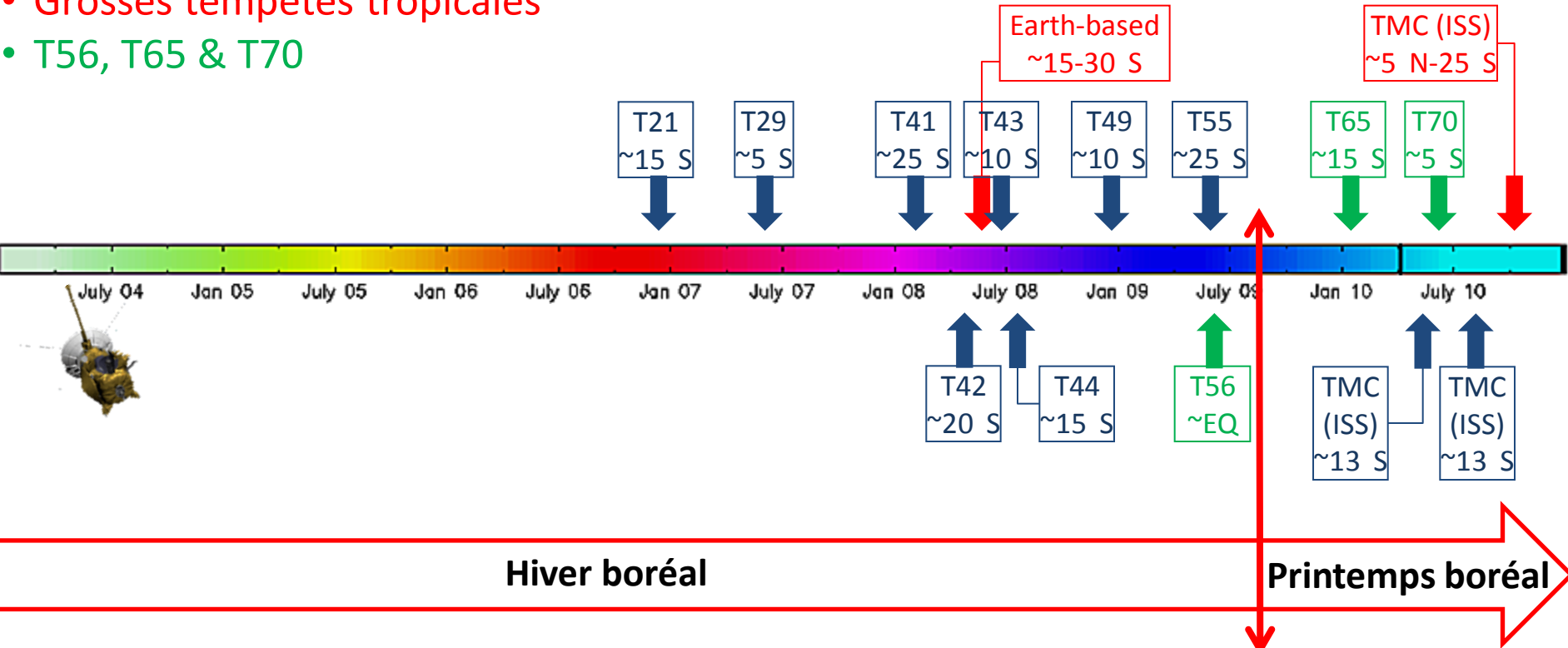
Carte produite par Amandine Garcia



Evènements T56 – T65 – T70

- Petits nuages tropicaux
- Grosses tempêtes tropicales
- T56, T65 & T70

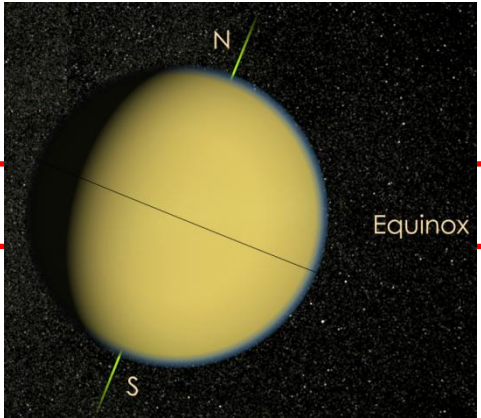
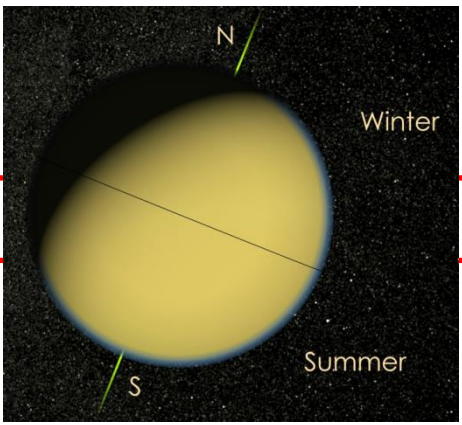
Quand ?



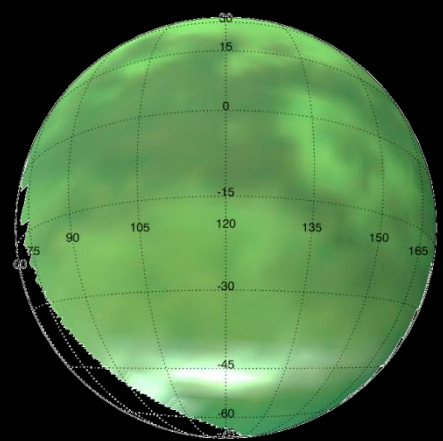
Hiver boréal

Printemps boréal

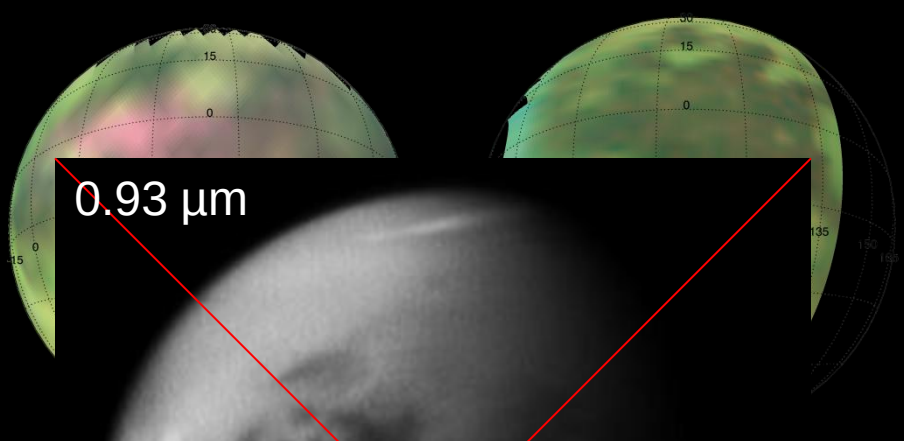
Equinoxe



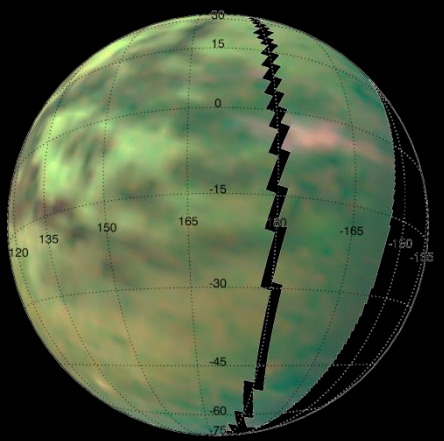
Red: 5 μm
Green: 2 μm
Blue: 2.78 μm



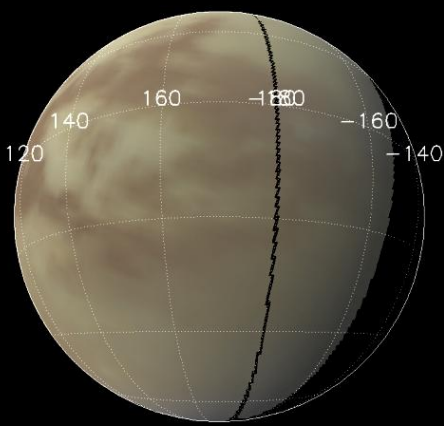
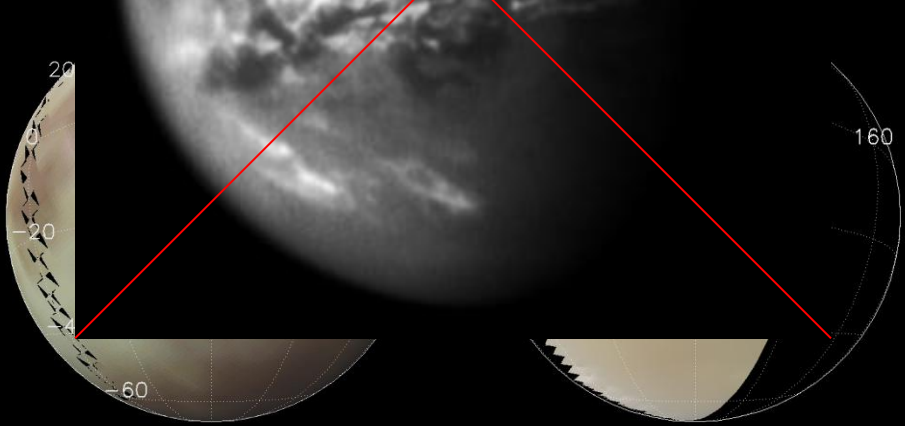
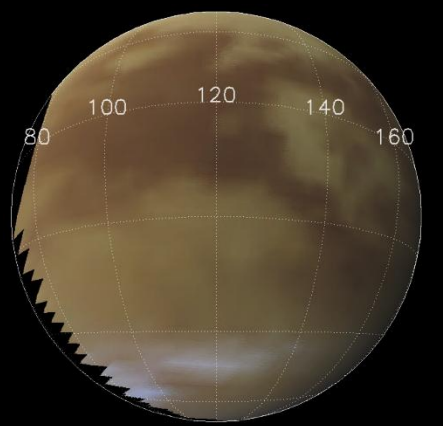
Nuage



0.93 μm

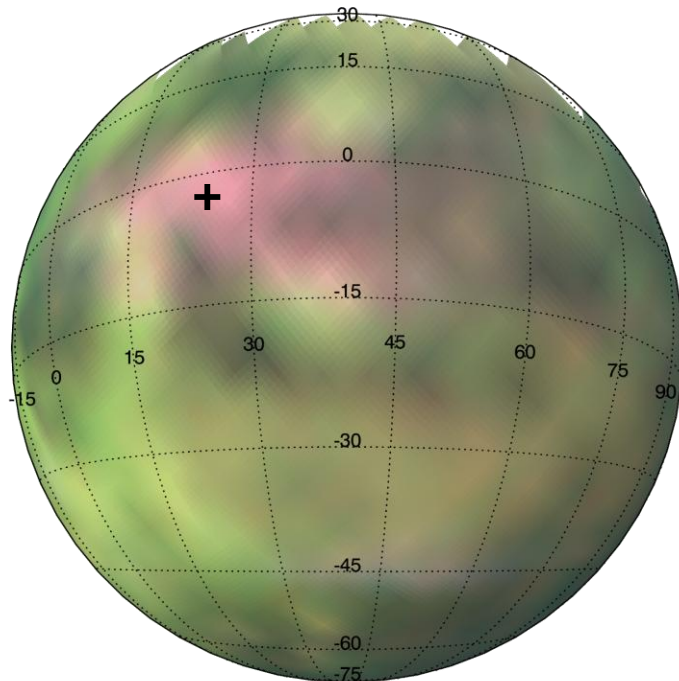


T70

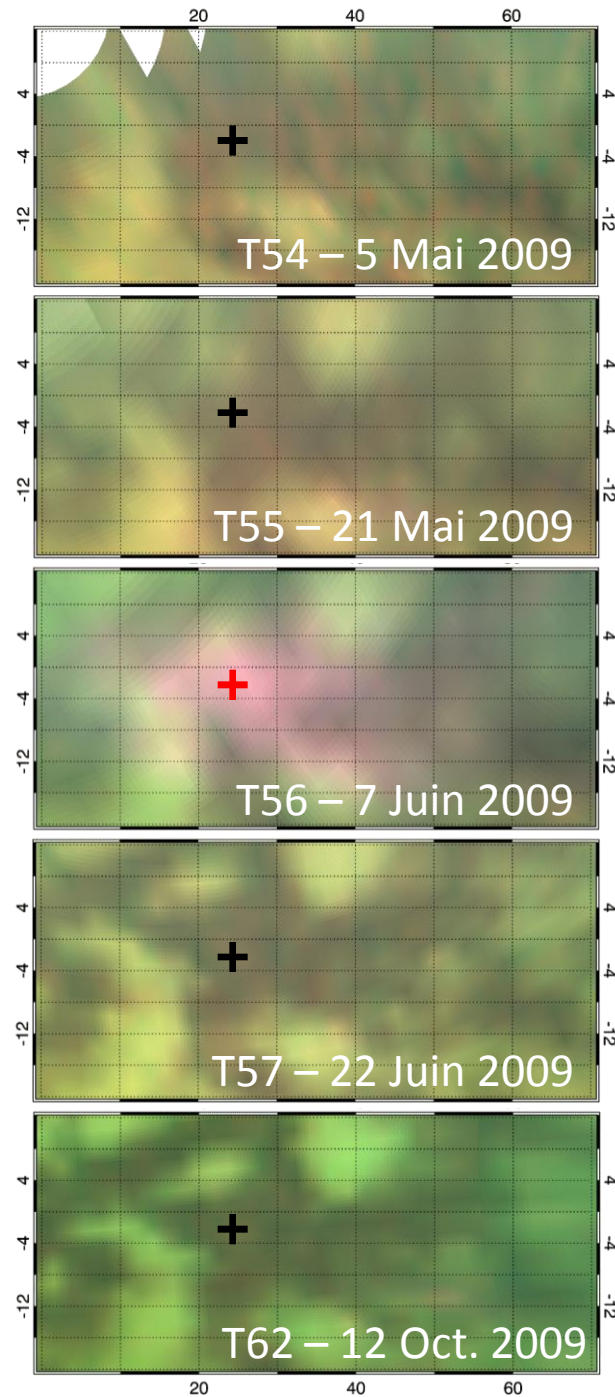
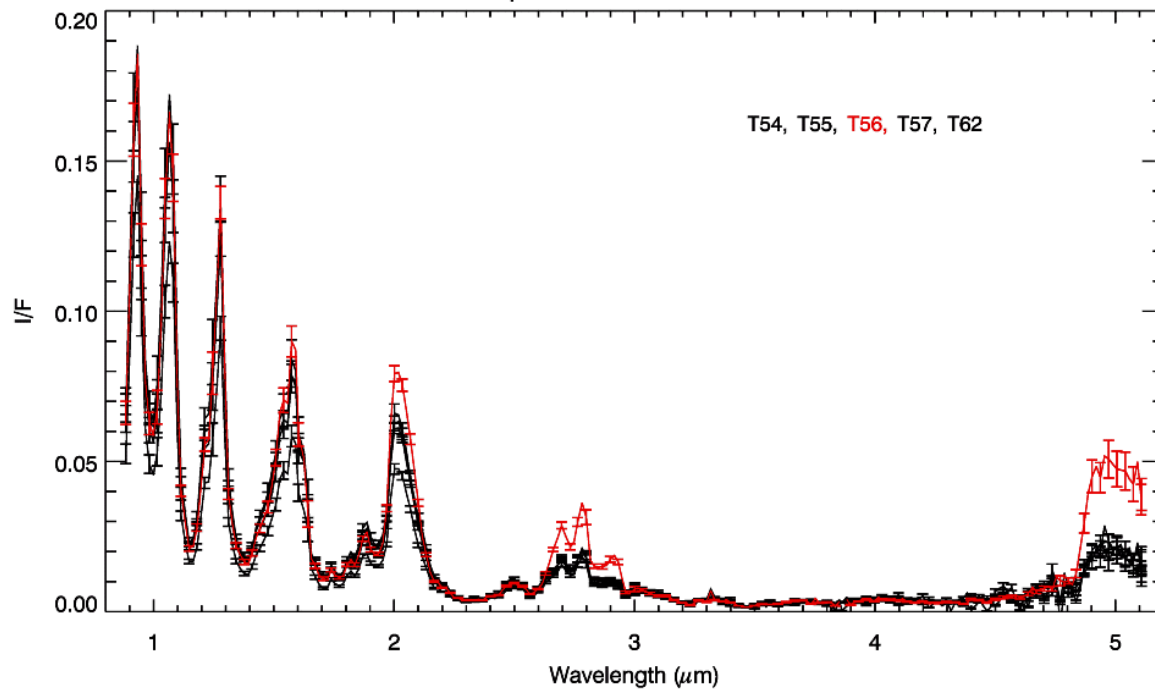


Red: 1.08 μm
Green: 1.27 μm
Blue: 1.59 μm

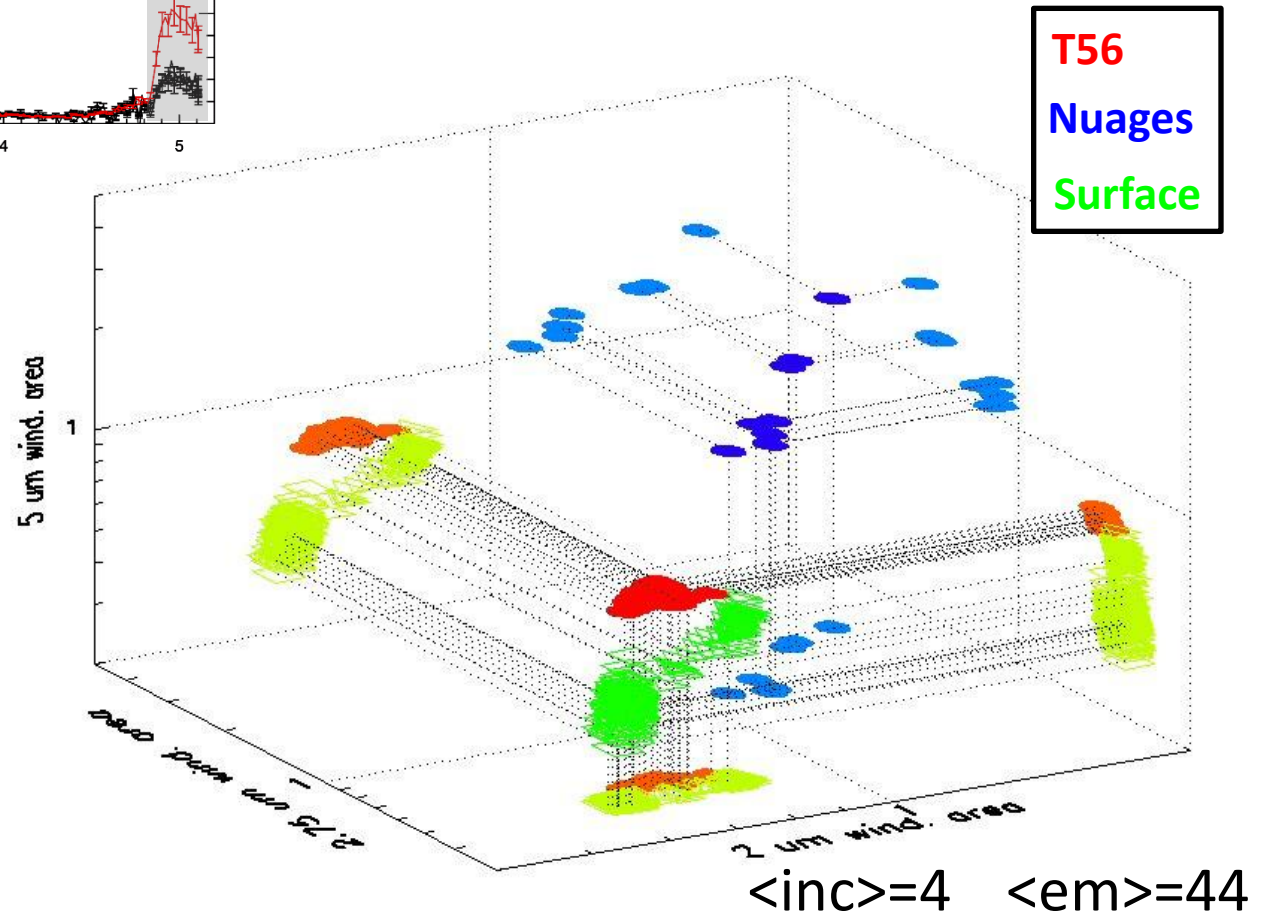
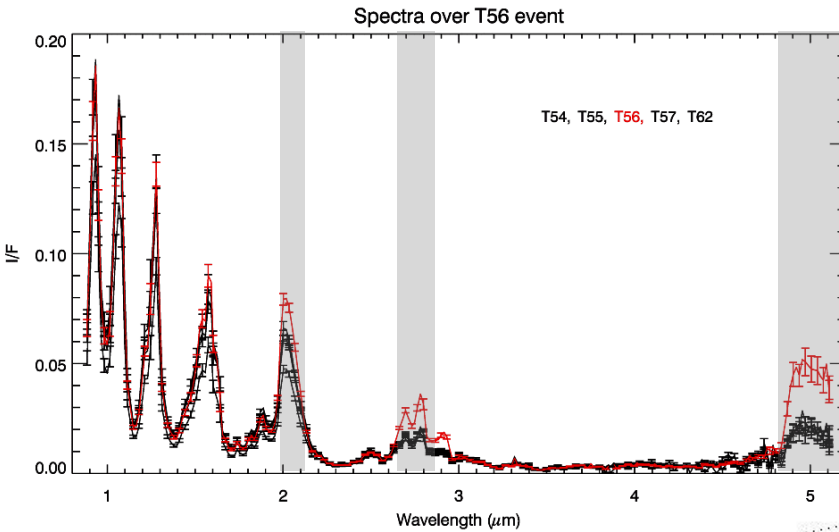
T56



Spectra over T56 event



Surface ou atmosphère ?



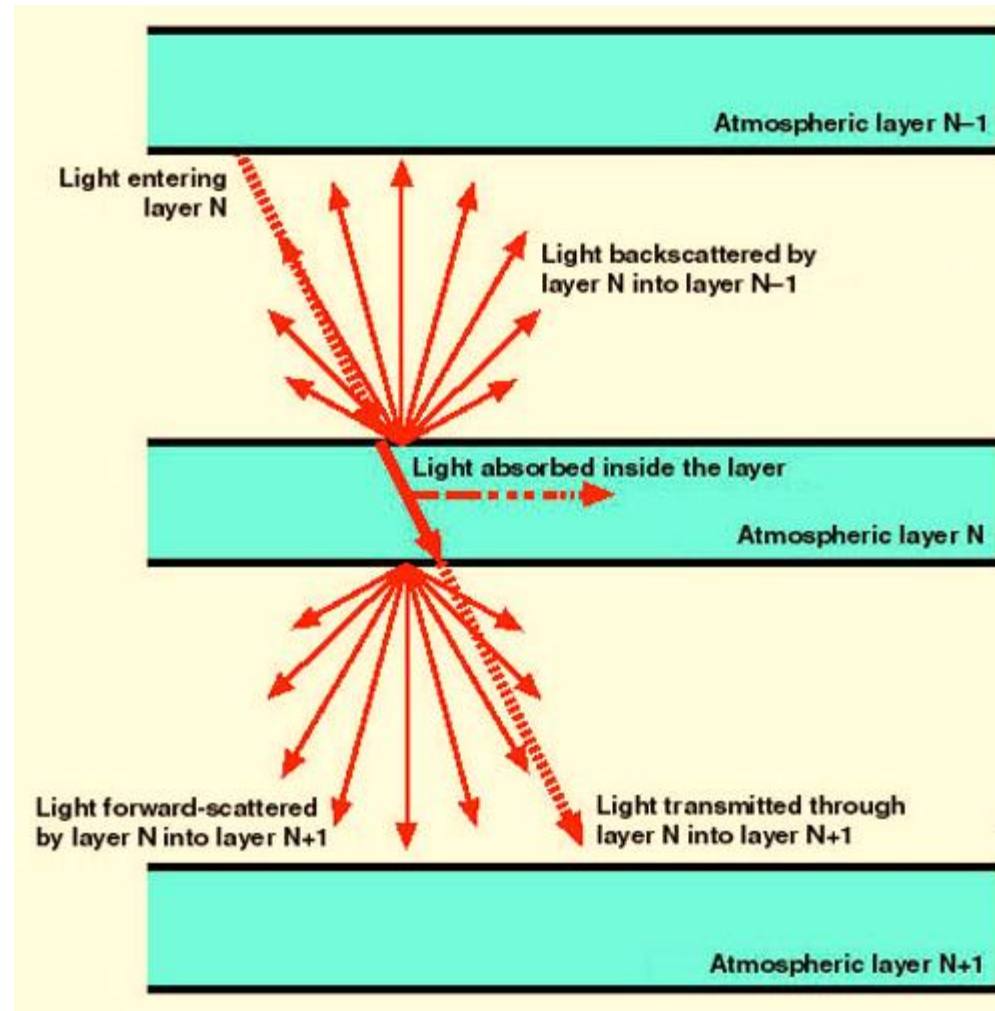
Modèle de transfert radiatif pour Titan (atmosphère dense et chargée de poussières)

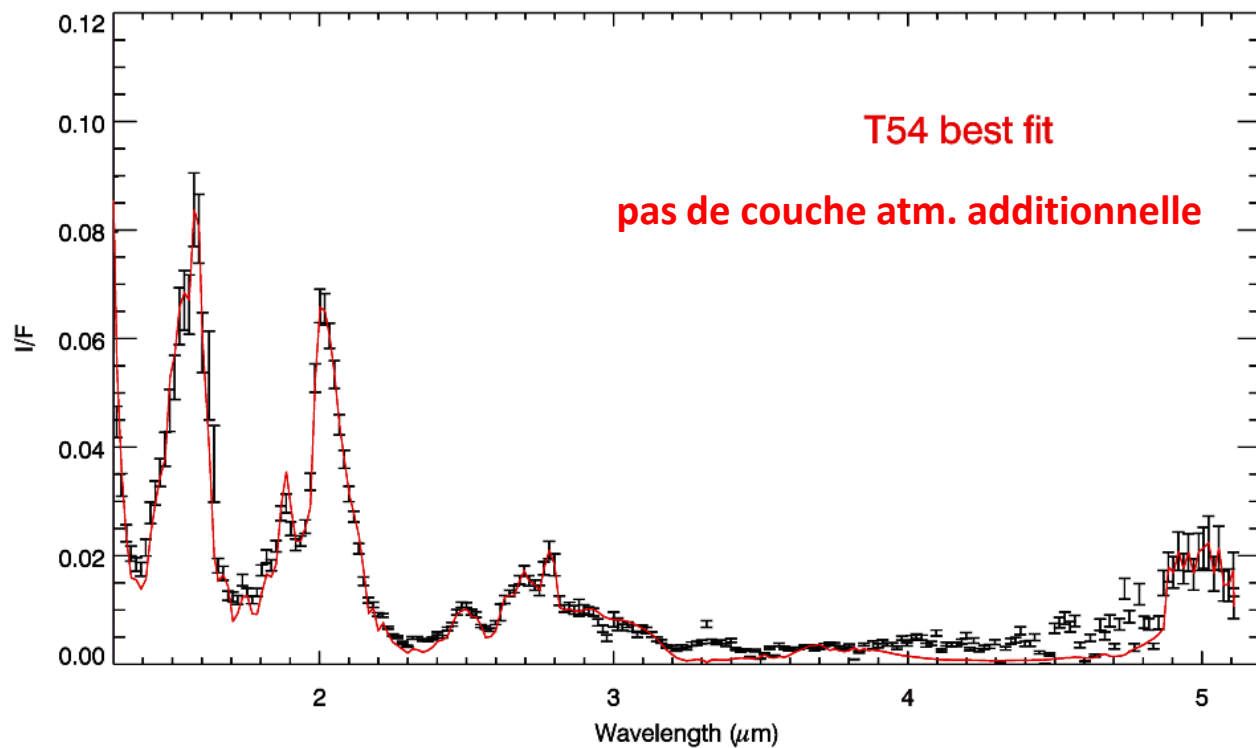
A. gaz + aérosols

- Modèle de transfert radiatif 1D multi-stream basé sur un solveur SHDOMPP “classique”
- Grille verticale définie par Huygens (T,p)
- Extinction des aérosols calée sur les mesures Huygens
- Gaz = $^{12}\text{CH}_4$, $^{13}\text{CH}_4$, $^{12}\text{CH}_3\text{D}$, CO, et collisions $\text{N}_2\text{-N}_2$ & $\text{N}_2\text{-H}_2$
- ANR “CH4@TITAN” = nouvelle liste des bandes d’absorption du CH_4 pour 1.3-5 μm

B. Couche atmosphérique additionnelle :

- r des particules, sphériques (0.1-1000 μm)
- τ @ 2 μm (0.1-10)
- Altitude du sommet (5-80 km)

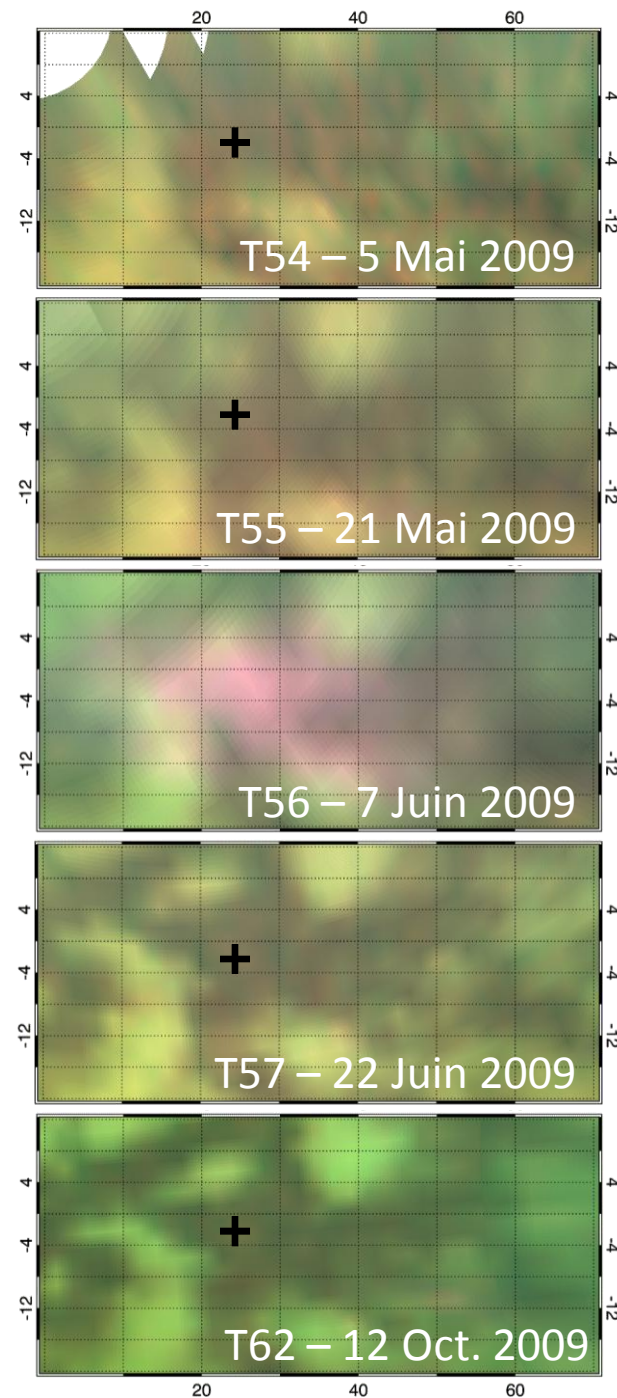


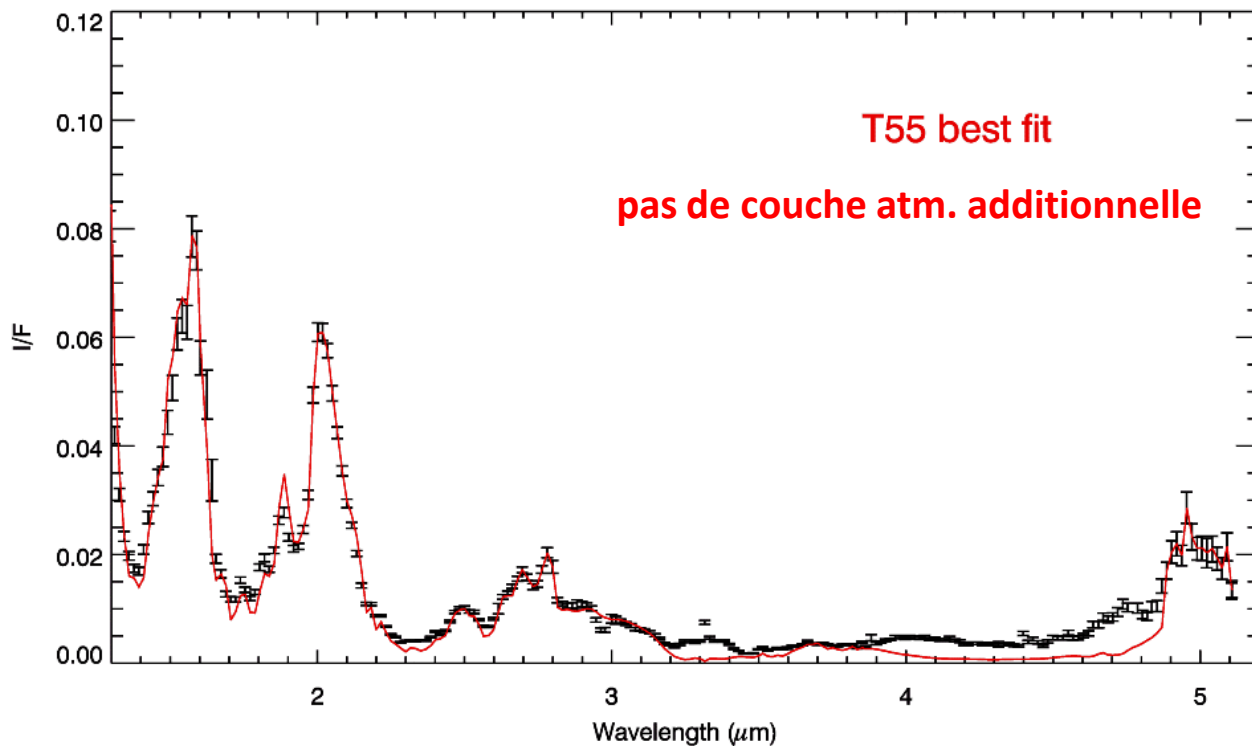


i=5

e=57

80% du profil de réf. pour la brume

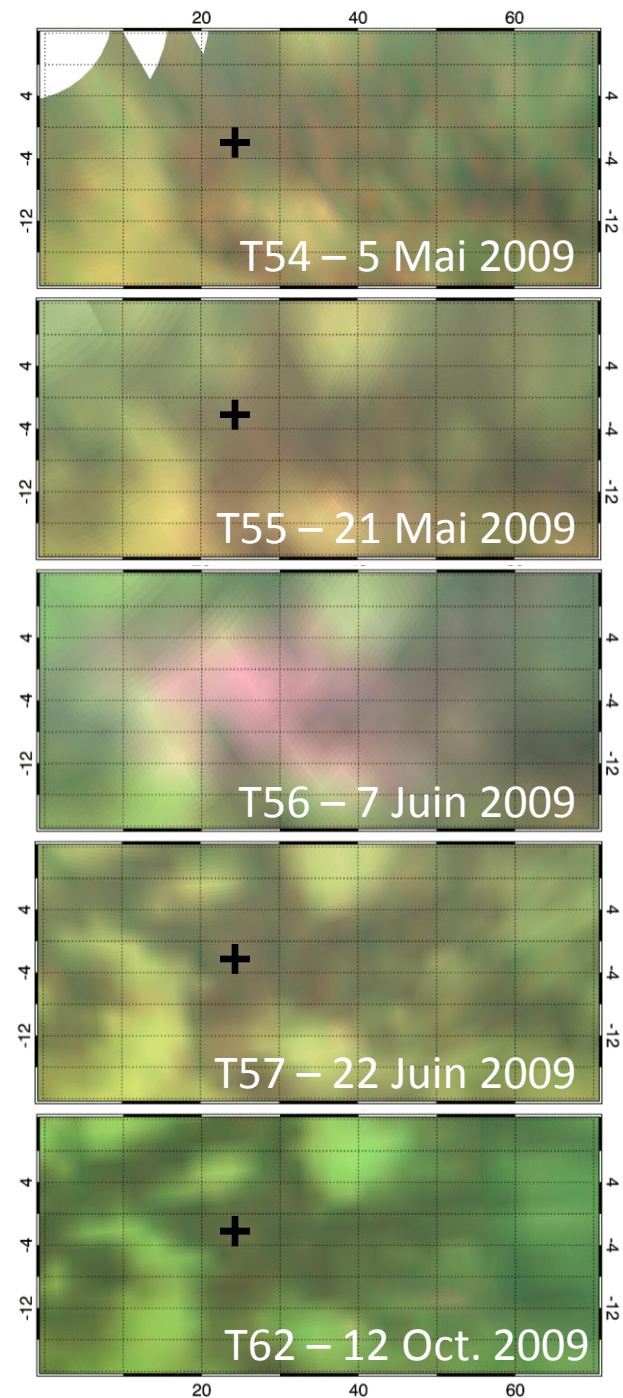


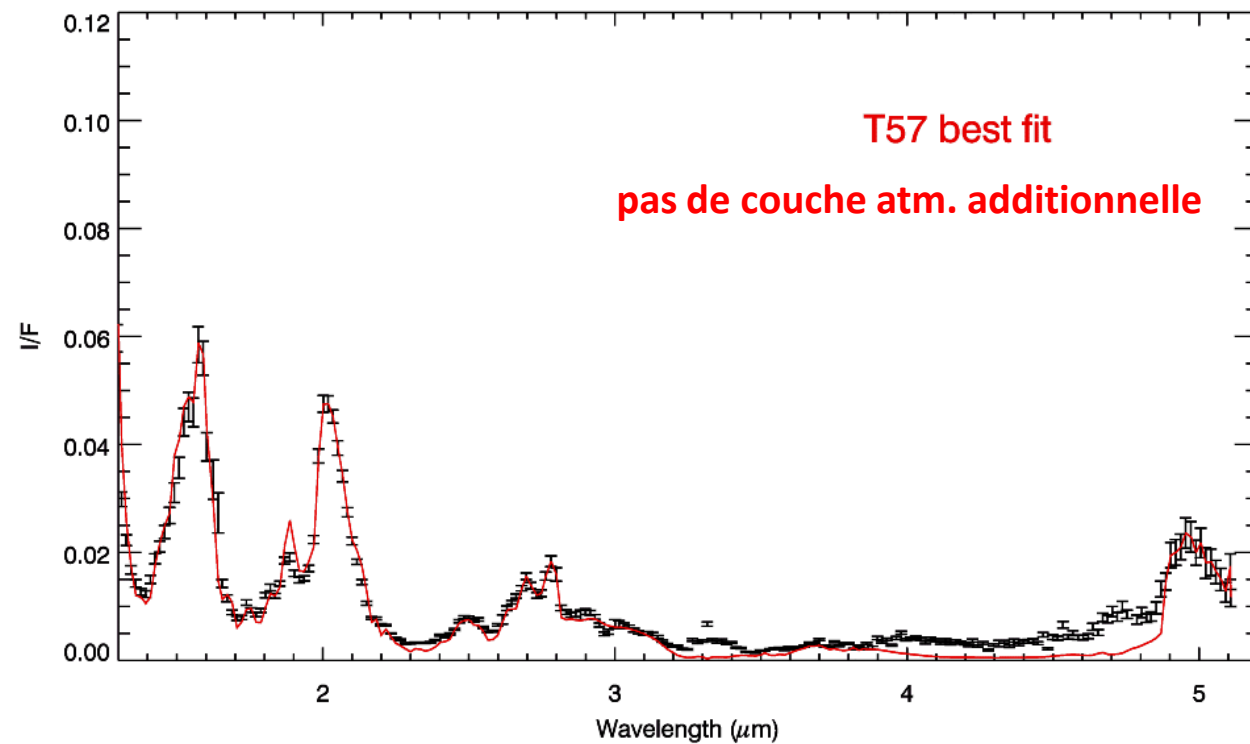


i=3

e=52

80% du profil de réf. pour la brume

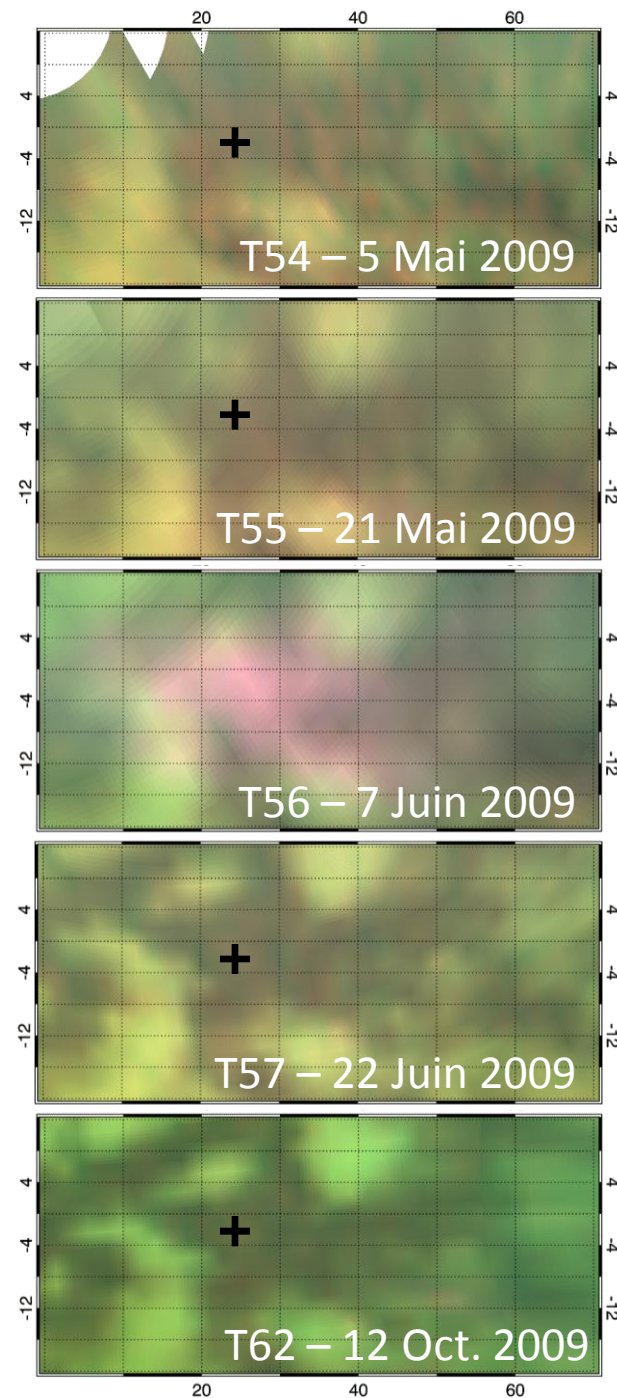


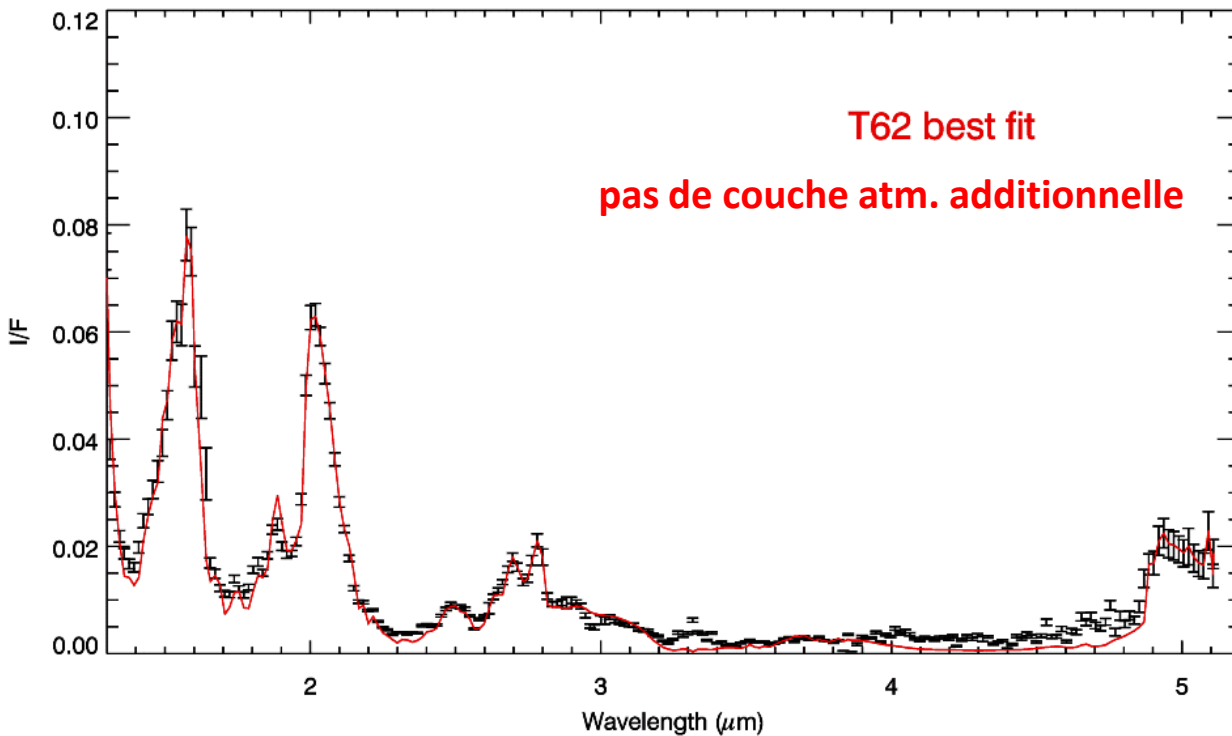


i=5

e=34

80% du profil de réf. pour la brume

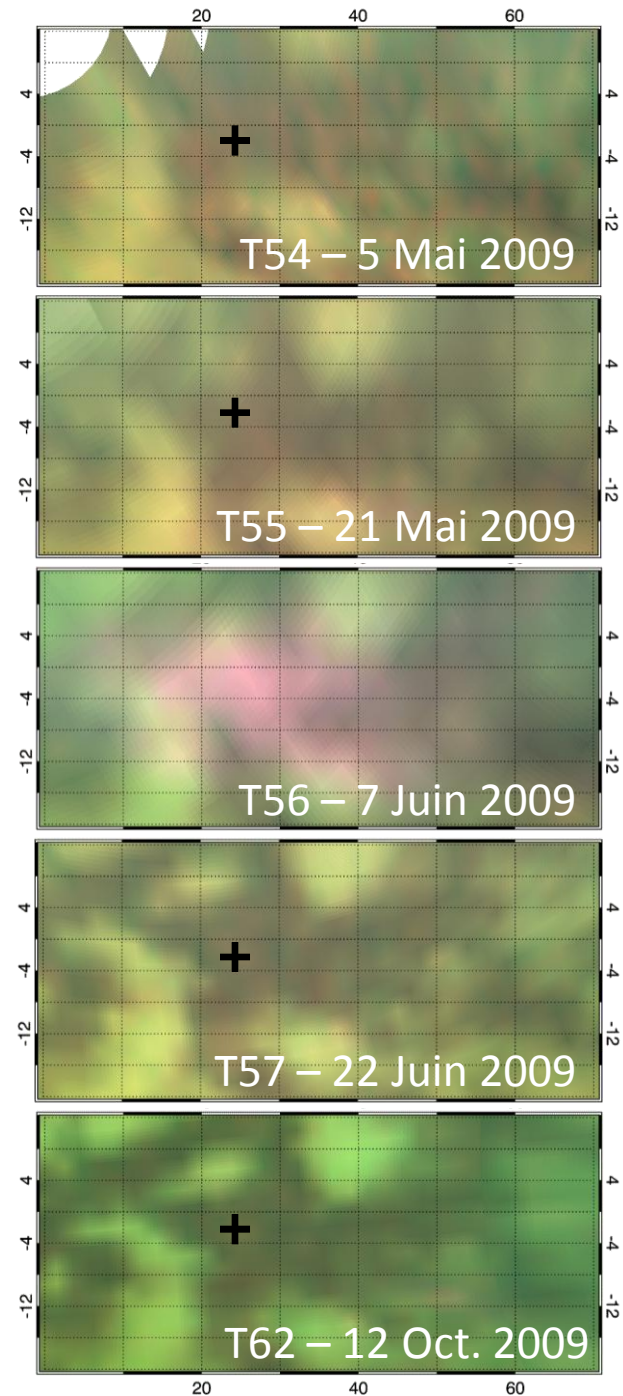


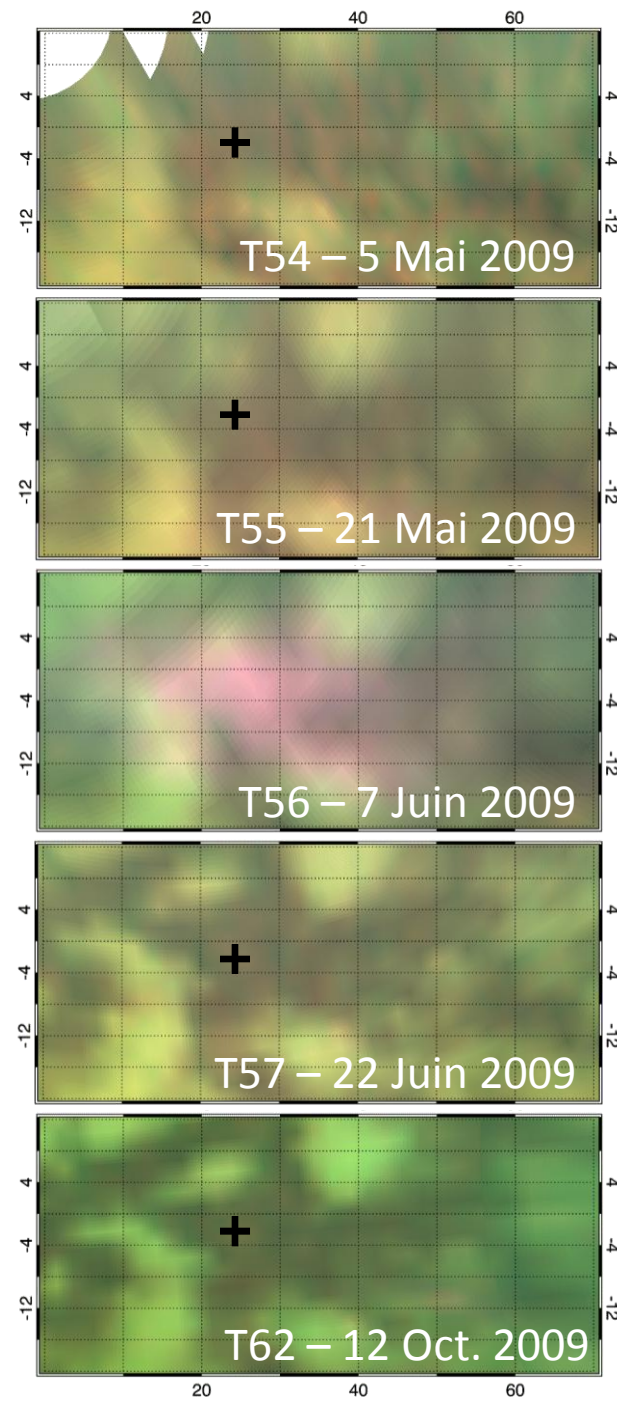
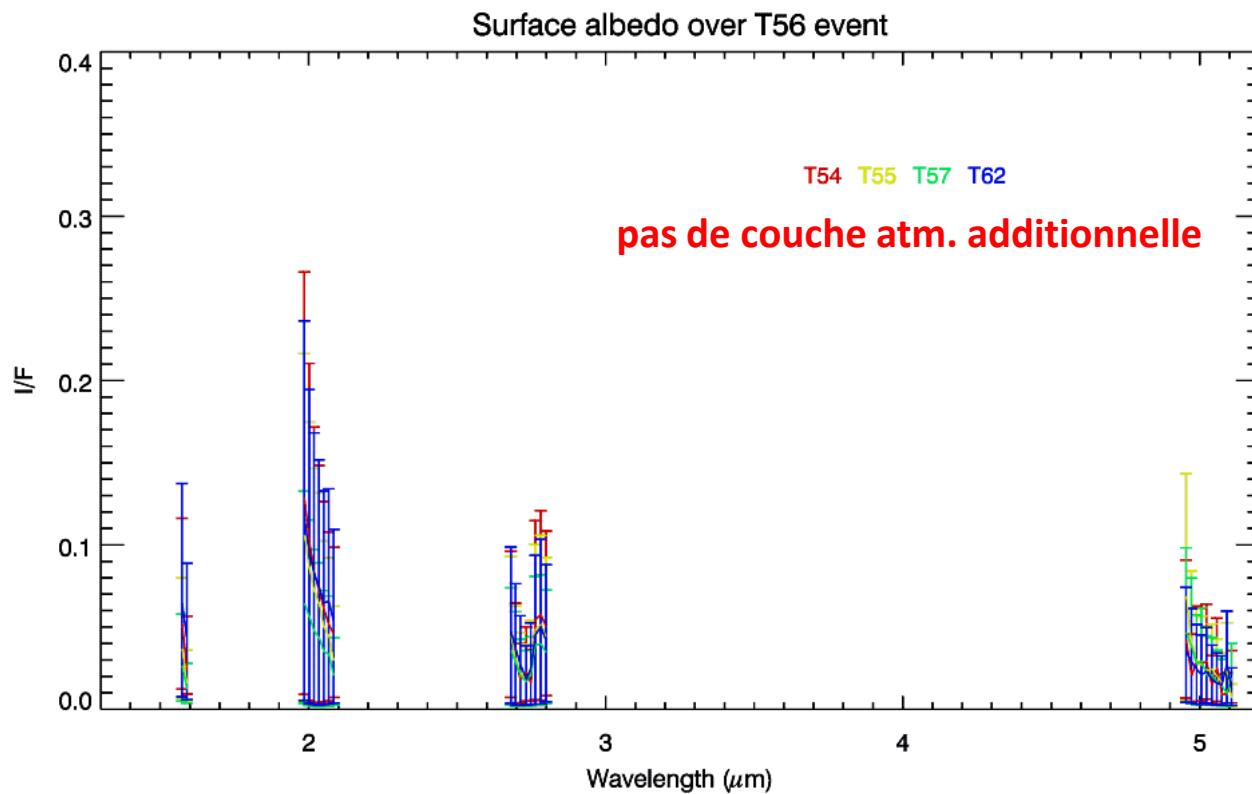


$i=7$

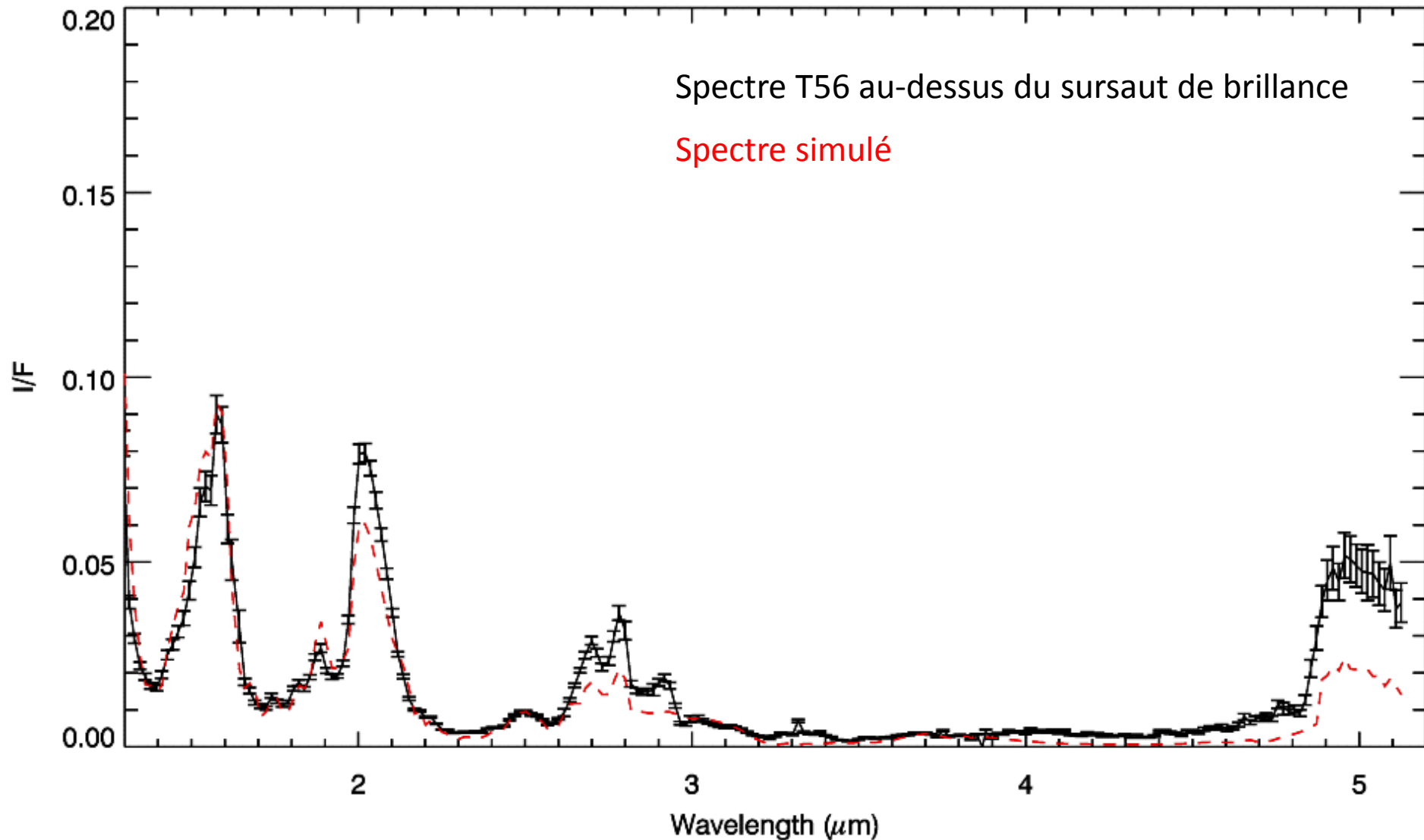
$e=8$

90% du profil de réf. pour la brume



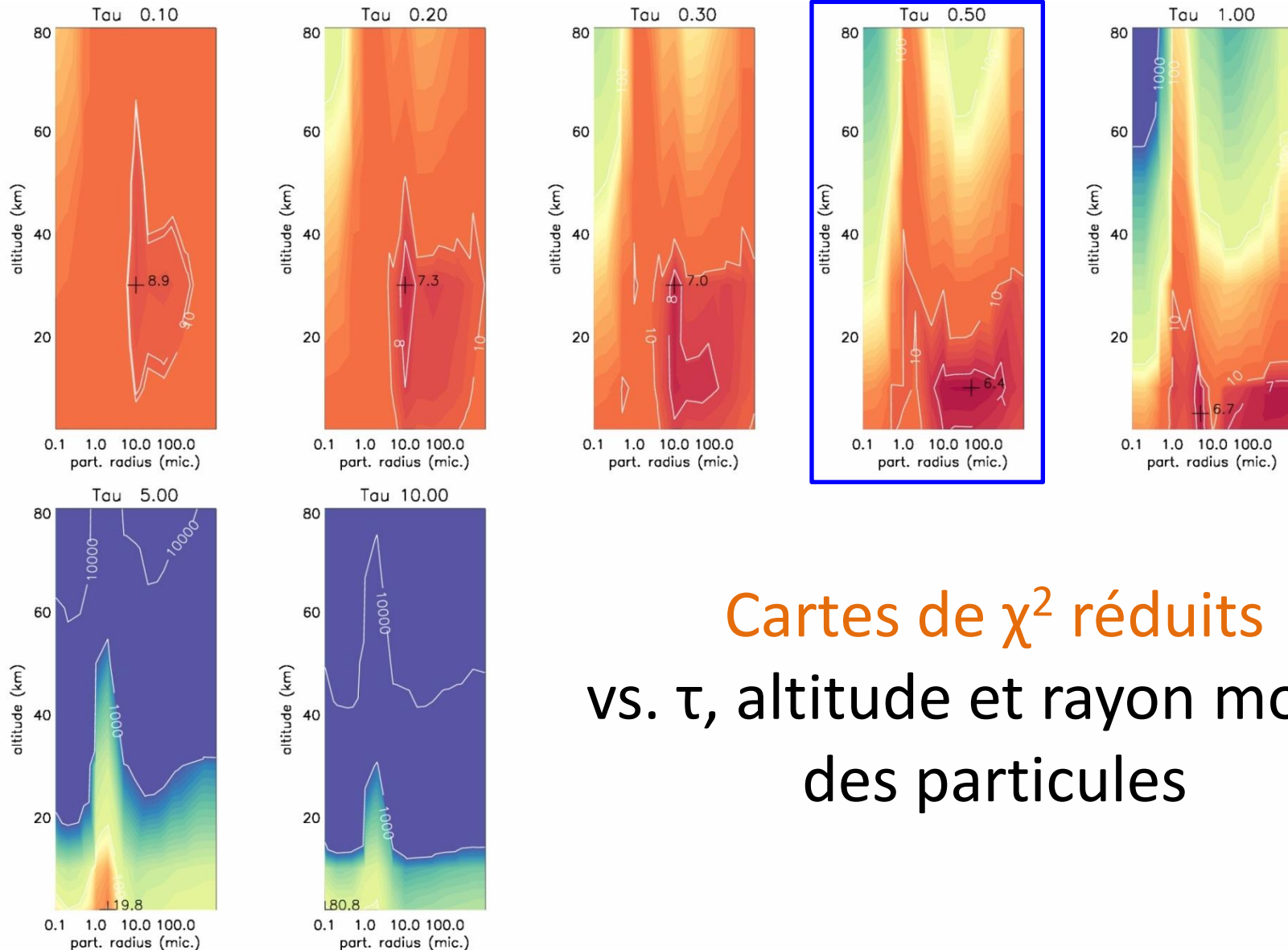


Simulation du spectre de T56 en fixant la quantité de brume et l'albedo
de surface (moyenne de l'albedo pour T54-T55-T57-T62)
pas de couche atm. additionnelle



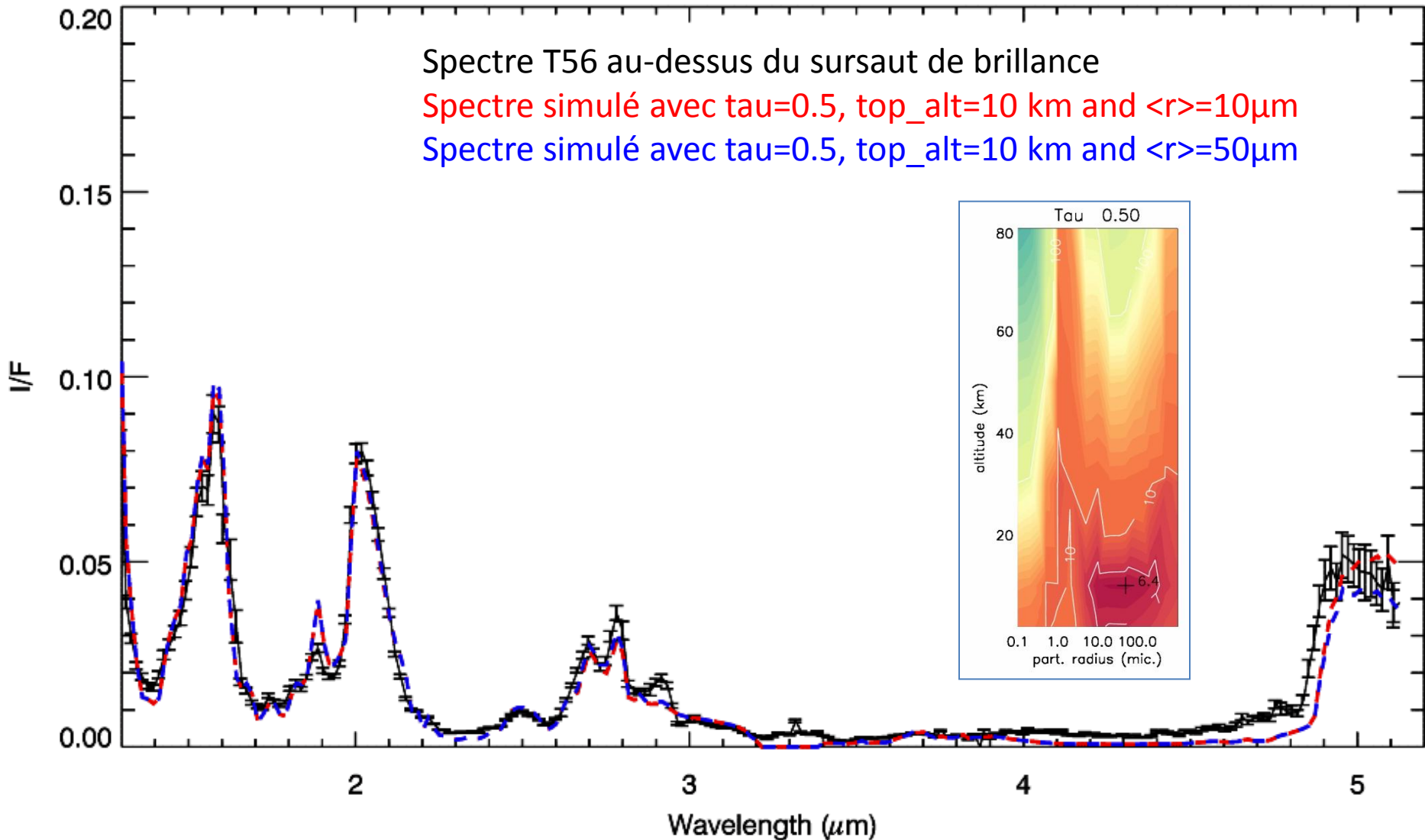
Simulation du spectre de T56 en fixant la quantité de brume et l'albedo de surface (moyenne de l'albedo pour T54-T55-T57-T62)

couche atm. additionnelle



Cartes de χ^2 réduits
vs. τ , altitude et rayon moyen
des particules

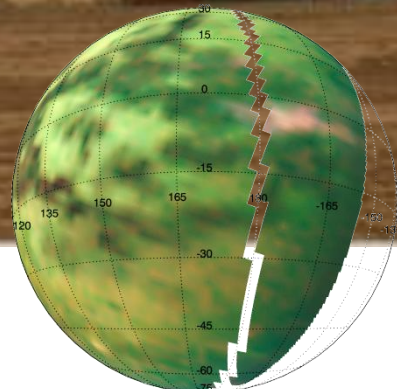
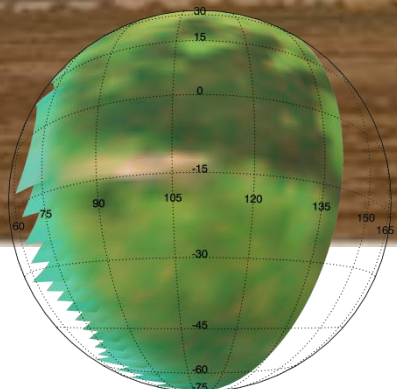
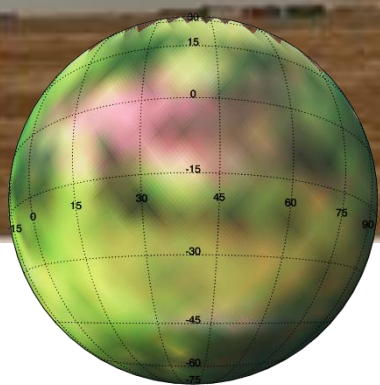
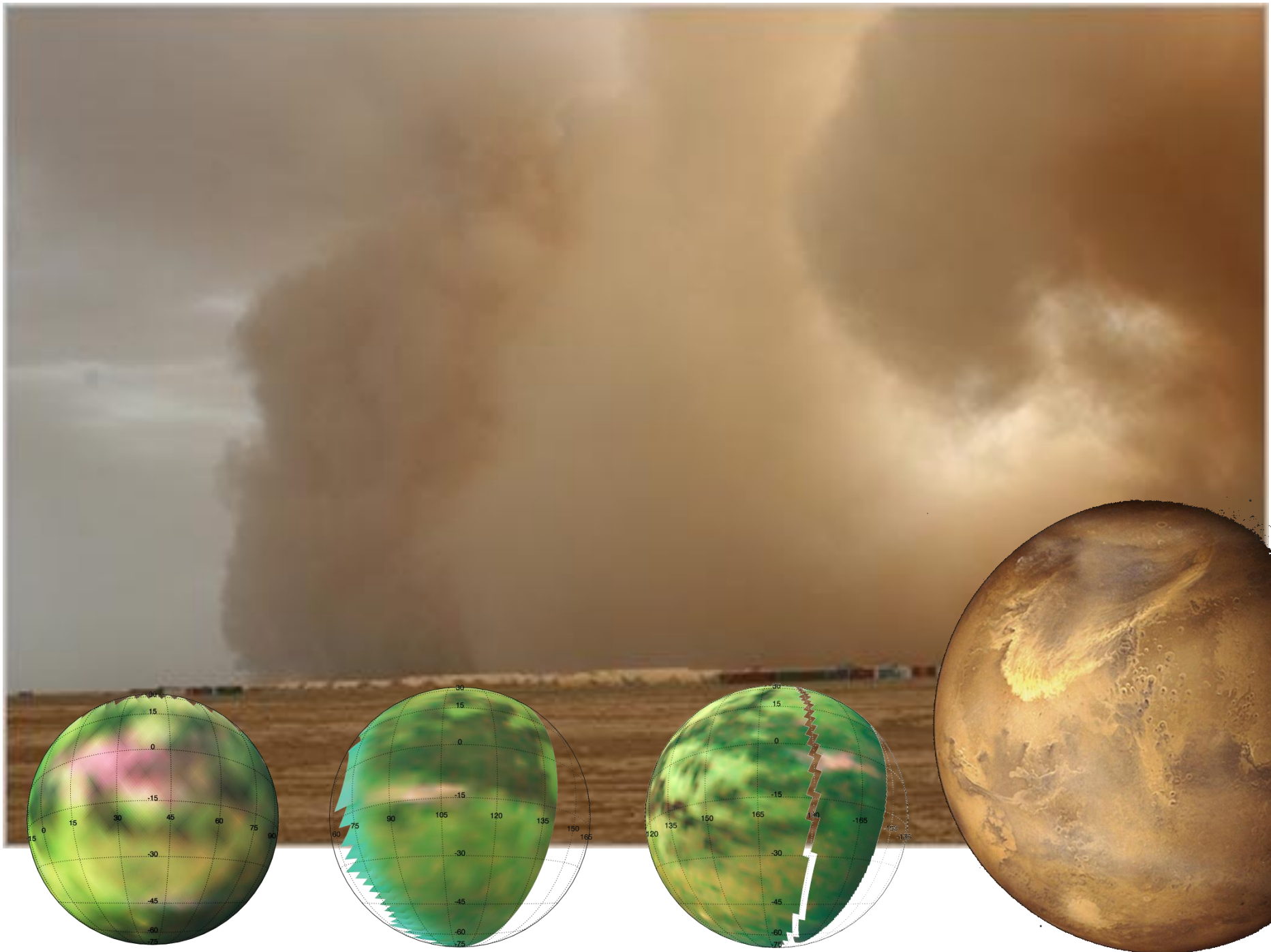
Meilleurs ajustements pour le spectre au-dessus du sursaut de brillance de T56



Conclusions tirées des observations VIMS

1. Evènements étendus, rares (3), temps de vie court, tous se produisant autour de l'équinoxe
2. Même albedo de surface avant & après les évènements
3. Forte corrélation avec les champs de dunes détectés par le RADAR/SAR et le matériau sombre dans l'infrarouge
4. Spectralement distinct des tous les spectres de la surface et des nuages observés jusqu'à présent ($\approx$ plus brillant au-dessus de $2\mu\text{m}$, notamment à $5\mu\text{m}$)
5. Avec le TR, évidences pour le besoin d'une couche atm. : opacité modérée à faible, très basse altitude, chargée de grosses particules ($\varnothing$ 20-100 μm) – ≈ 6000 -10000 part.m^{-3}

⇒ Meilleure explication : **tempêtes de poussières/sable**

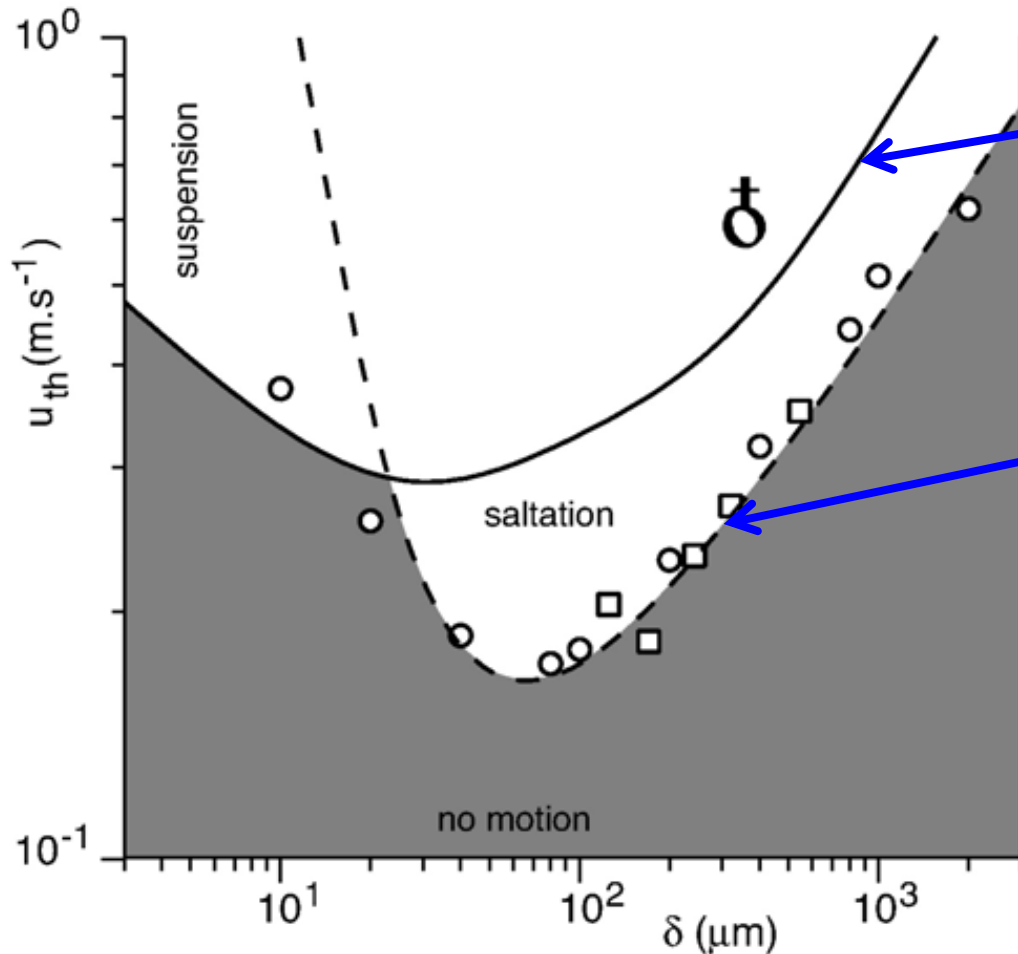


- Est-il possible de générer des tempêtes de poussières/sable dans les conditions de Titan ?

⇒ *Développement d'un modèle analytique pour le transport de sédiment sur Titan, adapté d'un modèle pour la Terre et Mars*

- Ces calculs sont-ils en accord avec les observations VIMS ?
- Quelles sont les implications pour le climat et la sédimentologie de Titan ?

Seuils de transport pour le grain (Claudin & Andreotti, 2006)



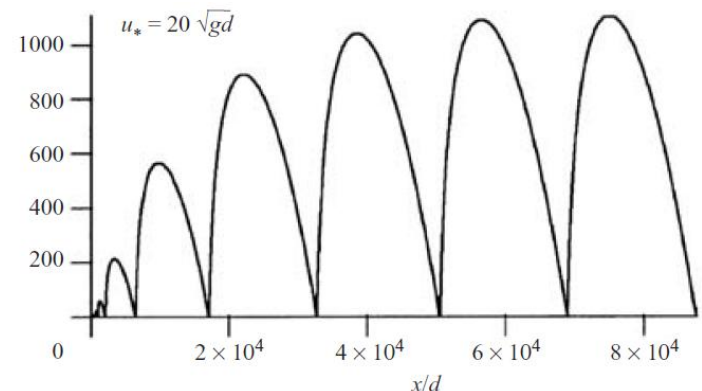
Seuil statique :

Force de poussée > poids apparent
Immobile $\Rightarrow$ mise en mouvement

Seuil dynamique :

Le mouvement du grain est initié par un 1er impact dont l'énergie est suffisante pour déloger et faire "sauter" un autre grain
1er saut $\Rightarrow$ sauts à l'infini

Terre (éolien)

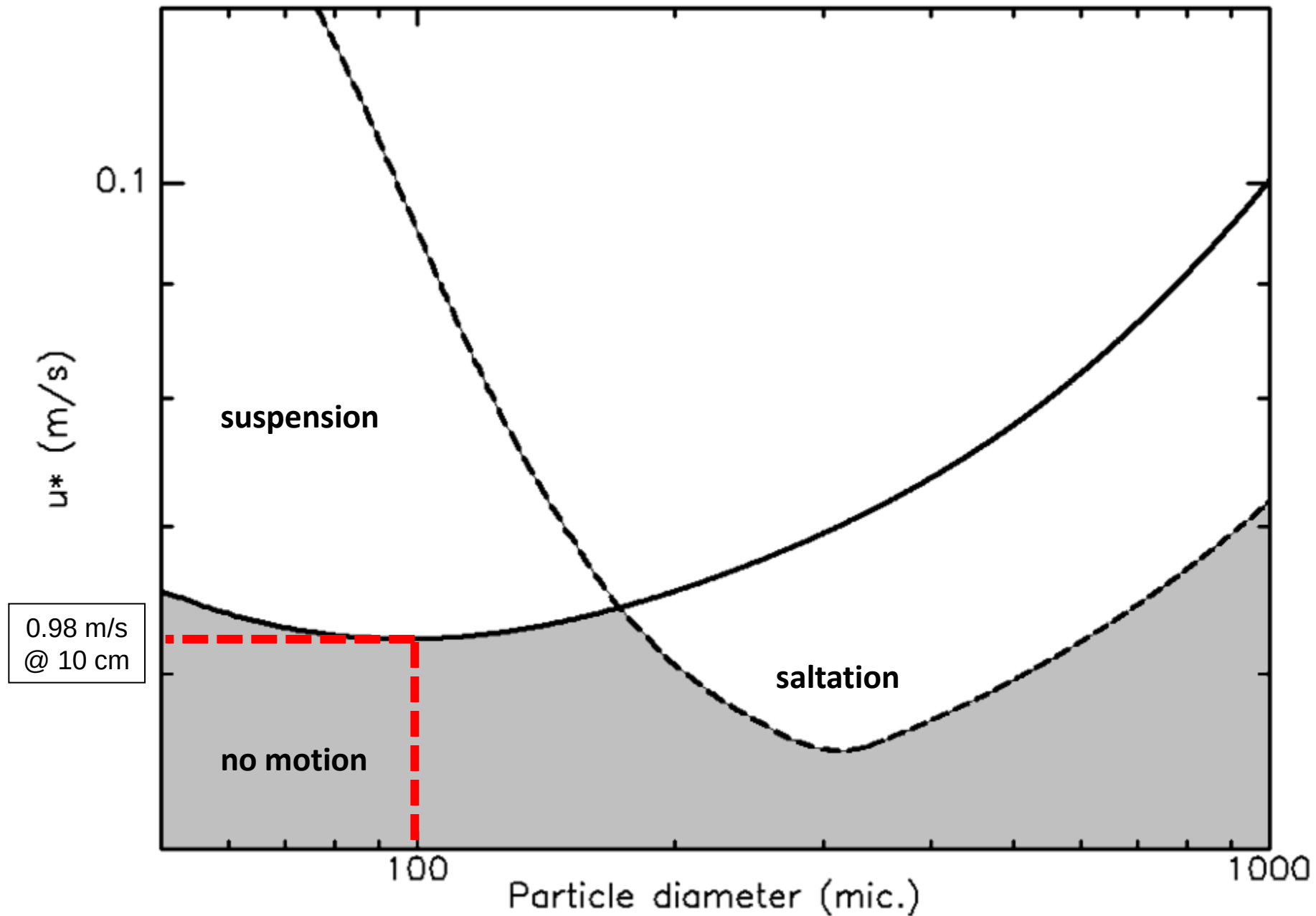


Inputs pour le modèle de transport de sédiment sur Titan

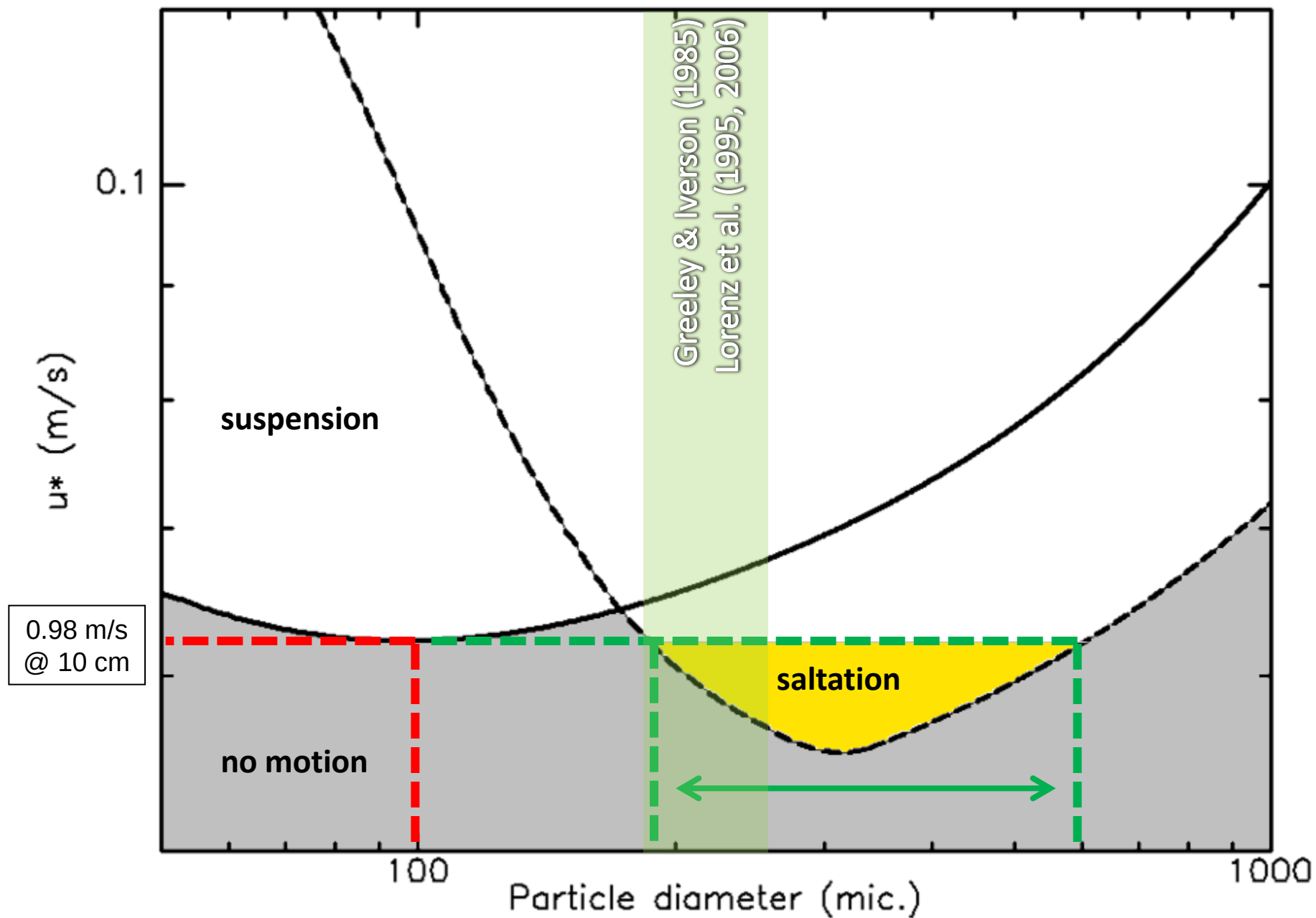
Hypothèses pour le modèle de transport (à l'équateur de Titan) :

- gravité : 1.35 m.s^{-2}
- température : 94 K
- viscosité de l'atm. : $6.4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa.s}$
- concentration de l'atm. : $1.15 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
- masse volumique de l'atm. : 5.23 kg.m^{-3}
- masse volumique des grains de sable : $\approx 1000 \text{ kg.m}^{-3}$

Titan (éolien)



Titan (éolien)

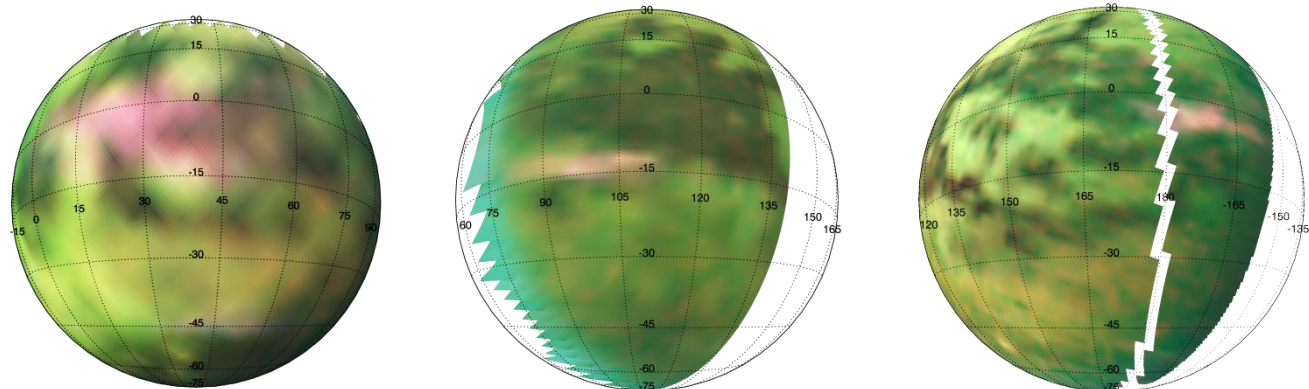


Conclusions

Ce que nous avons détecté avec VIMS semble être un nouvel exemple de l'expression du climat de Titan : de rares et courts épisodes de **tempêtes de poussières**, à l'équinoxe et aux tropiques

Dans ce cas :

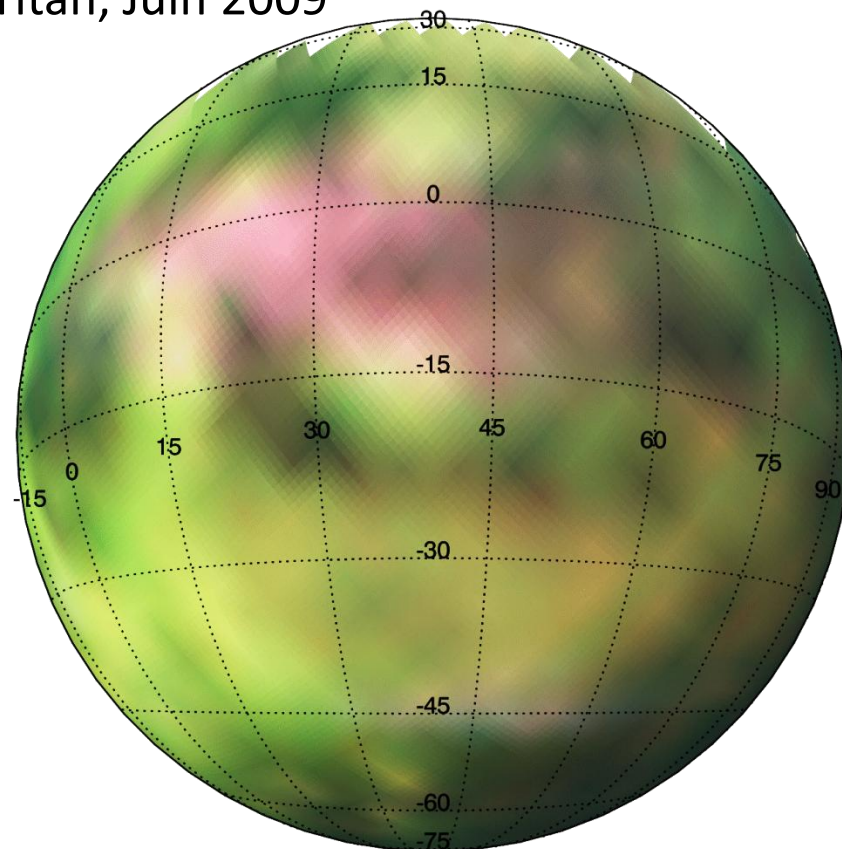
1. **Climat** : Vents de surface, aux tropiques & proche de l'équinoxe peuvent être bien plus forts que les vents moyens prédits pour les modèles (5-10x), mais cela doit rester rare (comme sur Terre & Mars). *Qu'est-ce qui alimente des tempêtes ?*
2. **Sédimentologie** : Saltation: Transport de sédiment & dunes sont certainement actifs ! (dans des circonstances exceptionnelles)



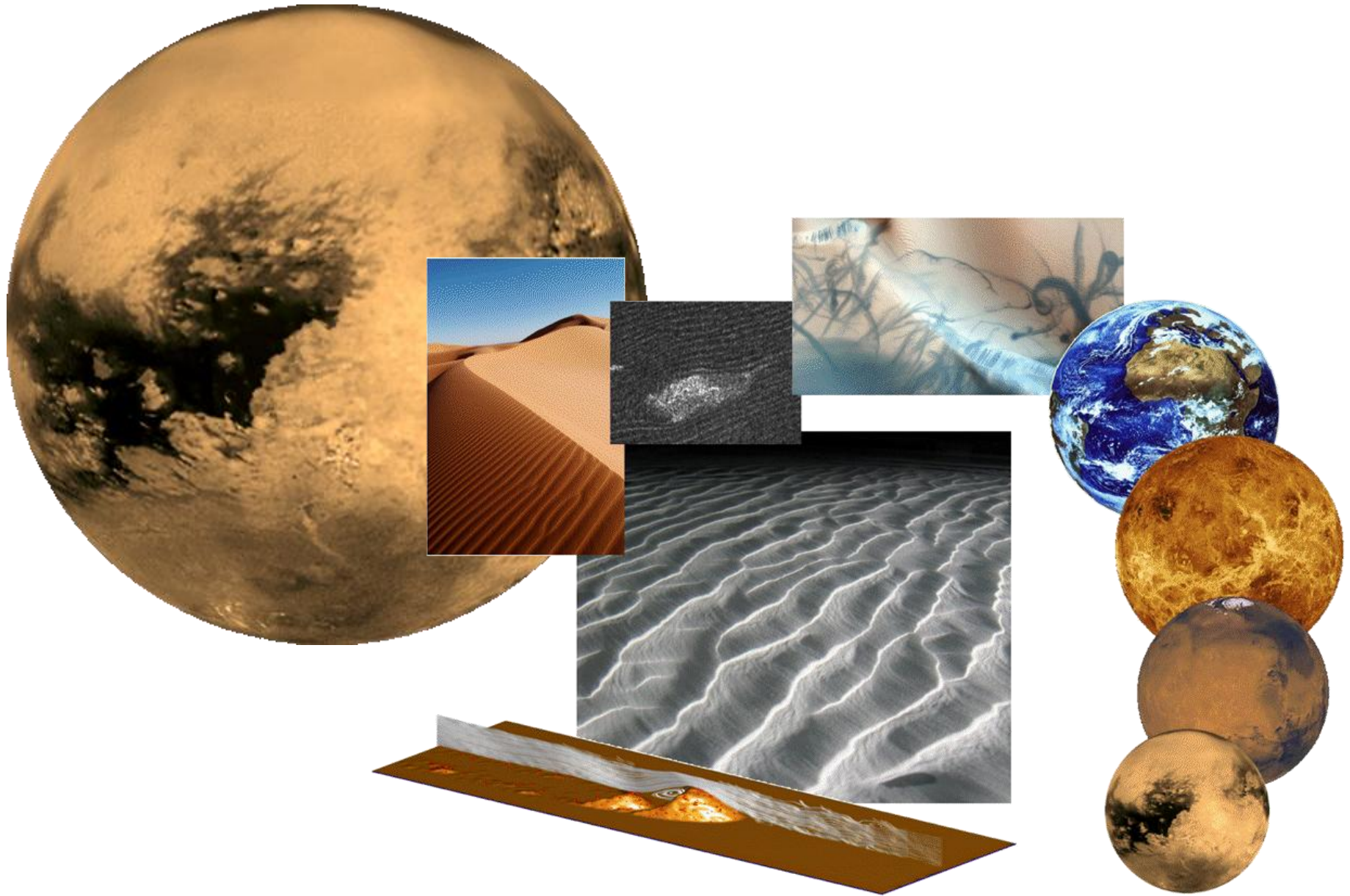
Iraq, Sept. 2008



Titan, Juin 2009



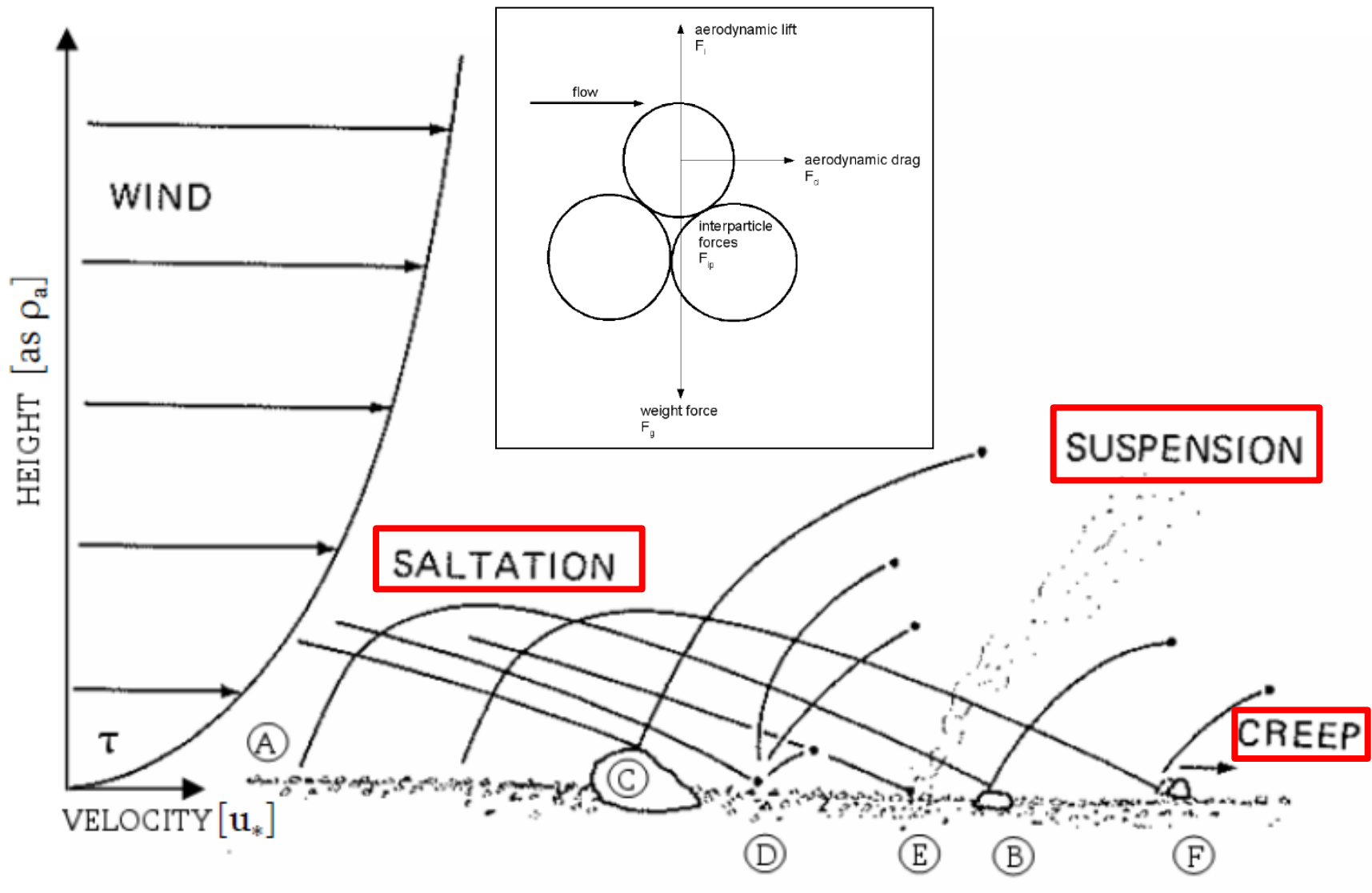
2 Projets blancs ANR « APOSTIC » et « EXO-DUNES »

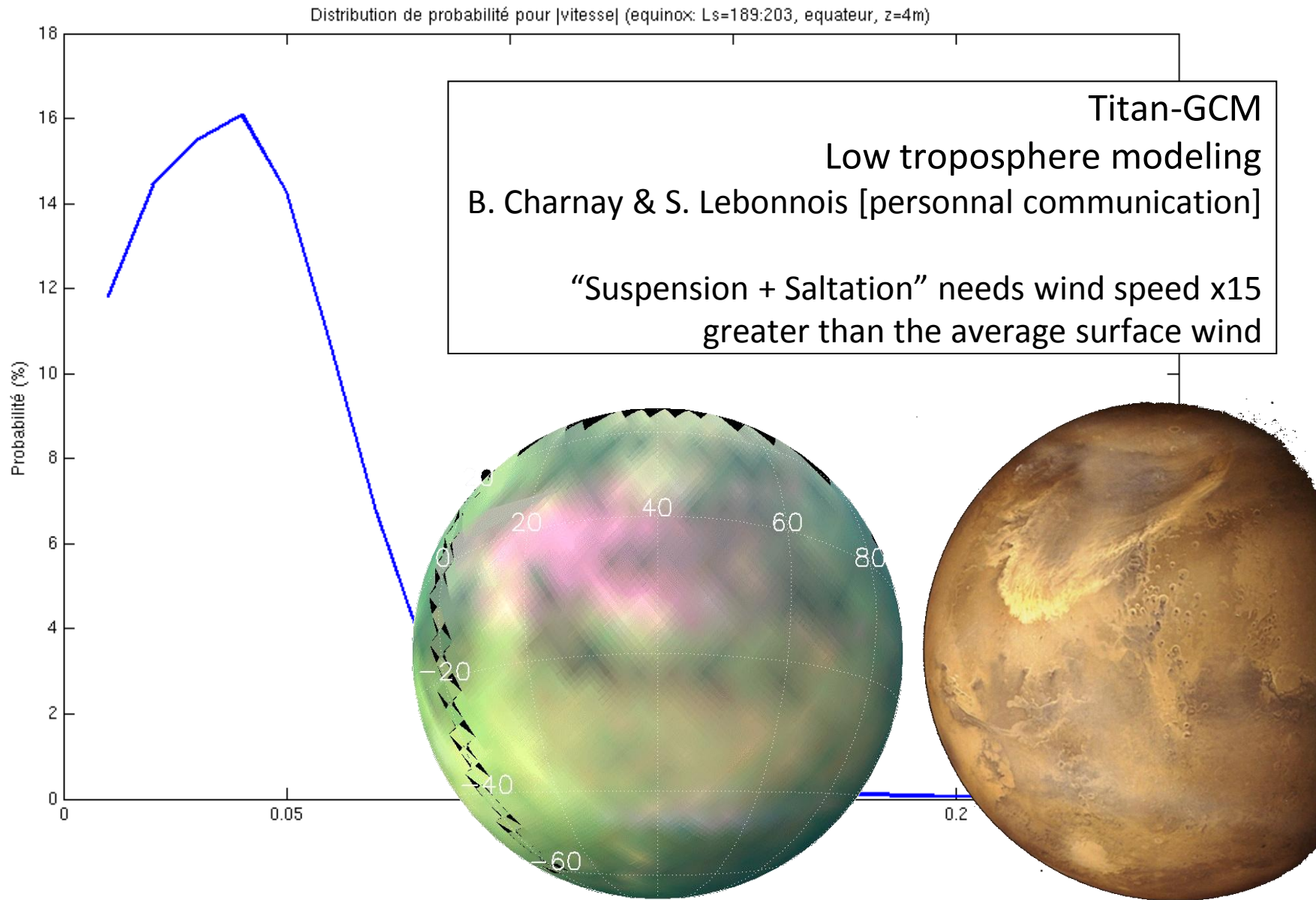


Supplements

Dust storm on Titan

The physics of particle motion – 3 modes of transport

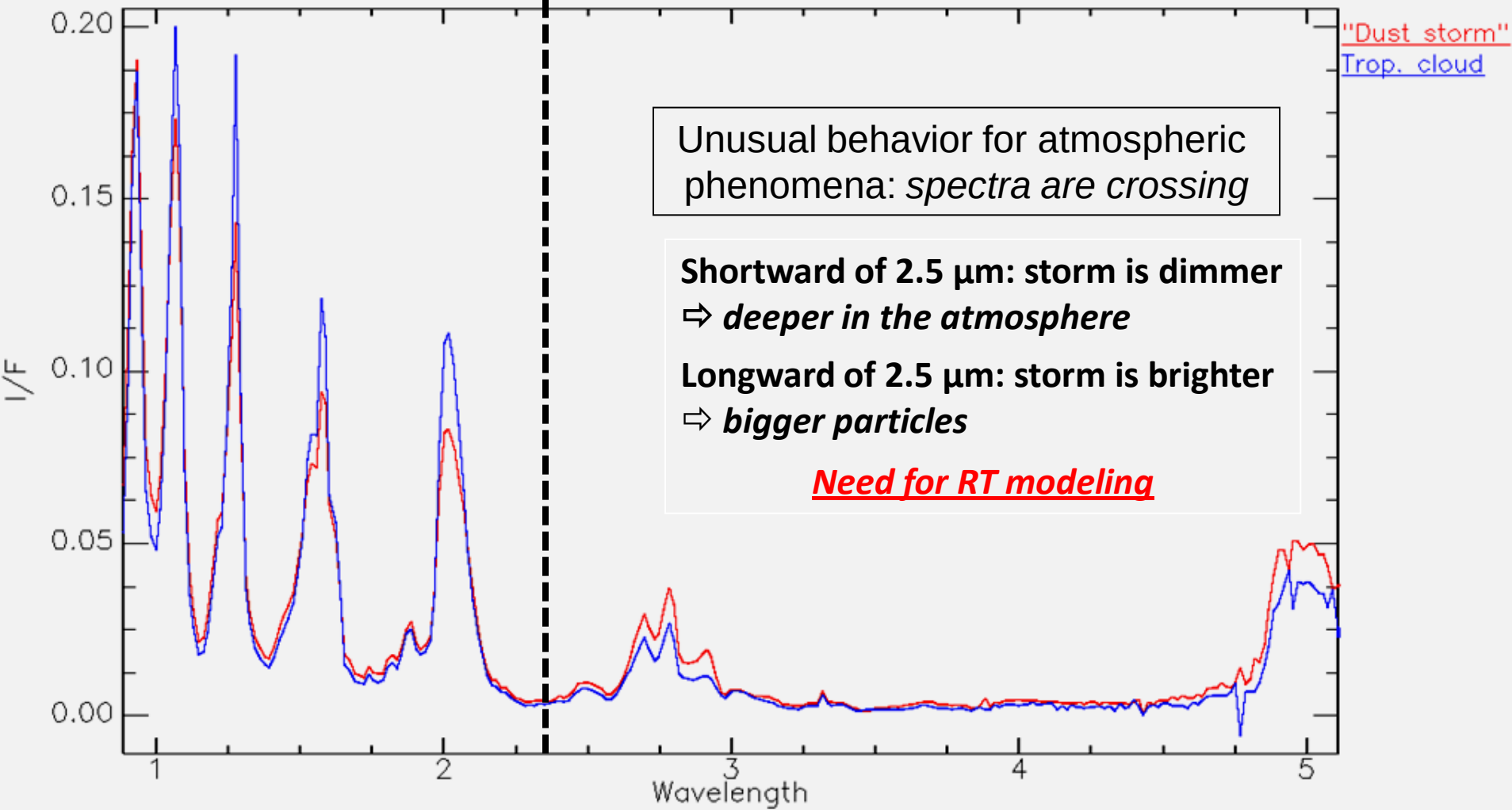




"Dust storm" vs. tropical cloud

Much fainter below $2\mu\text{m}$

Slightly brighter above $2\mu\text{m}$



T56 Storm

Incidence: 5-26

Emergence: 26-53

Phase: 44

Airmass $\approx$ 2.11-2.77

Bright surf.

Incidence: 30-44

Emergence: 7-20

Phase: 44

Airmass $\approx$ 2.16-2.45

Dark surf.

Incidence: 34-58

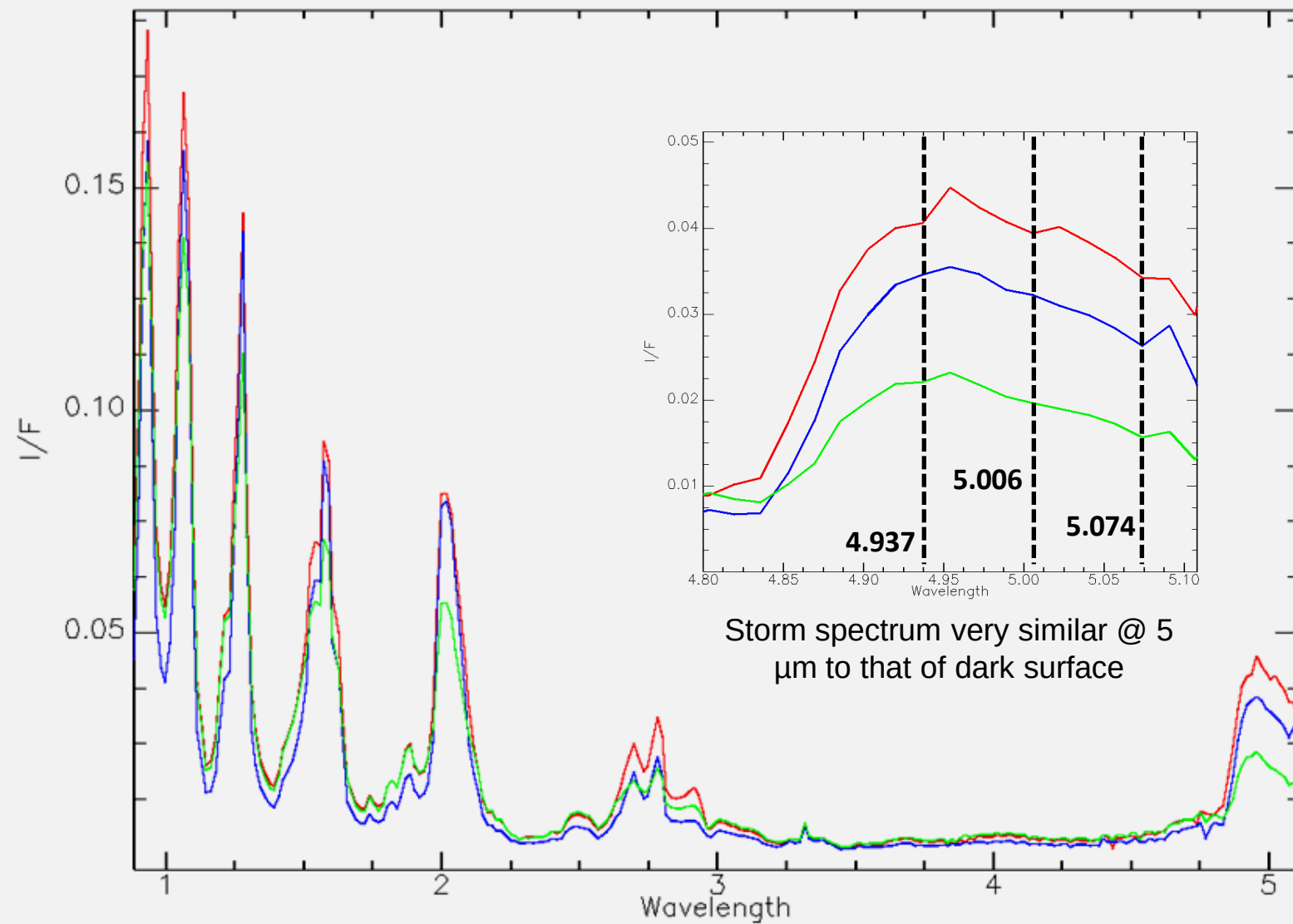
Emergence: 38-55

Phase: 44

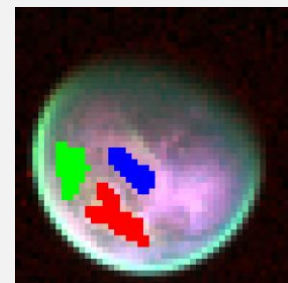
Airmass $\approx$ 2.47-3.63

T56 event

$\approx$ Brighter than surface
at all λ



"Storm" (avg 52px)
Bright surf. (avg 51px)
Dark surf. (avg 40px)



320 ms
140 km/px

T65 Storm

Incidence: 18-30

Emergence: 40-68

Phase: 44

Airmass $\approx$ 2.35-3.82

Bright surf.

Incidence: 40-52

Emergence: 20-33

Phase: 44

Airmass $\approx$ 2.37-2.82

Dark surf.

Incidence: 45-65

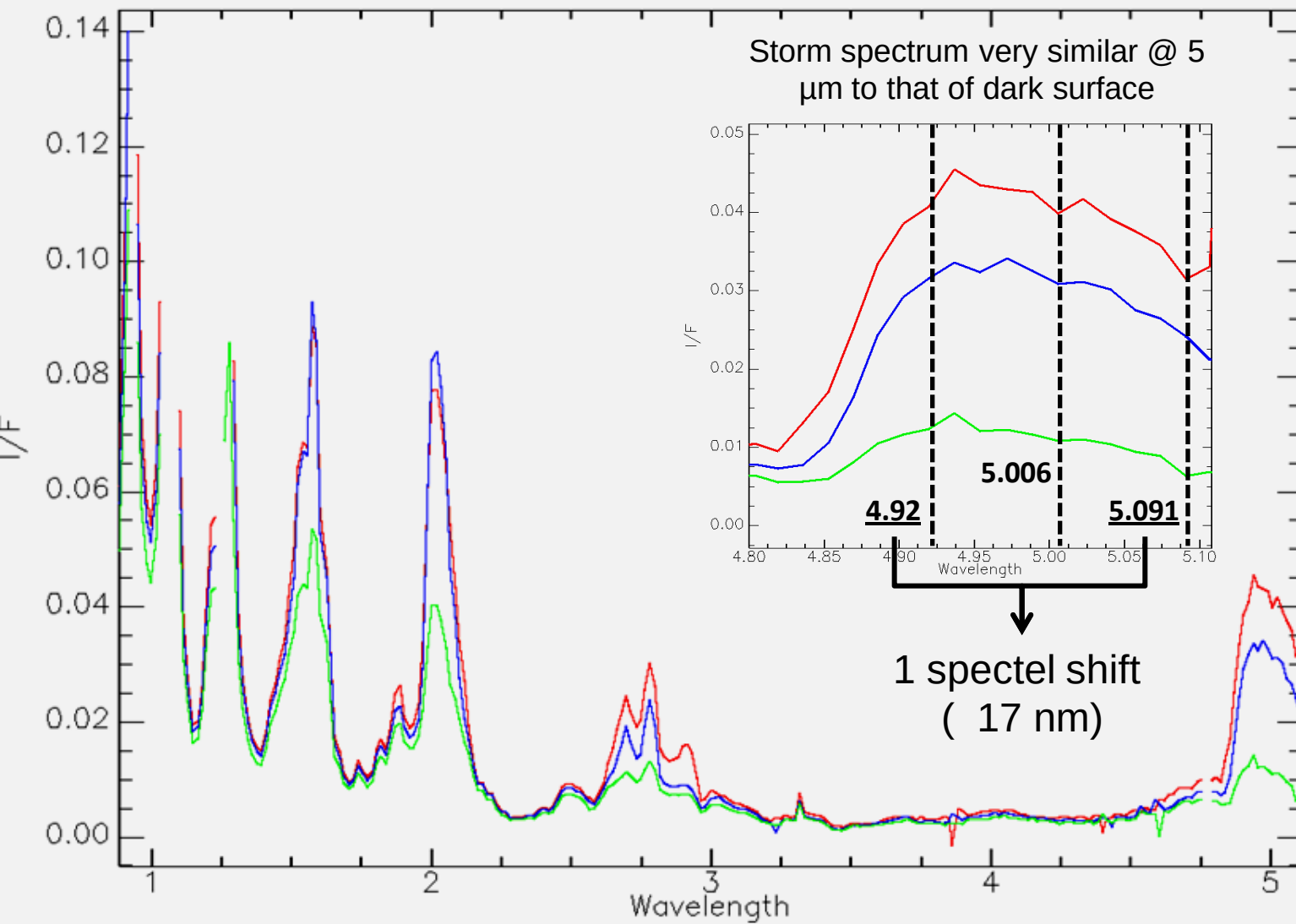
Emergence: 10-28

Phase: 44

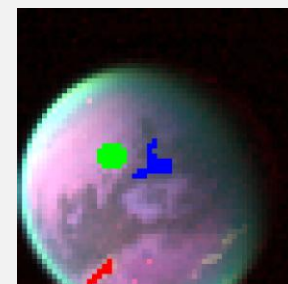
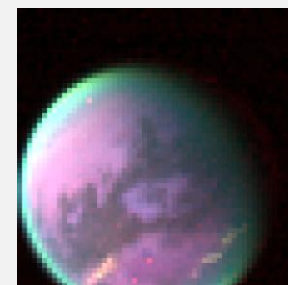
Airmass $\approx$ 2.45-3.5

T65 event

$\approx$ Brighter than surface
at all λ



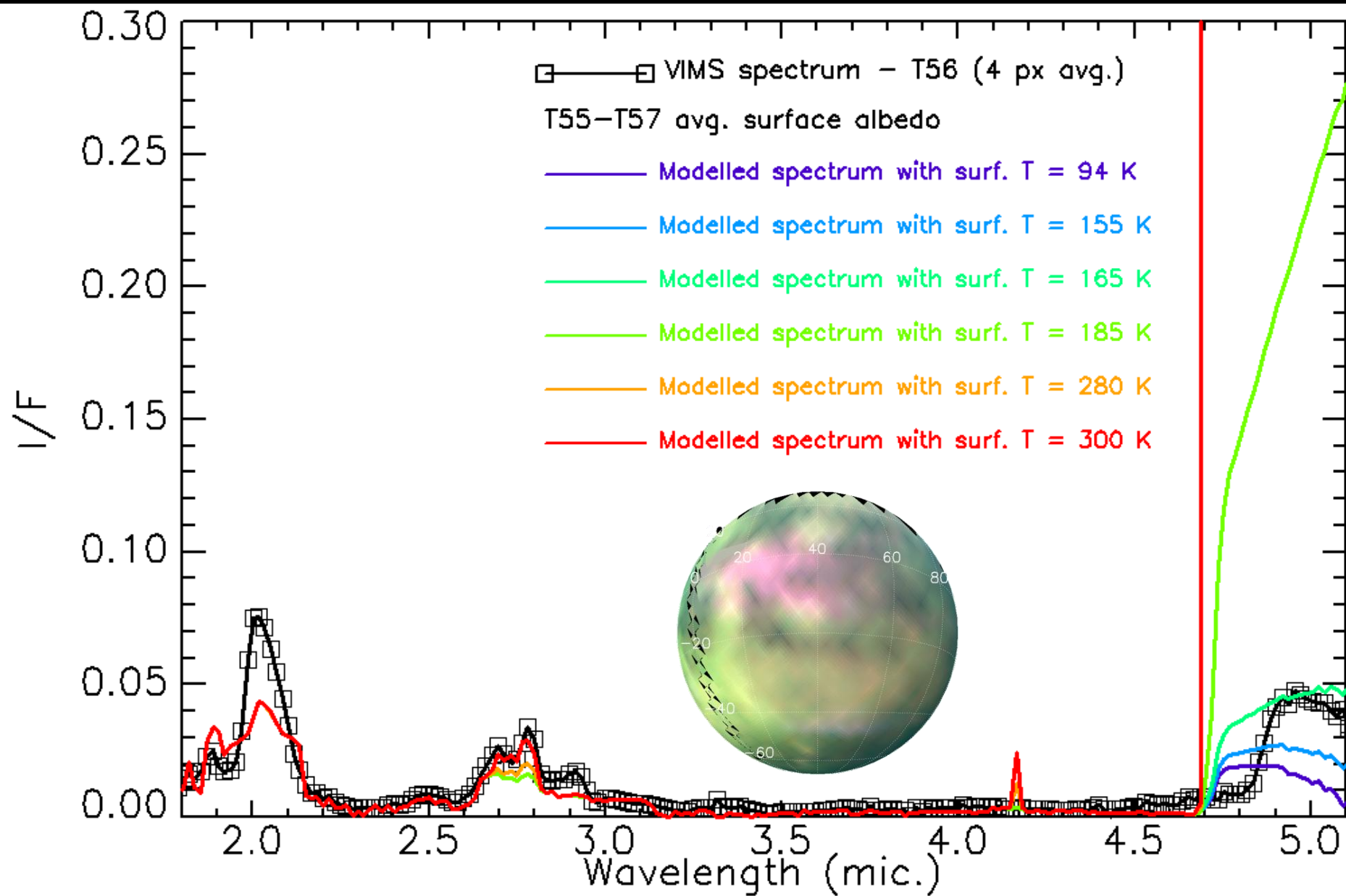
"Storm" (avg 11px)
Brigh surf. (avg 26px)
Dark surf. (avg 26px)



640 ms
105 km/px

Is it surface or atmospheric ?

- The only “surface” events that can be compatible with the characteristics of these observations (**large spatial extension, transient, particularly bright @ 5 μm**) is: ~~near-surface fog over small eq. liquids or transient hot spots ?~~
- If atmospheric... must be slightly different from clouds... **dust storms ?**



Is it surface or atmospheric ?

- The only “surface” events that can be compatible with the characteristics of these observations (**large spatial extension, transient, particularly bright @ 5 μm**) is: ~~near-surface fog over small eq. lakes or transient hot spots ?~~
- If atmospheric... must be slightly different from clouds... **dust storms** ?