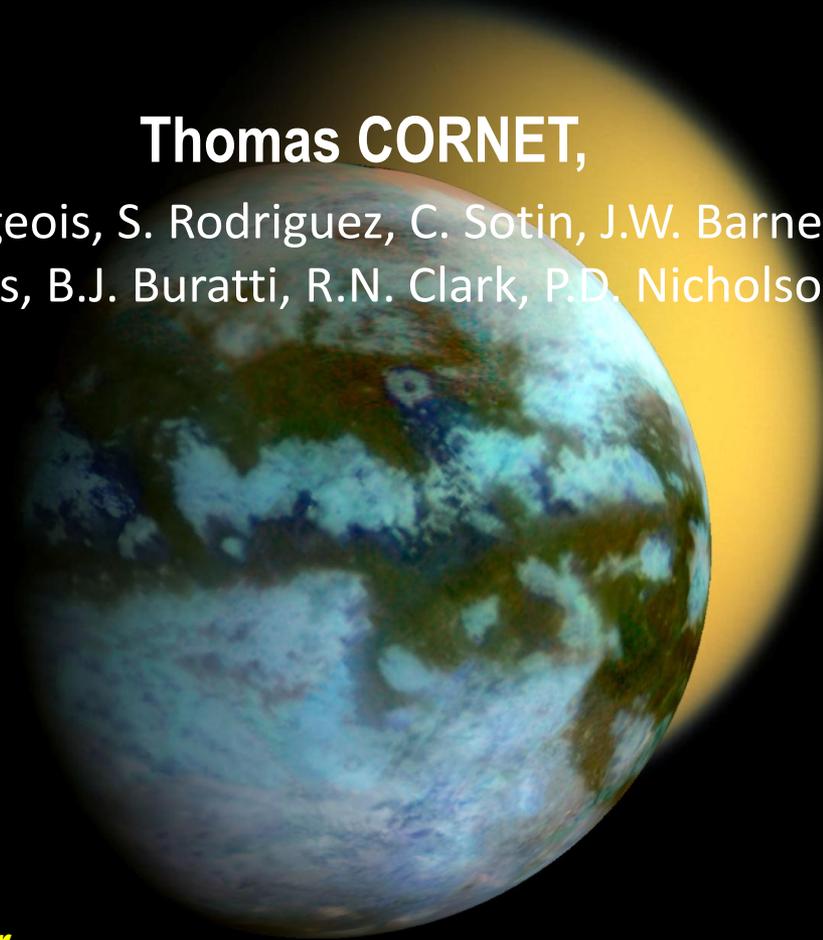


La surface de Titan vue par VIMS, l'imageur hyperspectral de la sonde Cassini

Thomas CORNET,

S. Le Mouélic, O. Bourgeois, S. Rodriguez, C. Sotin, J.W. Barnes, R.H. Brown, K.H. Baines, B.J. Buratti, R.N. Clark, P.D. Nicholson



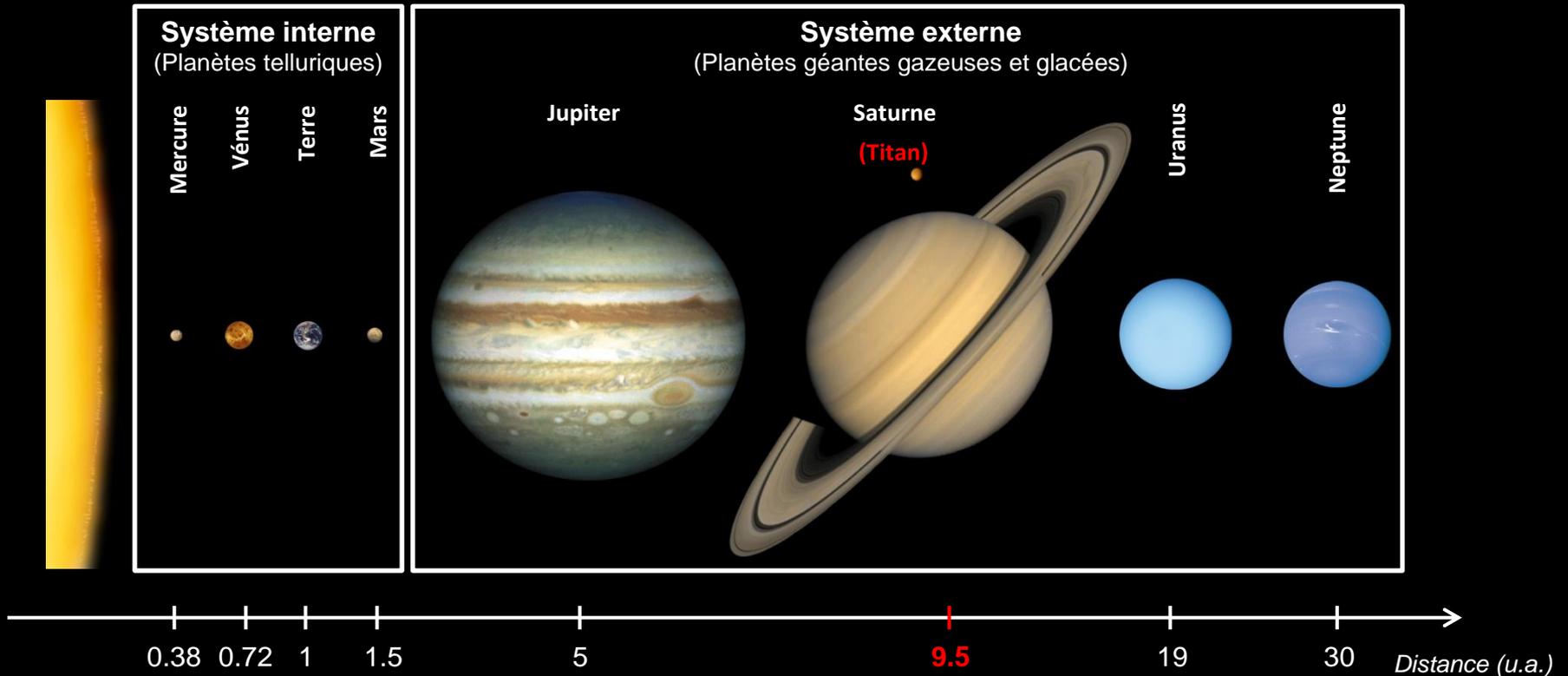
Thomas.Cornet@univ-nantes.fr

Doctorant en 3^e année de thèse

Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes (LPGNantes)



Titan dans le système solaire



- Famille des satellites de glace
- Le plus gros satellite de Saturne ($R_T = 2575$ km): plus gros que Mercure !
- Epaisse atmosphère riche en diazote (95%) et en méthane (2 - 5%)
- Chimie complexe de l'atmosphère : photodissociation du méthane:
 - production d'hydrocarbures simple (dont éthane)
 - formation de molécules complexes
 - brume opaque et orangée dans le visible

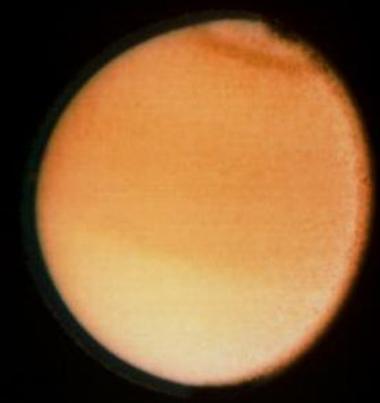


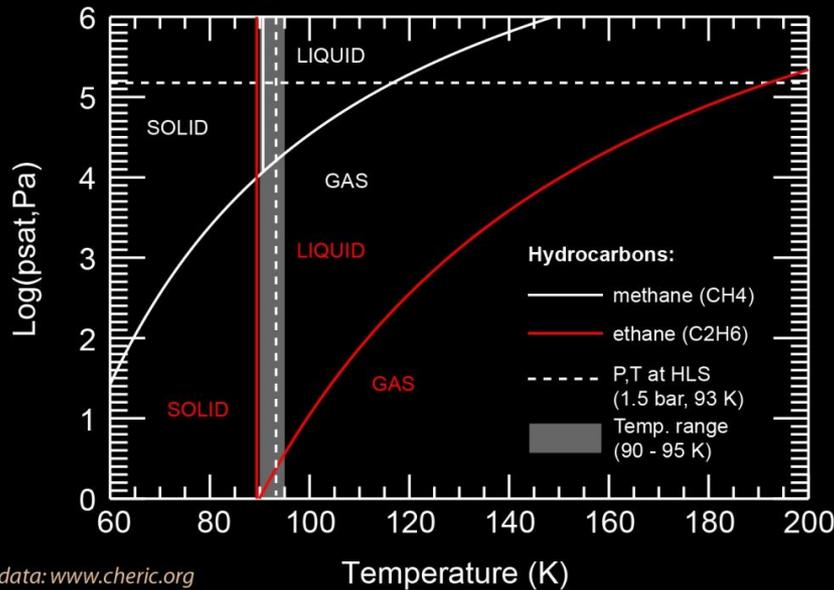
Image acquise par la sonde Voyager II (1981)

Titan dans le système solaire

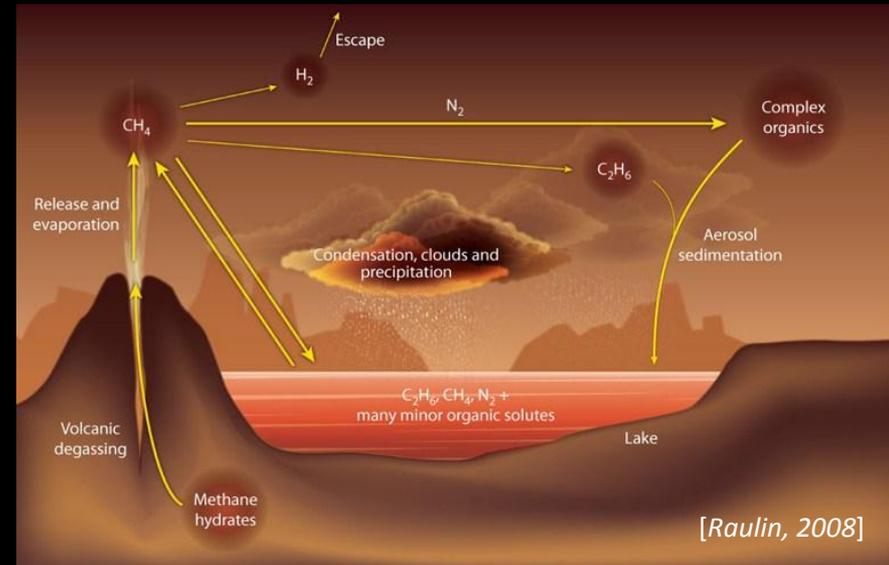
Conditions de surface : 1.5 bar, 90 – 95 K

[Tomasko et al., 2005; Janssen et al., 2009; Jennings et al., 2009]

Saturation vapor pressure as a function of temperature



Méthane et éthane métastables en surface
cycle des hydrocarbures ~ cycle de l'eau sur Terre
dans les régions arides (évaporation > précipitations)



Mission Cassini-Huygens (2004 – 2017) : exploration de la surface pour mettre en évidence et comprendre le cycle des hydrocarbures

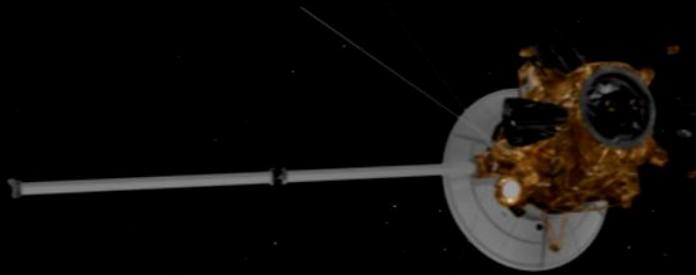
→ **Activité climatique (nuages): imagerie infrarouge**

[Rodriguez et al., 2009; Le Mouélic et al., 2011; Rodriguez et al., 2011]

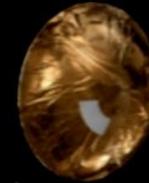
→ **Géologie de Titan : imagerie radar + infrarouge**

L'imagerie hyperspectrale à bord de la sonde Cassini

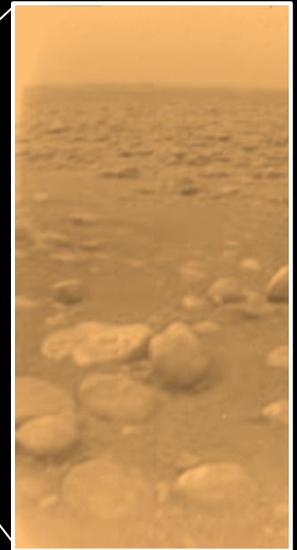
Mission Cassini-Huygens (2004 – 2017)



Cassini (orbiteur, 12 instruments)
→ Imagerie infrarouge (**VIMS**, ISS)
→ Imagerie radar (RADAR)



Huygens (atterrisseur, 6 instruments)
Atterrissage le 14 Janvier 2005

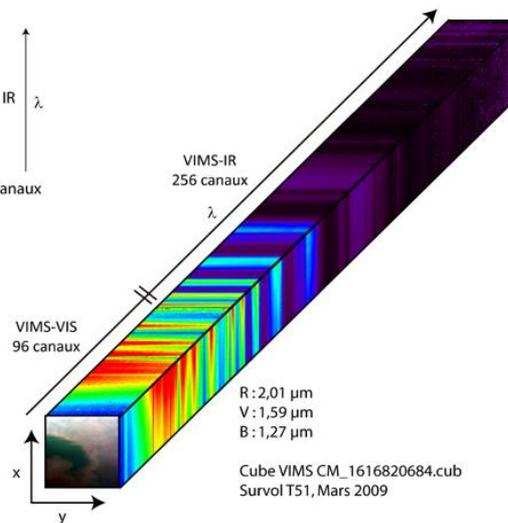
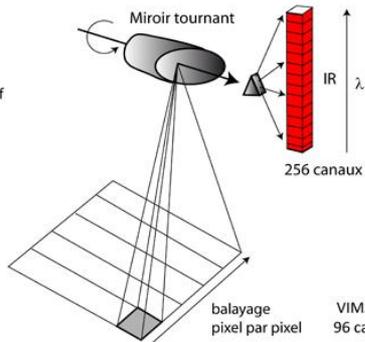
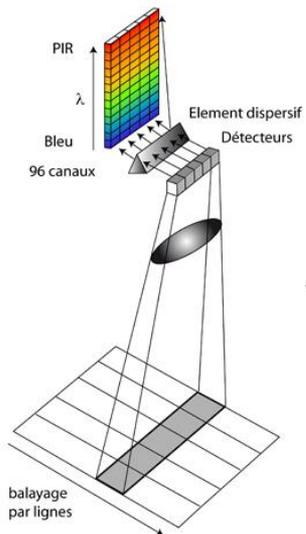


L'imageur hyperspectral de la sonde Cassini : **V**isual and **I**nfrared **M**apping **S**pectrometer (**VIMS**)

FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR
"PUSH-BROOM" : VIMS-VIS

FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR
"WHISK-BROOM" : VIMS-IR

CUBE HYPERSPECTRAL VIMS



Spectro-imagerie:

→ Cubes hyperspectraux (x,y,λ) :
352 canaux spectraux, 64x64 pixels

2 détecteurs distincts :

-VIMS-VIS: visible

- 0.35 - 1.05 μm, $r_{\lambda}=7.3$ nm

- 96 canaux

-VIMS-IR: infrarouge

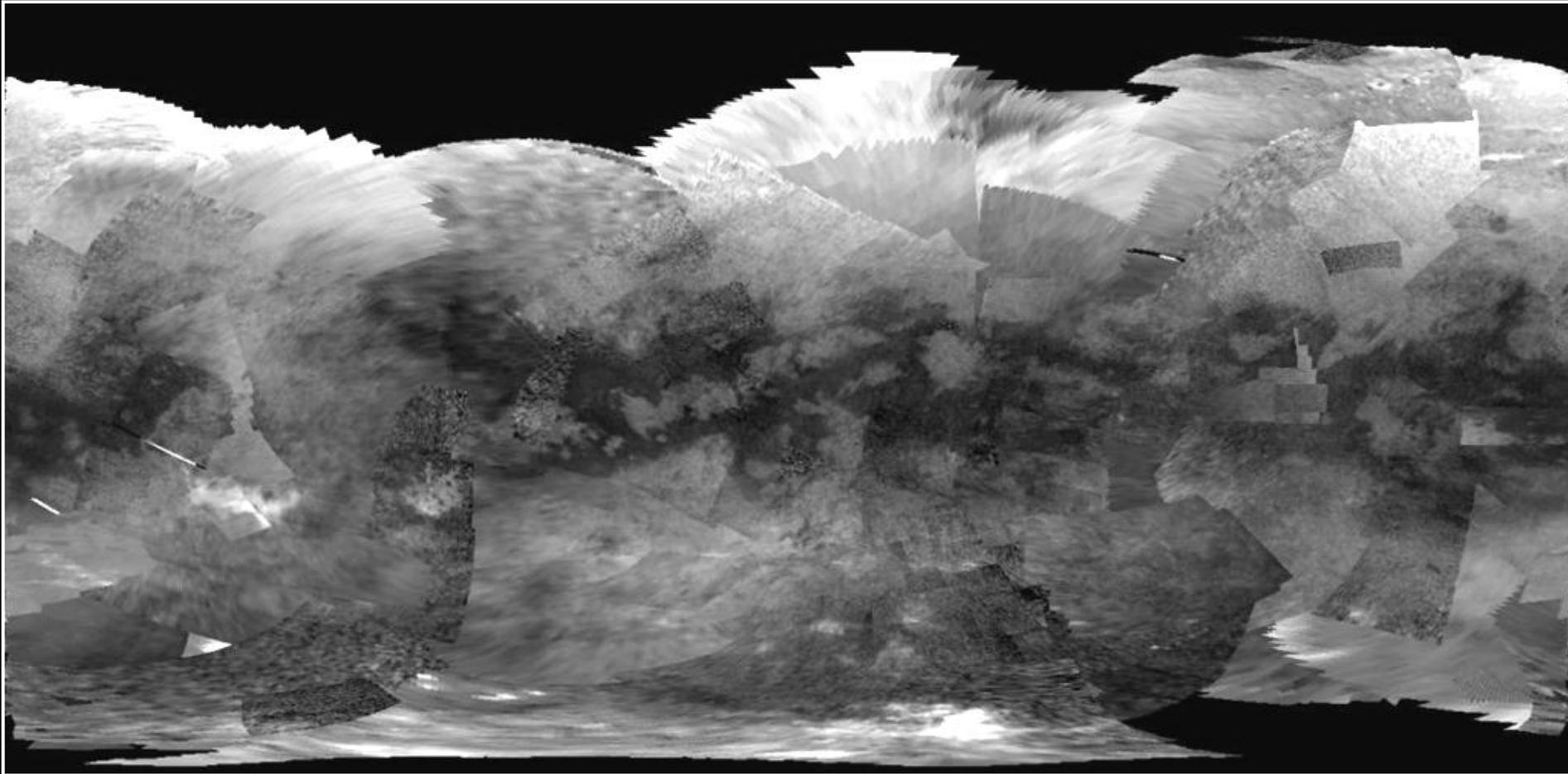
- 0.88 - 5.10 μm, $r_{\lambda}=16.6$ nm

- 256 canaux

Résolution la plus fine: 500 m

L'imagerie hyperspectrale à bord de la sonde Cassini

Mosaïque de la surface de Titan à 5 μm (72 survols)
(normalisée par $\mu_0 = \cos i$)

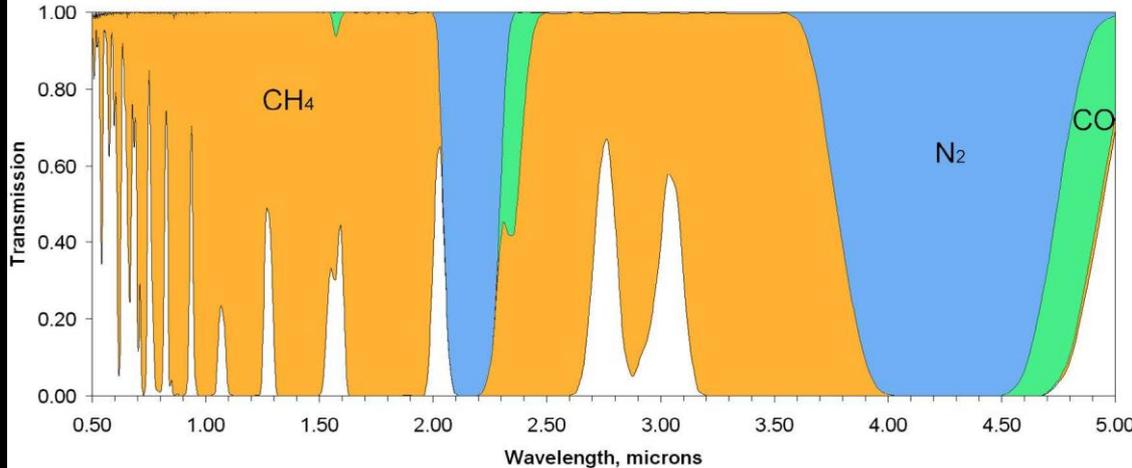


[Le Mouélic et al., submitted to PSS]

L'imagerie hyperspectrale à bord de la sonde Cassini

Images hyperspectrales de la surface de Titan **MAIS** :

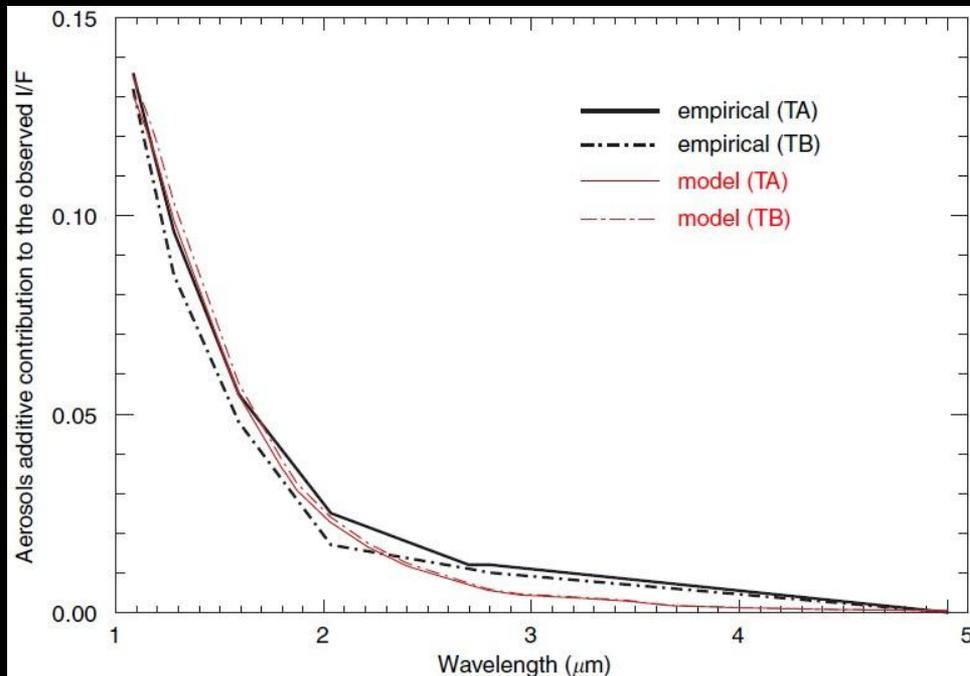
Principal Absorbing Gases in Titan's Atmosphere



Absorption du signal par les gaz présents dans l'atmosphère (principalement méthane)

Surface visible à quelques longueurs d'ondes dans des fenêtres atmosphériques [Sotin et al., 2005]

[Clark et al., 2010]



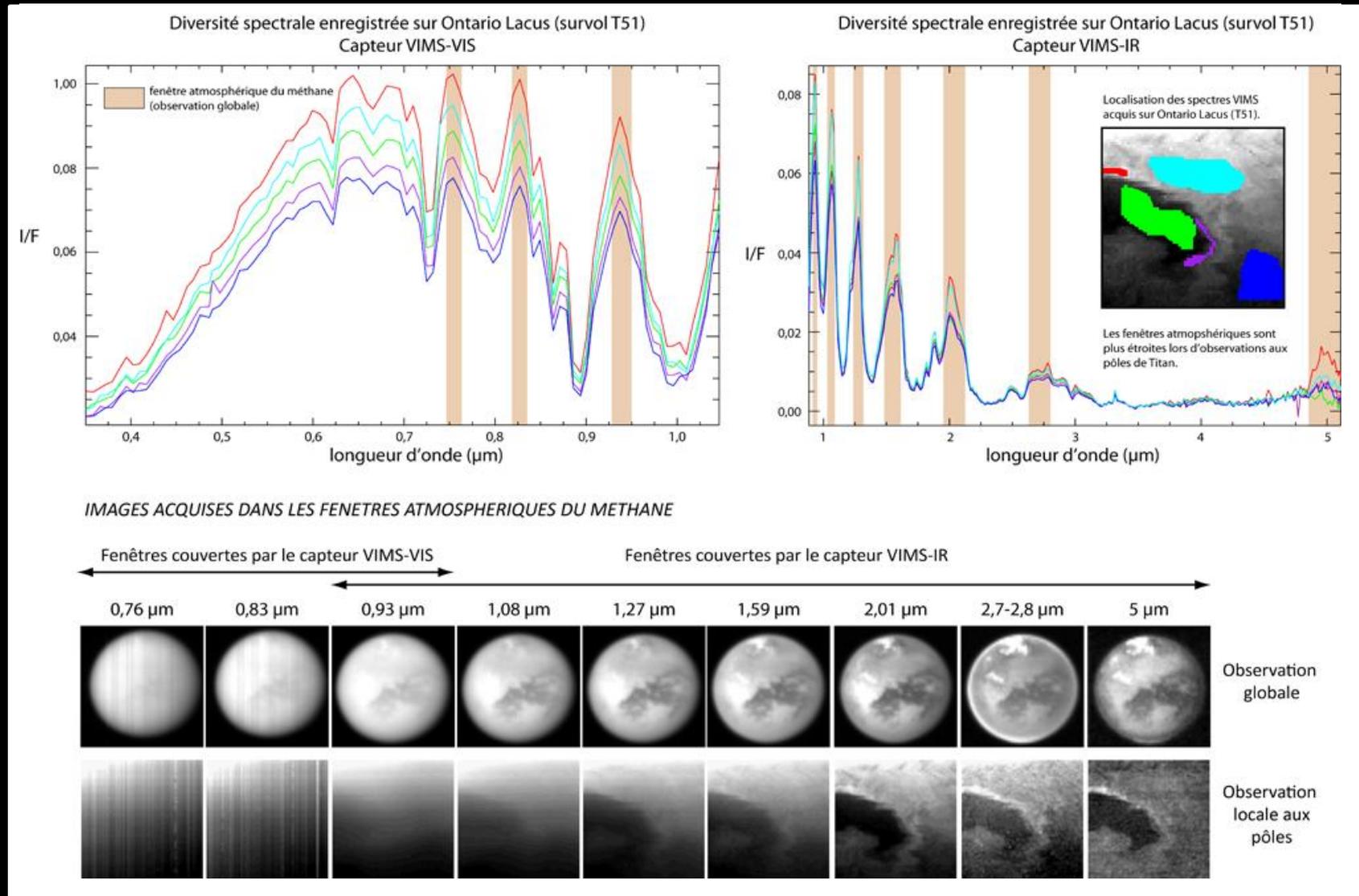
Très forte diffusion par les particules présentes dans l'atmosphère (aérosols), principalement à courte longueur d'onde

Images de surface altérées par des effets de diffusion atmosphériques additifs : images floues

[Rodriguez et al., 2006]

L'imagerie hyperspectrale à bord de la sonde Cassini

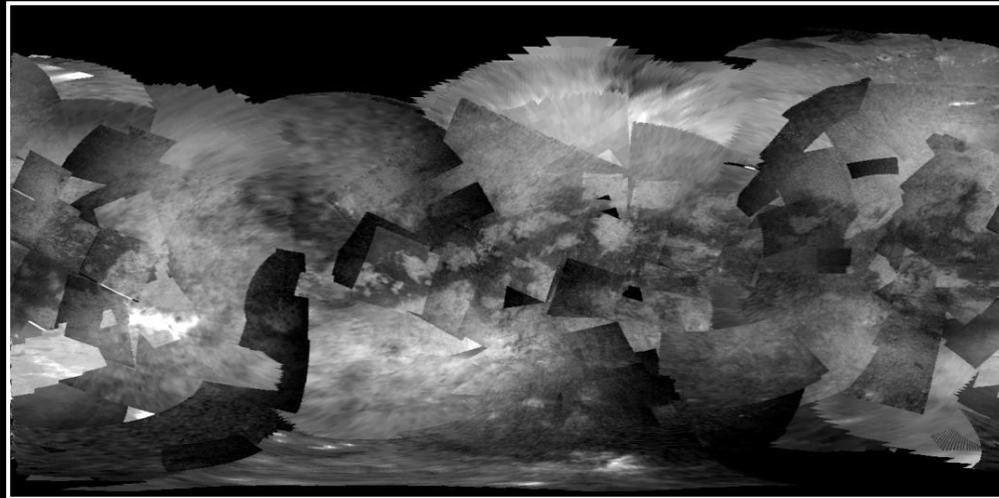
Images hyperspectrales **MAIS** : absorption du signal par l'atmosphère (méthane) + diffusion par les aérosols



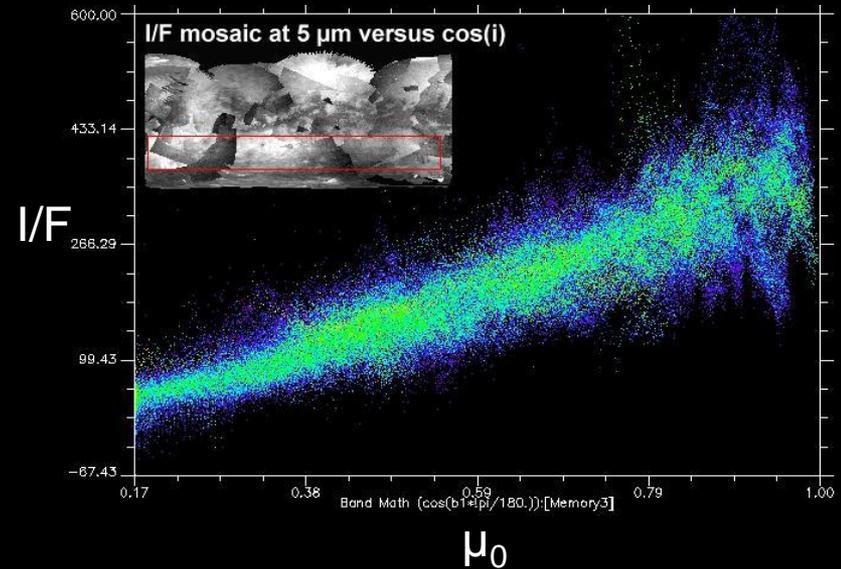
+ **SURVOLS** : géométrie d'acquisition varie énormément d'un survol à l'autre → frontières entre chaque cube d'une mosaïque

Correction de la photométrie de surface à 5 μm

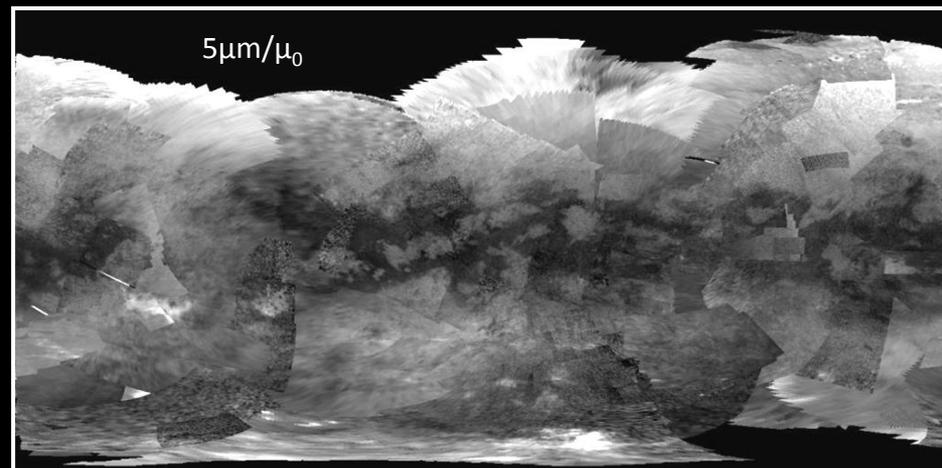
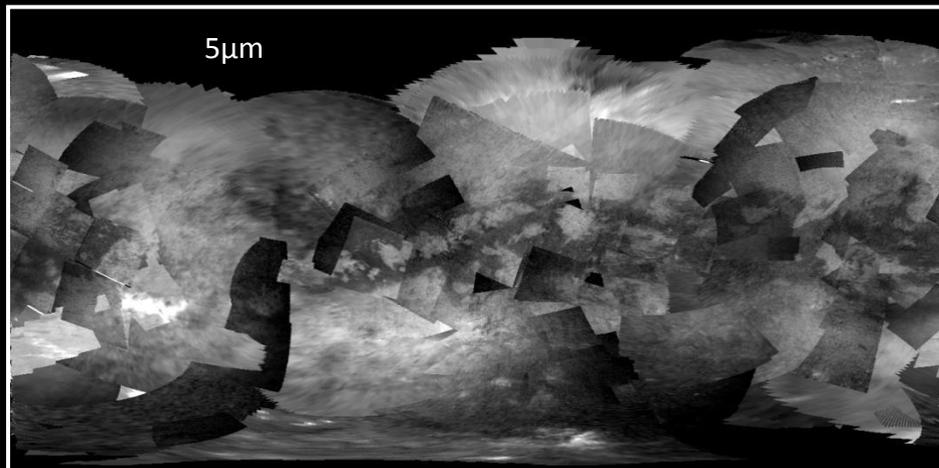
En global : Le I/F semble très corrélé au cosinus de l'incidence μ_0 (surface de type lambertienne)



5 μm brute



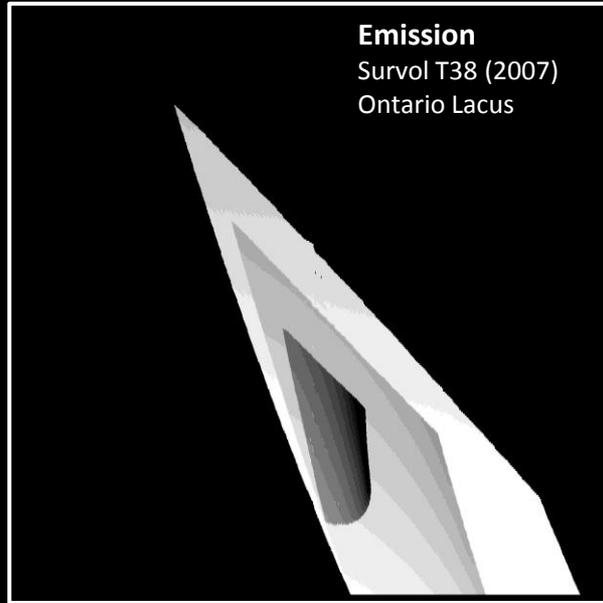
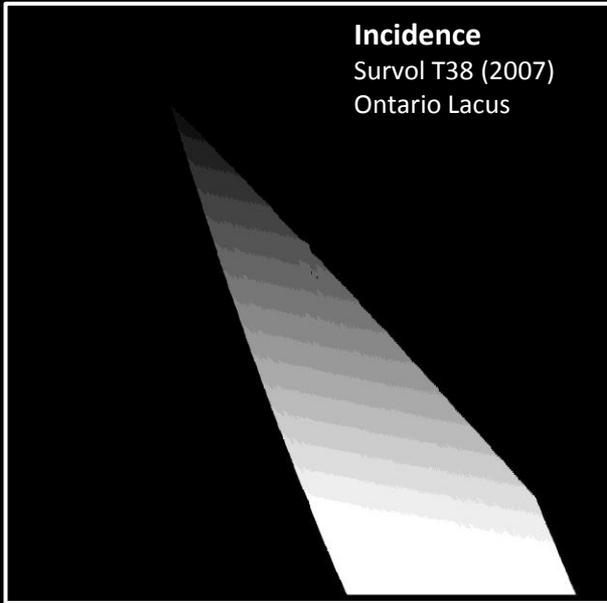
Application de la correction photométrique globale de 1^{er} ordre à 5 μm [Le Mouélic et al., submitted to PSS]



Correction de la photométrie de surface à 5 μm

En local : incidence continue (pas de « coutures »), phase presque constante (fonction de phase négligeable)

label du cube	incidence	émission	phase	km/pixel	altitude (km)	Temps exp. (ms)	Mode
VIMS T38 (March 2007)							
CM_1575507639_1	60 - 73	73 - 89	41 - 42	1.7 - 2.2	6648	180	HiRes 64 × 32
CM_1575507241_1	62 - 68	69 - 79	39 - 40	1.1 - 1.6	4225	180	HiRes 64 × 32
CM_1575506843_1	64 - 66	45 - 69	38 - 42	0.5 - 1	2012	180	HiRes 64 × 32



APPROXIMATION :

Loi de type Lommel-Seeliger :

$$w = \frac{I}{F}(i, e, g) \frac{4(\mu_0 + \mu)}{P(g)\mu_0}$$

Avec:

I/F : luminance VIMS/flux solaire

w : albédo de diffusion simple

i, e, g : incidence, émission, phase

$\mu = \cos e$

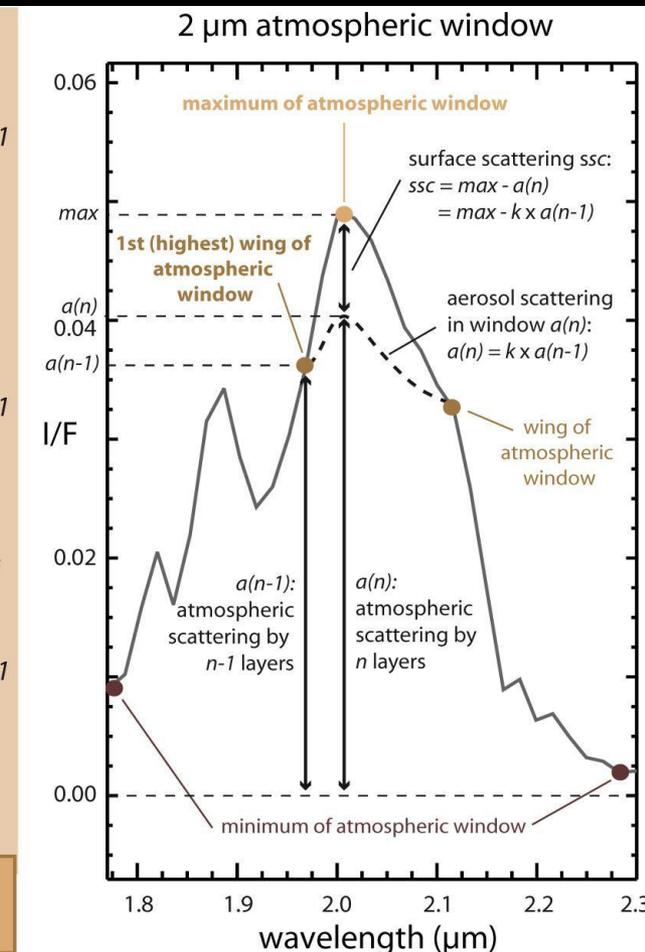
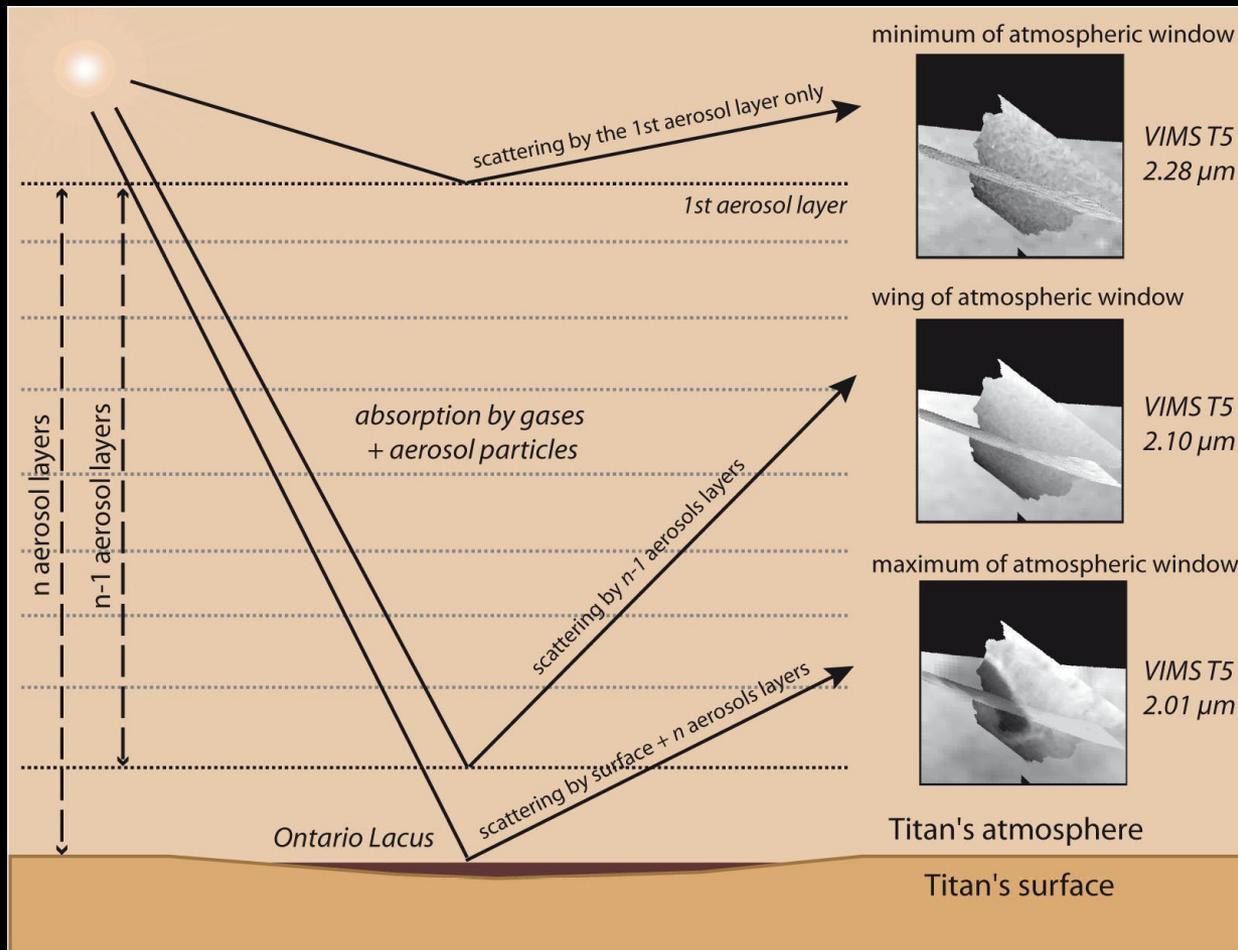
$\mu_0 = \cos i$

$P(g)$: fonction de phase

Correction empirique de la diffusion atmosphérique

Hypothèses:

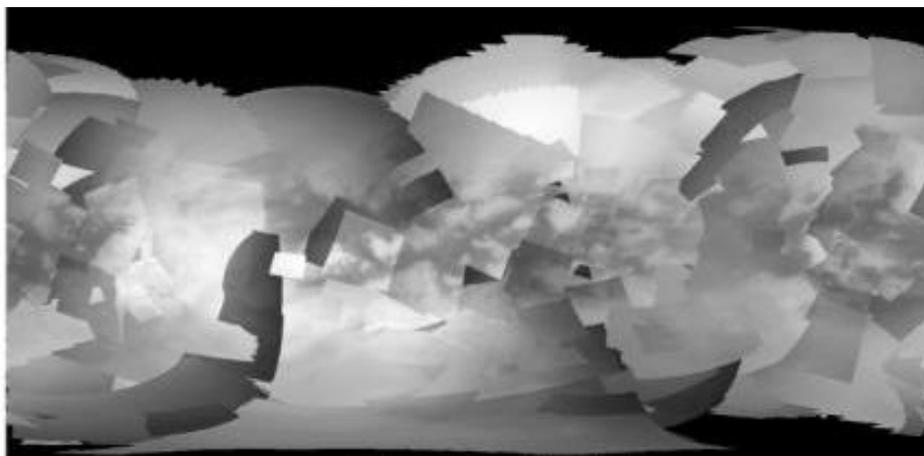
- Diffusion simple → pas d'interactions rayonnement/atmosphère/surface
- Ailes des fenêtres atmosphériques ~ la totalité de la colonne de diffusion atmosphérique (colonne d'aérosols)
- Absorption négligeable au centre des fenêtres atmosphériques



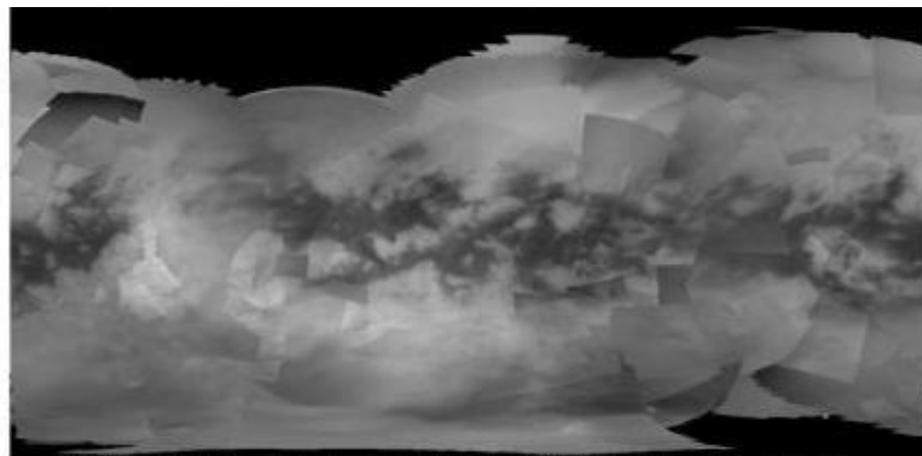
Correction empirique de la diffusion atmosphérique

Exemples de correction atmosphérique + photométrique de surface à 1.08 μm et 1.27 μm
(très affectées par la diffusion atmosphérique)

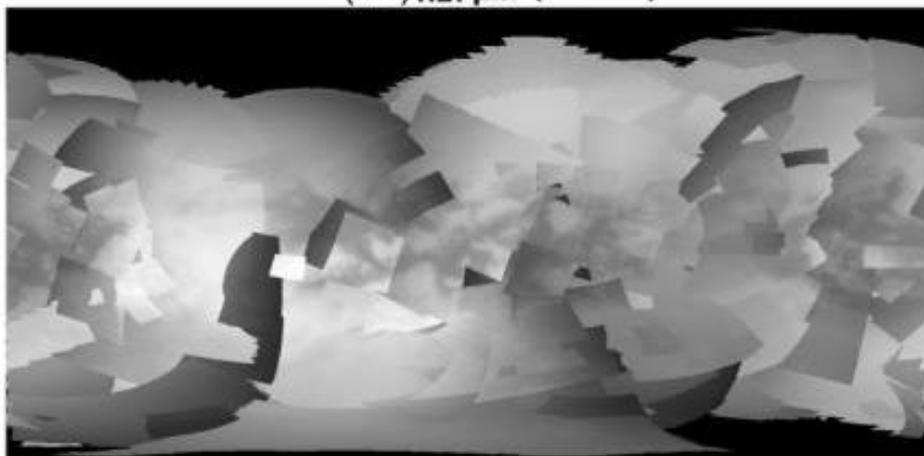
EN GLOBAL: cartographie globale de la surface de Titan



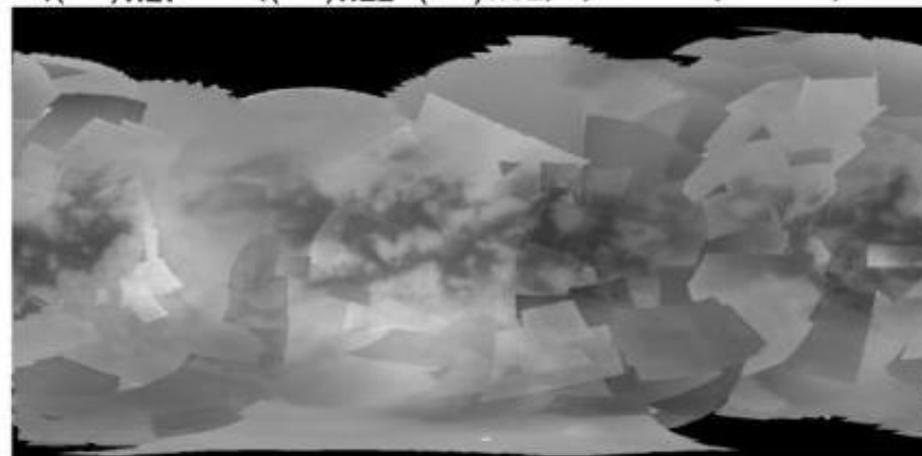
$(I/F)_{1.27\mu\text{m}}$ (0 - 0.25)



$((I/F)_{1.27} - 1.5 \times ((I/F)_{1.22} + (I/F)_{1.32}) / 2) / \cos i$ (0 - 0.25)



$(I/F)_{1.08\mu\text{m}}$ (0 - 0.28)

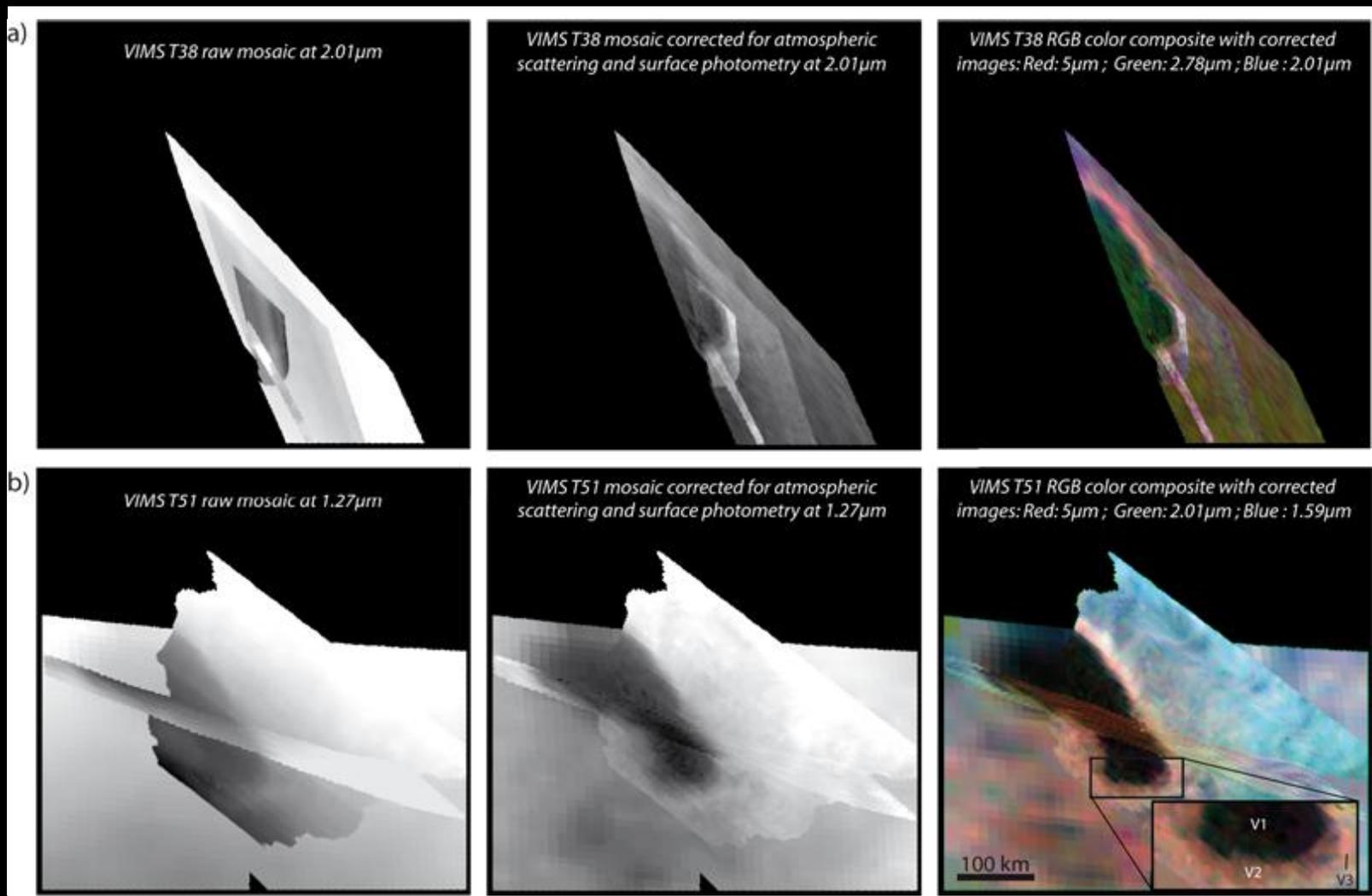


$((I/F)_{1.08} - 1.15 \times ((I/F)_{1.03} + (I/F)_{1.13}) / 2) / \cos i$ (0 - 0.23)

Correction empirique de la diffusion atmosphérique

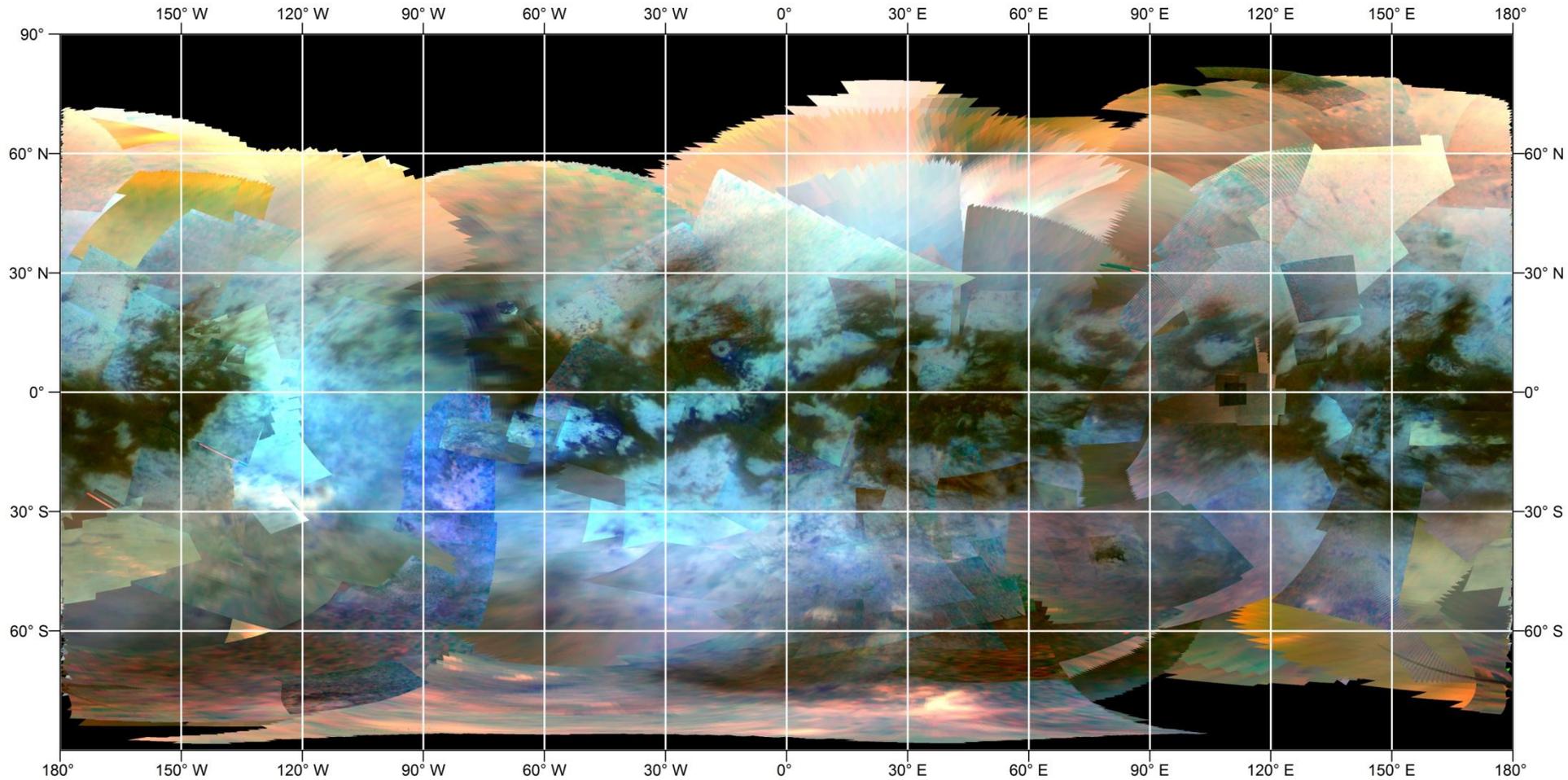
Exemples de correction atmosphérique + photométrie de surface à 1.27 μm et 2.01 μm
(très affectées par la diffusion atmosphérique)

EN LOCAL: Ontario Lacus (72°S, 180°E)



La géologie de Titan

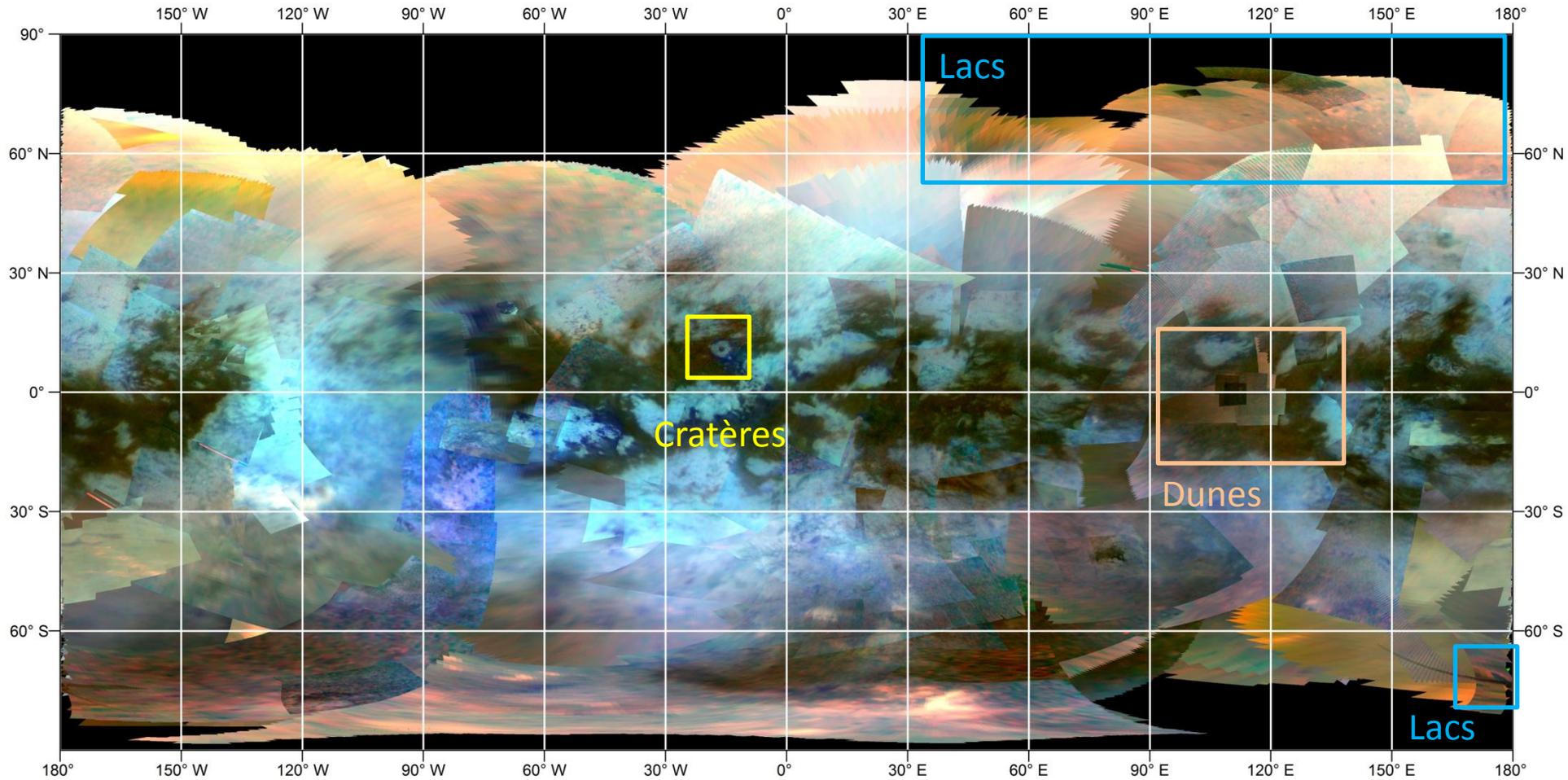
La surface de Titan, vue dans l'infrarouge par VIMS
(après corrections atmosphérique et photométrique)



R: 5 μm ; G: 2.01 μm ; B: 1.27 μm

La géologie de Titan : objets géologiques

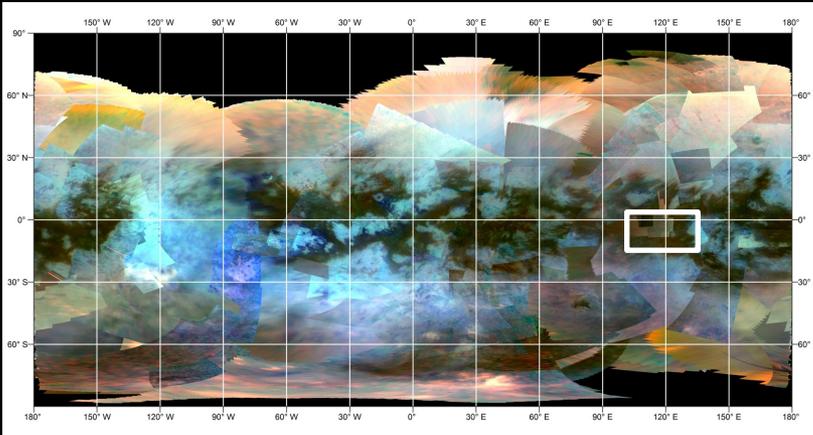
La surface de Titan, vue dans l'infrarouge par VIMS
(après corrections atmosphérique et photométrique)



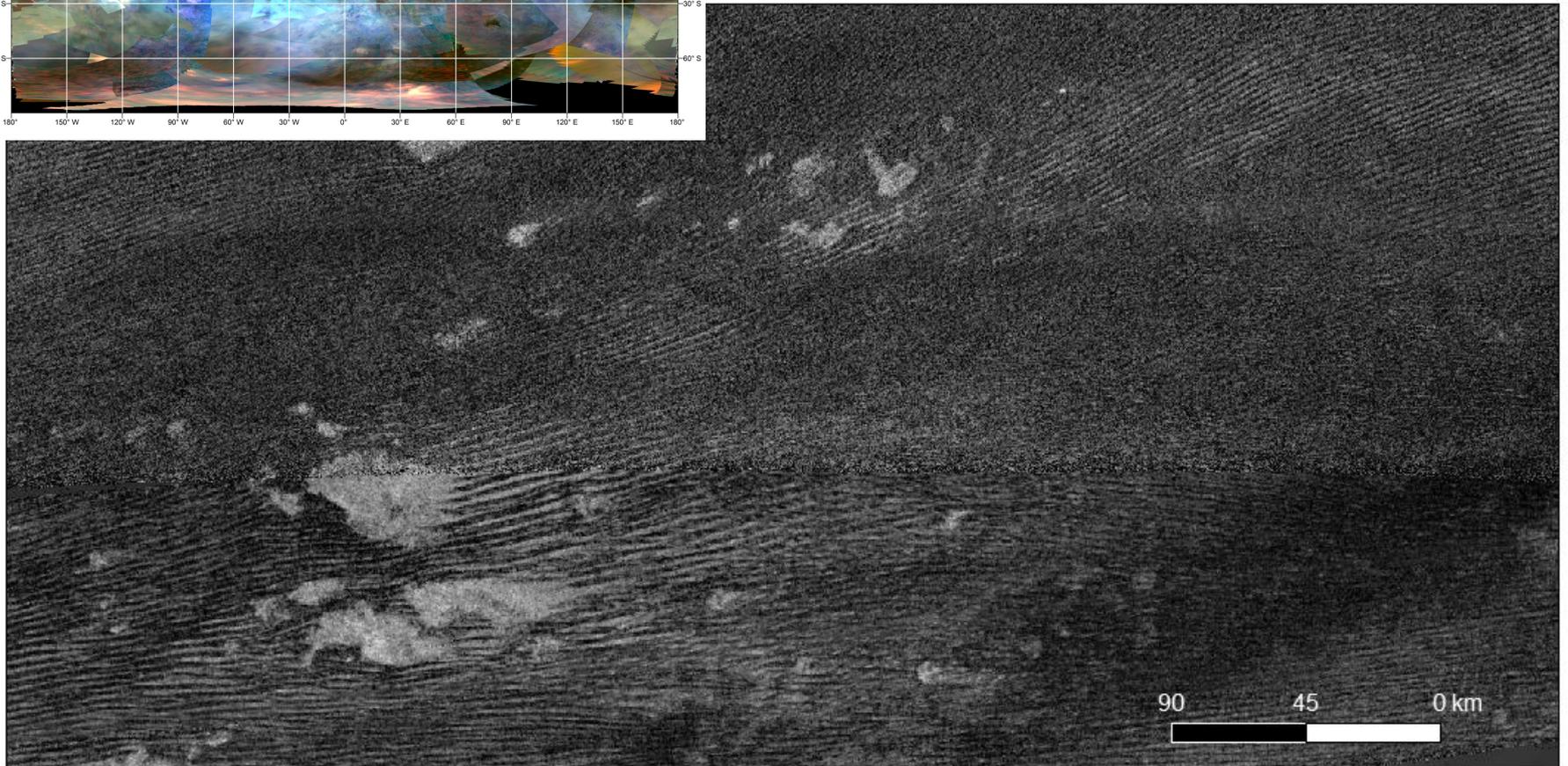
R: 5 μm ; G: 2.01 μm ; B: 1.27 μm

La géologie de Titan : les champs de dunes équatoriales

Unités VIMS « marrons » : localisées entre 30°N et 30°S, corrélées aux dunes vues par le RADAR

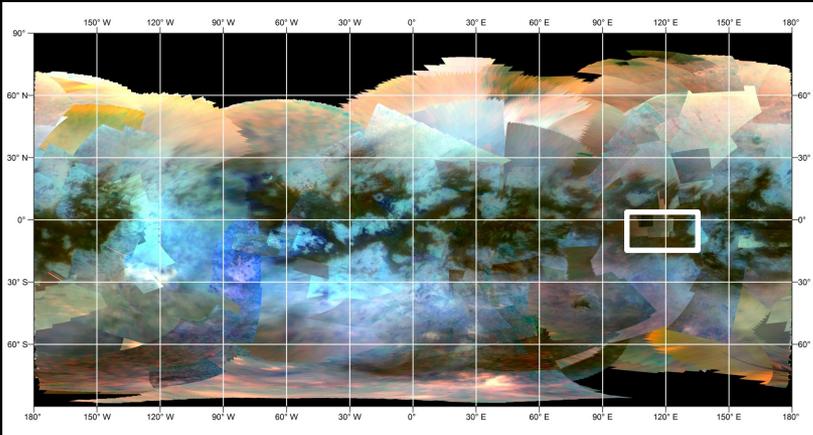


Vastes champs de dunes longitudinales

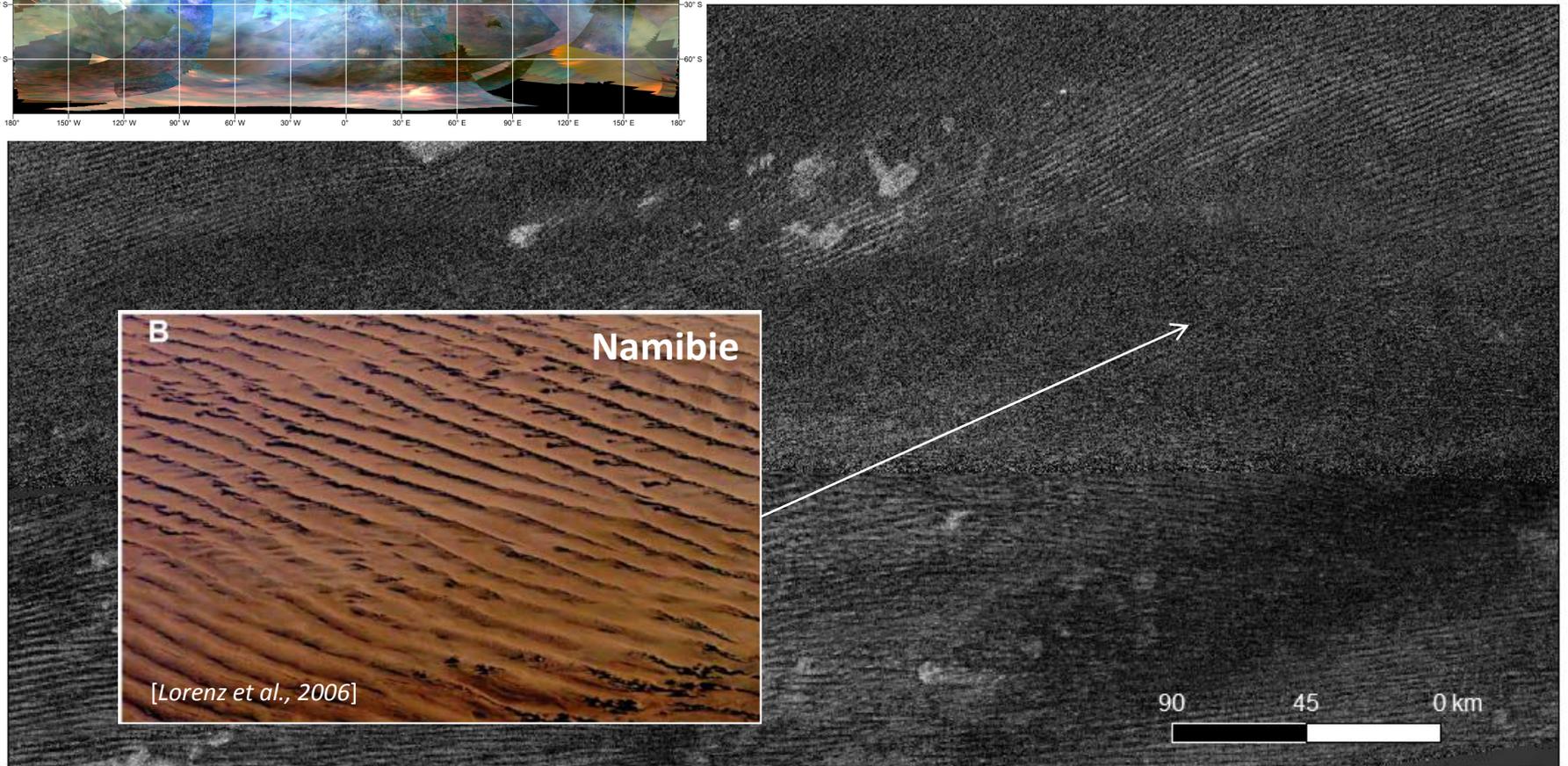


La géologie de Titan : les champs de dunes équatoriales

Unités VIMS « marrons » : localisées entre 30°N et 30°S, corrélées aux dunes vues par le RADAR

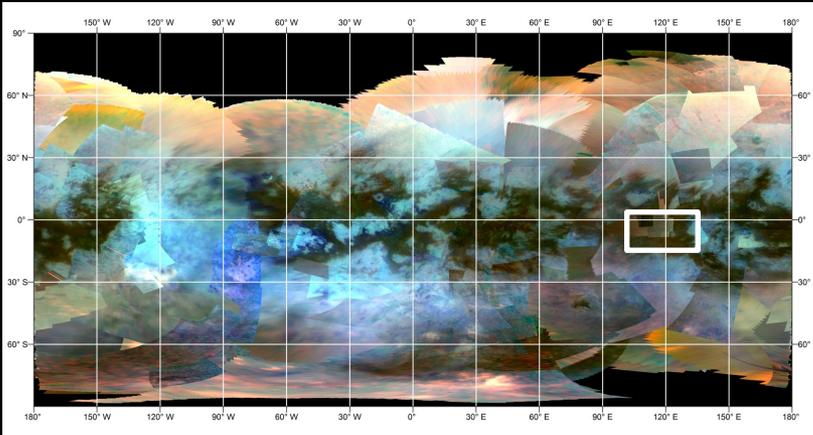


Vastes champs de dunes longitudinales

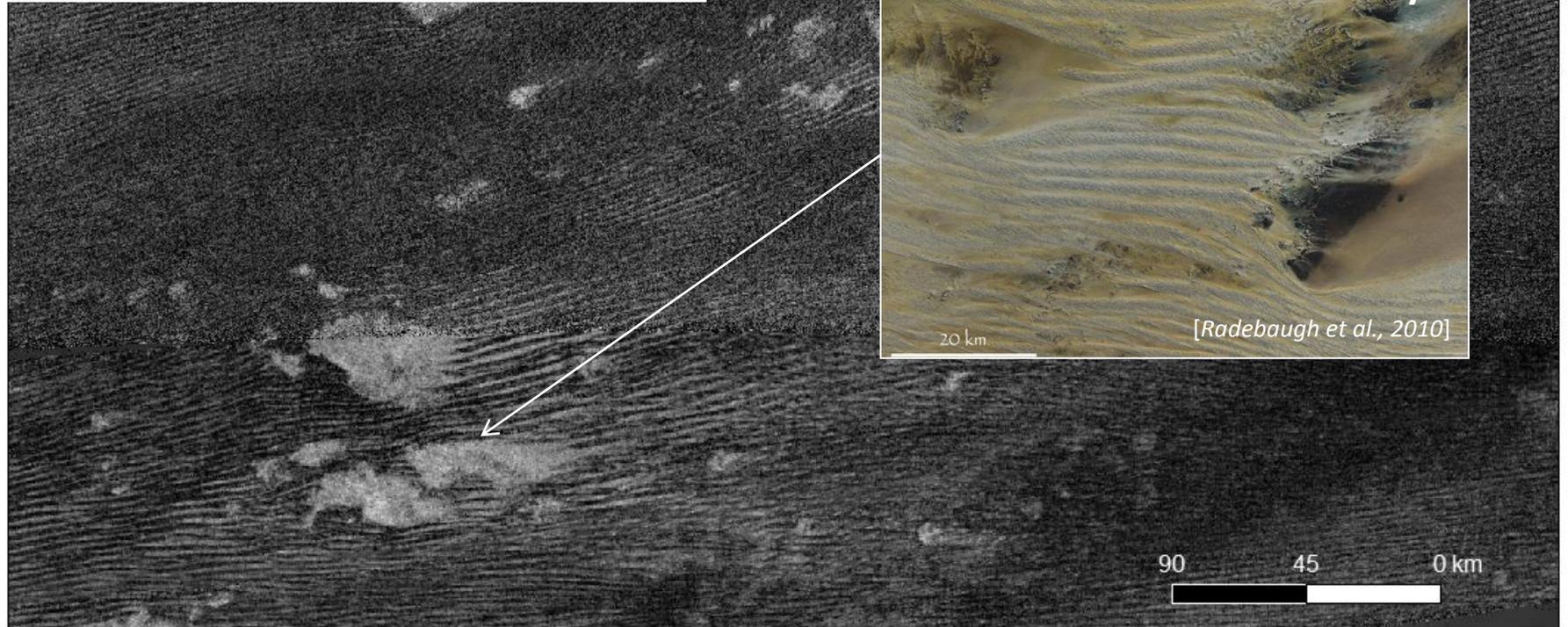


La géologie de Titan : les champs de dunes équatoriales

Unités VIMS « marrons » : localisées entre 30°N et 30°S, corrélées aux dunes vues par le RADAR

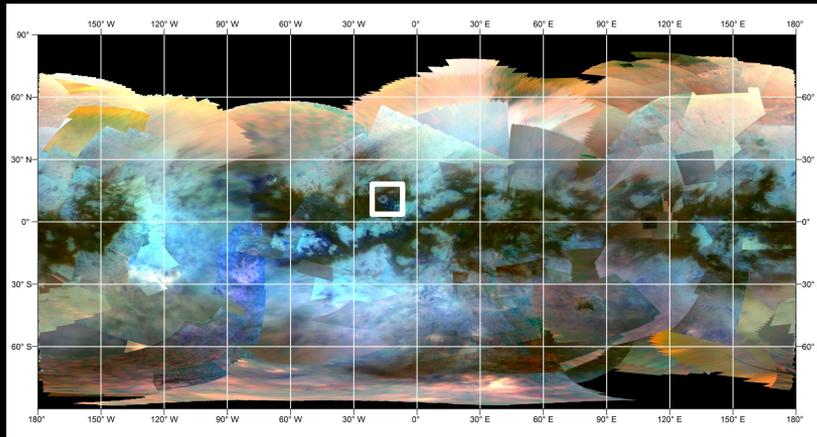


Vastes champs de dunes longitudinales



90 45 0 km

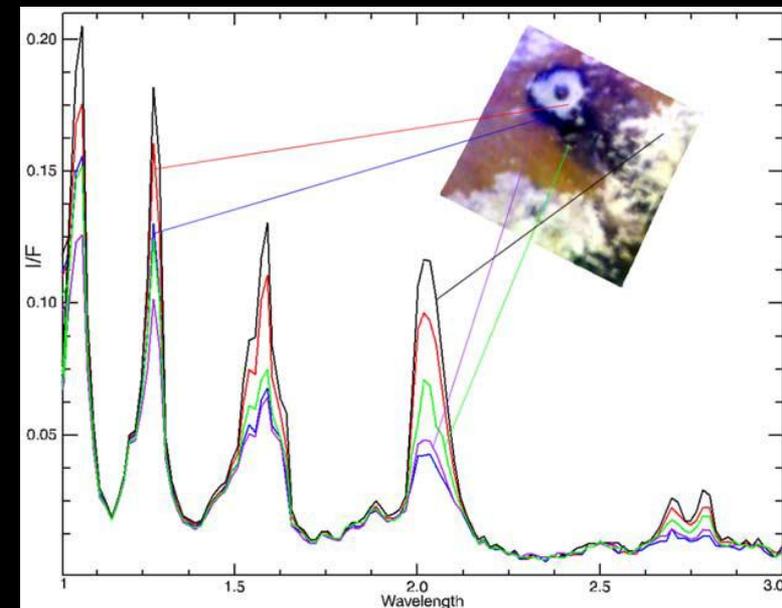
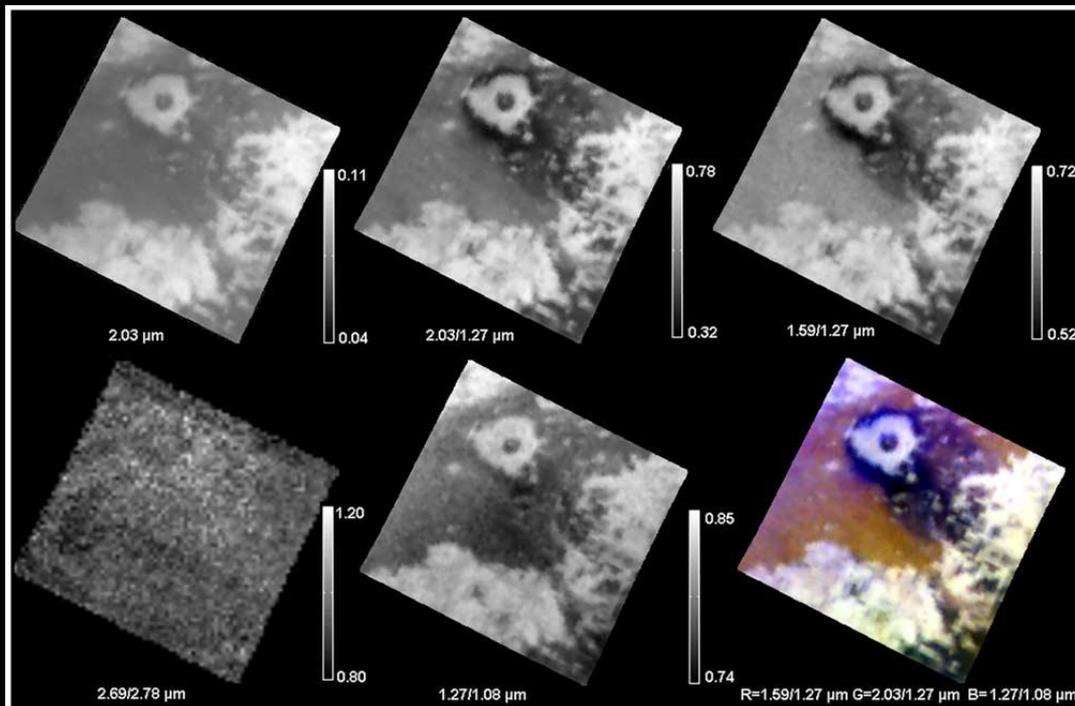
La géologie de Titan : les cratères d'impact



Absorption relative à 1.5 et 2 μm par rapport à 1.08 et 1.27 μm

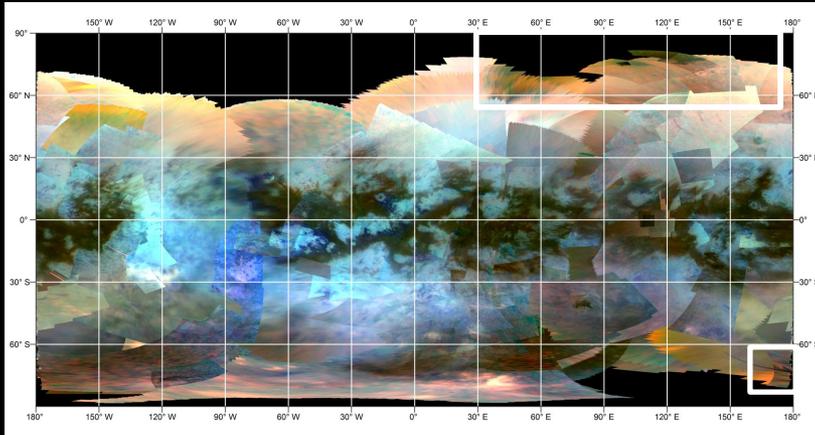
→ Apparaît dans les rapports de bandes (absence dans le rapport 1.27/1.08 μm)

→ Enrichissement en glace d'eau ? Fines particules redéposées après impact ?



La géologie de Titan : les lacs et les mers

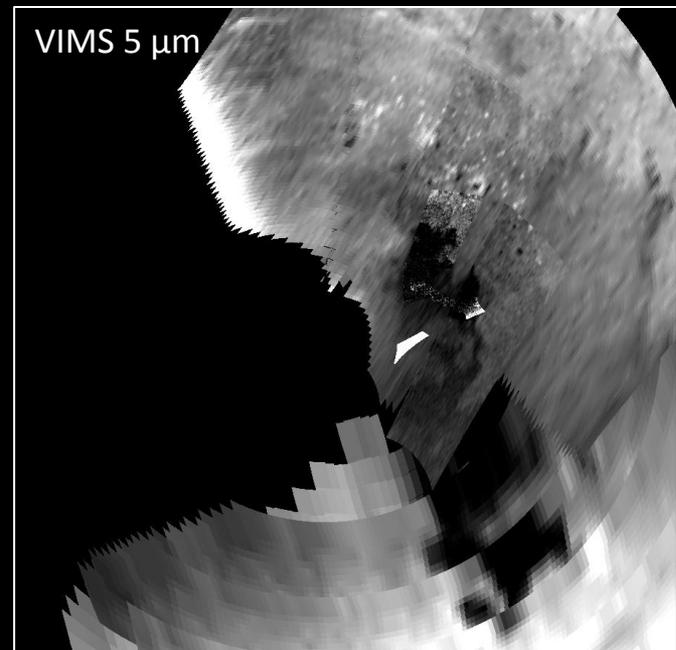
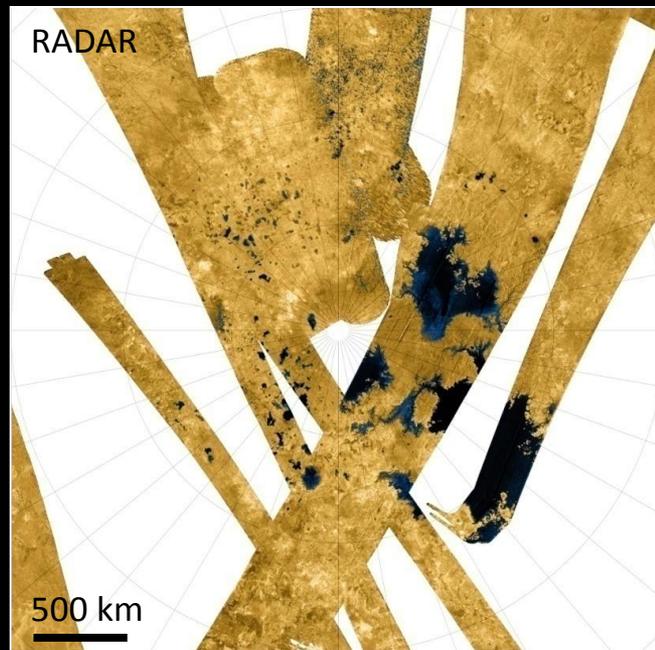
Lacs et mers confinés aux régions polaires (> 60° N et S)



- Sombres au RADAR (lisse)
- Sombres avec VIMS (absorbant)
- Localisés dans des zones planes

→ Potentiellement remplis de méthane/éthane liquide

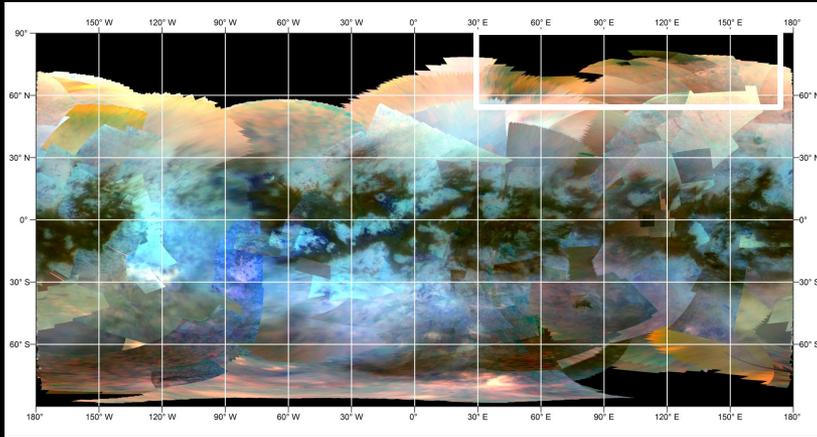
Régions polaires Nord



[Stofan et al., 2007; Lopes et al., 2007]

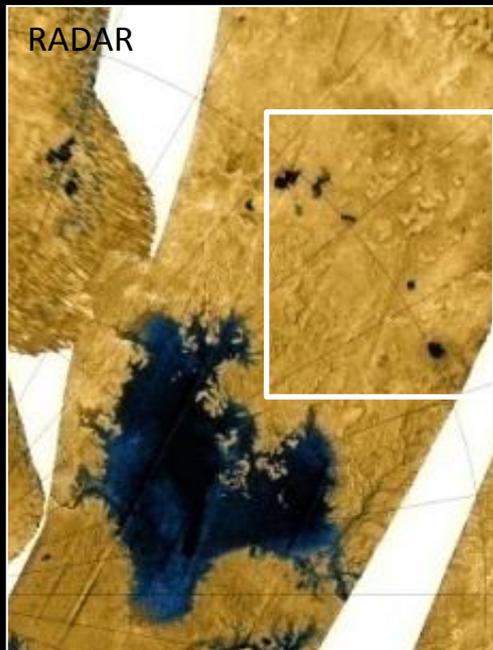
La géologie de Titan : les lacs et les mers

Lacs et mers confinés aux régions polaires (> 60° N et S)



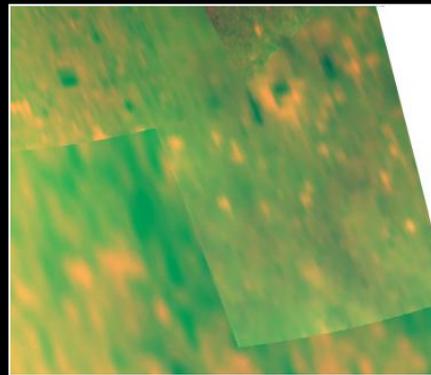
Terrains VIMS brillants autour de dépressions « remplies » et dans des dépressions vides

→ matériaux dissous qui cristallisent pendant l'évaporation ? [Barnes et al., 2011]



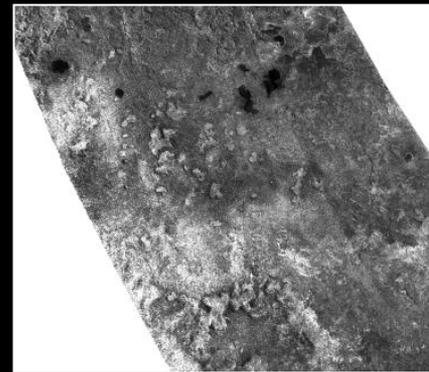
RADAR

VIMS



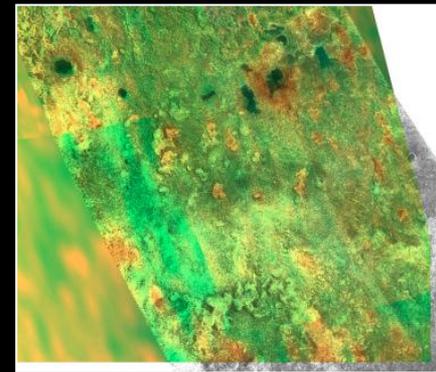
Terrains brillants à 5µm (VIMS)

RADAR



Dépressions brillantes (rugueuses) au RADAR

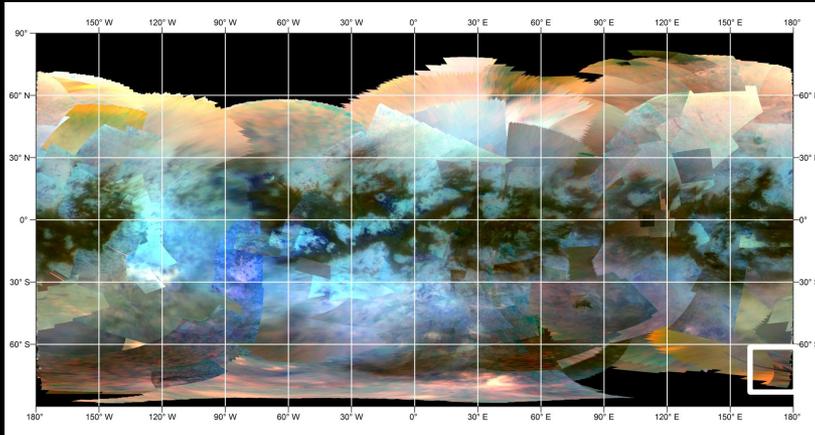
VIMS+RADAR



Corrélations dépressions vides/VIMS 5 µm

La géologie de Titan : les lacs et les mers

Géomorphologie d'Ontario Lacus, le plus grand lac de l'hémisphère sud de Titan [Cornet et al., 2012]



VIMS:

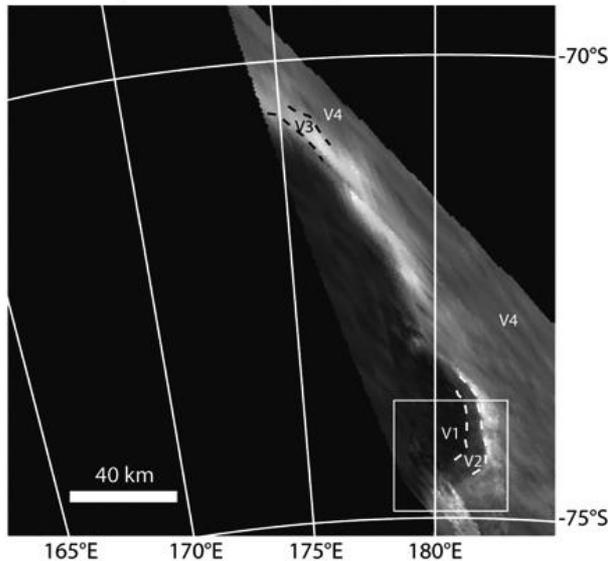
- Sombre avec VIMS : surface absorbante dans l'IR
- Entouré d'un « anneau » sombre en IR
- Bord très brillant à 5 μm à l'Est

RADAR:

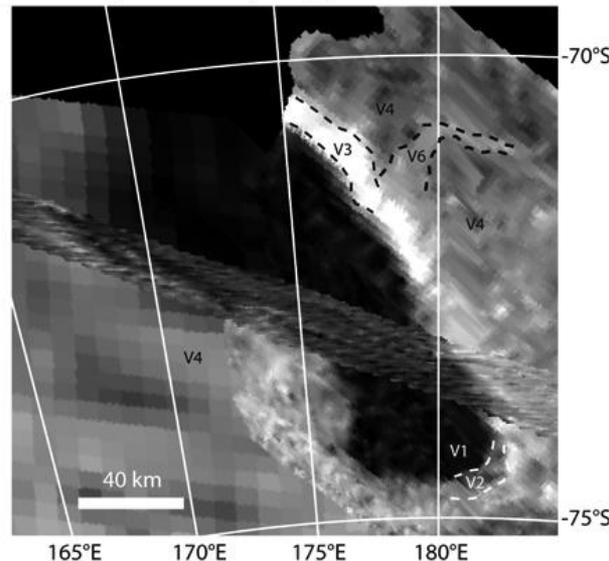
surface sombre (lisse), non uniforme (zones couvertes de liquides, zones exposées ?)

Altimétrie: bassin sédimentaire très plat

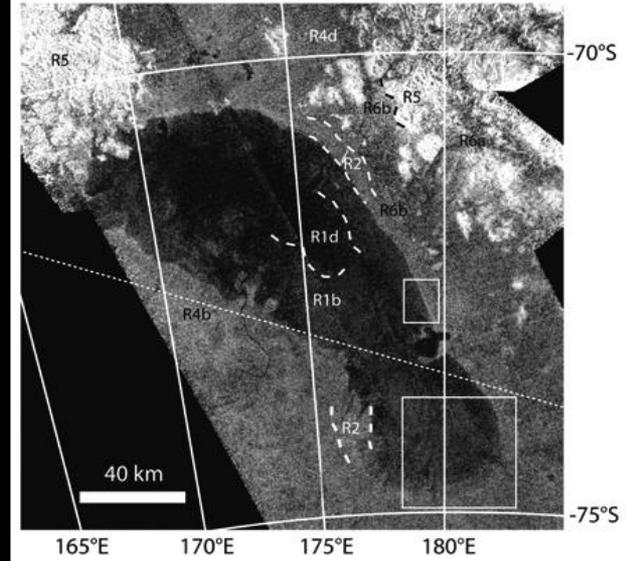
b) VIMS T38 (2007) processed



c) VIMS T51 (2009) processed

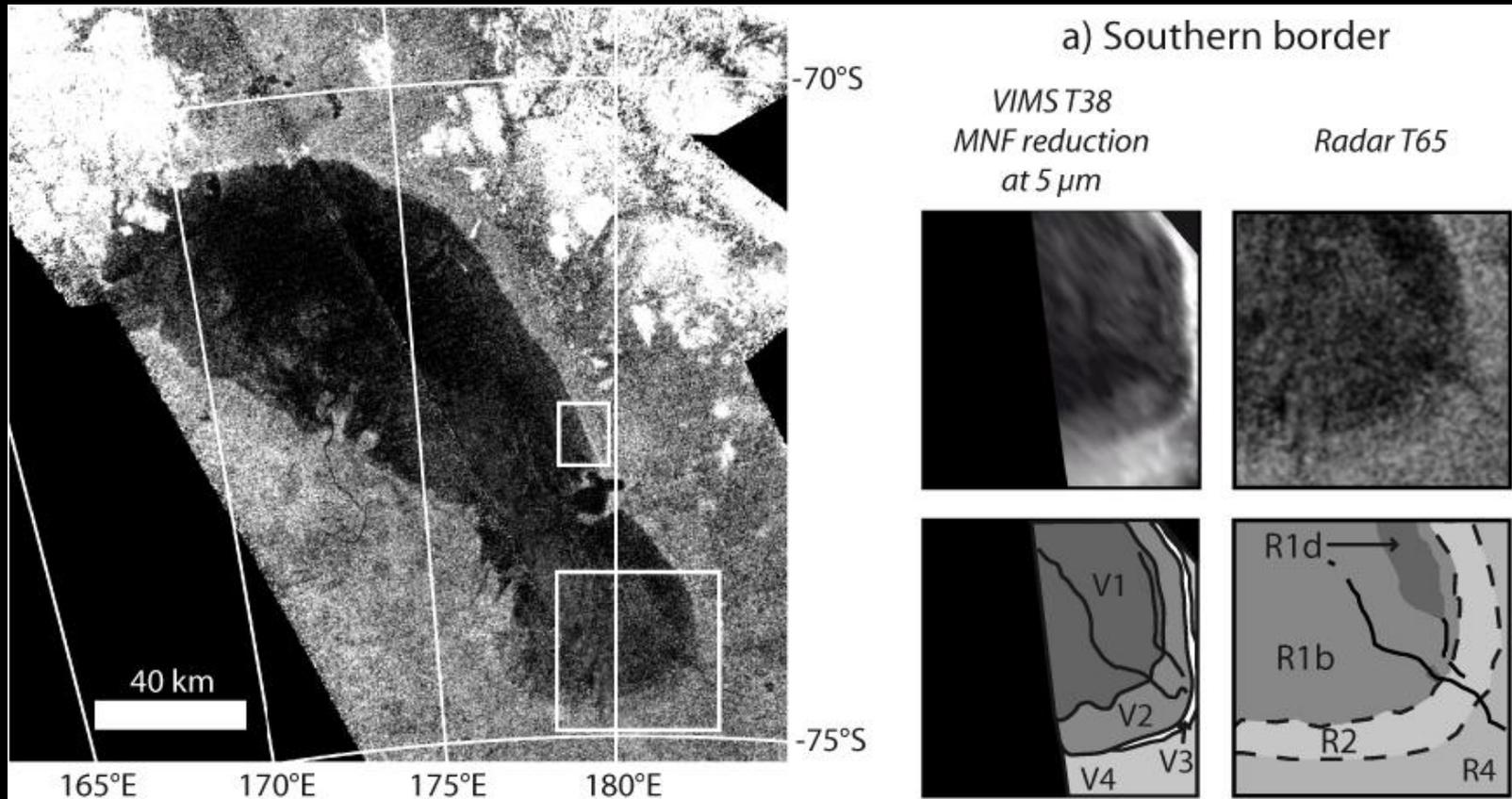


e) RADAR SART65 (2010) processed



La géologie de Titan : les lacs et les mers

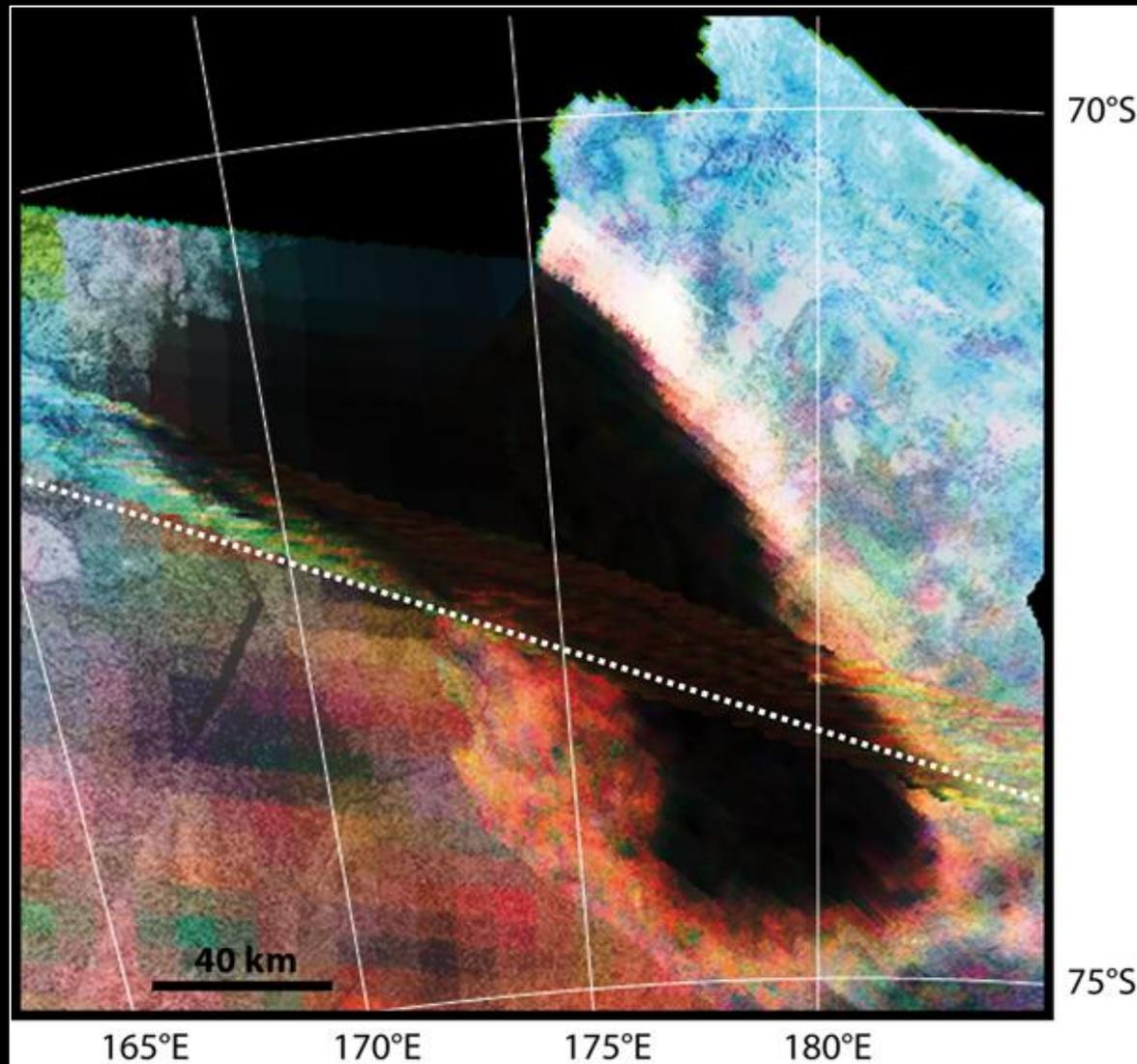
Chenaux de surface sur le fond du lac, vus avec VIMS (2007) et avec le RADAR (2009,2010) dans des zones plus brillantes au RADAR



Dépression topographique partiellement remplie de liquides, le reste de la dépression serait un fond de lac plat et lisse

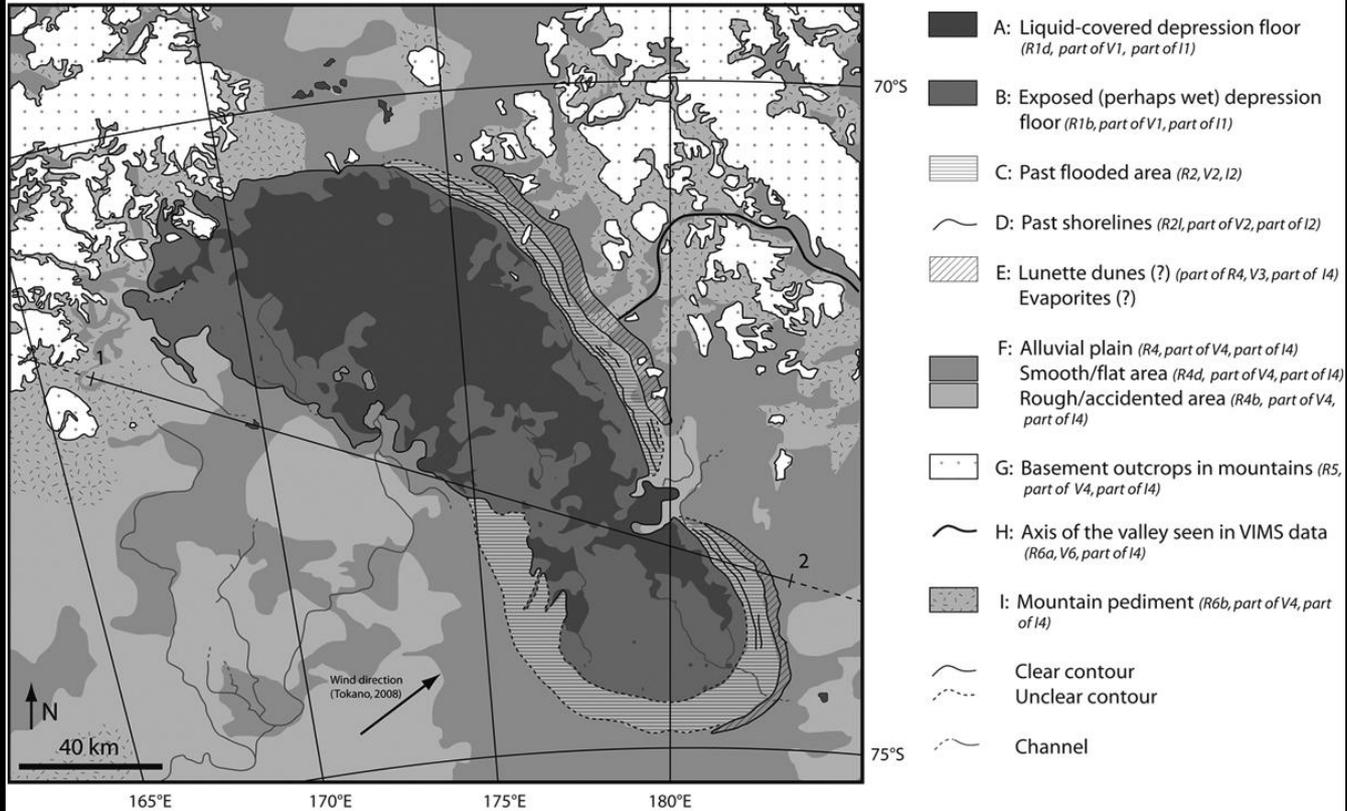
La géologie de Titan : les lacs et les mers

Anneau sombre entourant la partie sud d'Ontario Lacus : zone inondée par le passé ?
Bord brillant à l'est : dépôts évaporitiques ?



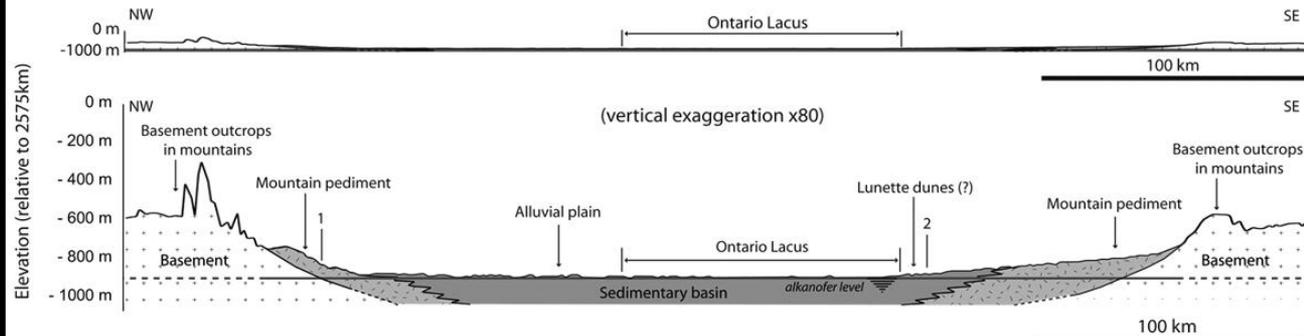
La géologie de Titan : les lacs et les mers

GEOMORPHOLOGICAL MAP



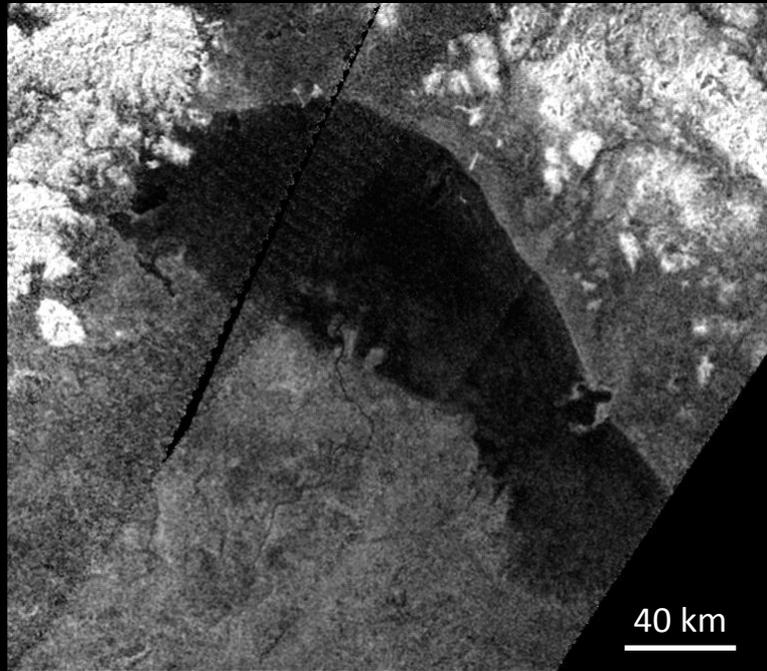
INTERPRETATIVE CROSS-SECTION

(vertical exaggeration x10)



La géologie de Titan : les lacs et les mers

Recherche d'analogues terrestres pour comprendre les processus de formation



Titan



Le Pan d'Etosha (120 km de long, Namibie)

Similitudes de forme: Taille similaire du lac, topographie du bassin sédimentaire similaire
Climat similaire (aride, évaporation > précipitations)

Développement des pans par dissolution de la surface lors d'inondations

→ dissolution responsable de la formation des lacs de Titan ?

→ **possible compte tenu de la chimie de surface de Titan (hydrocarbures solubles dans CH₄)**

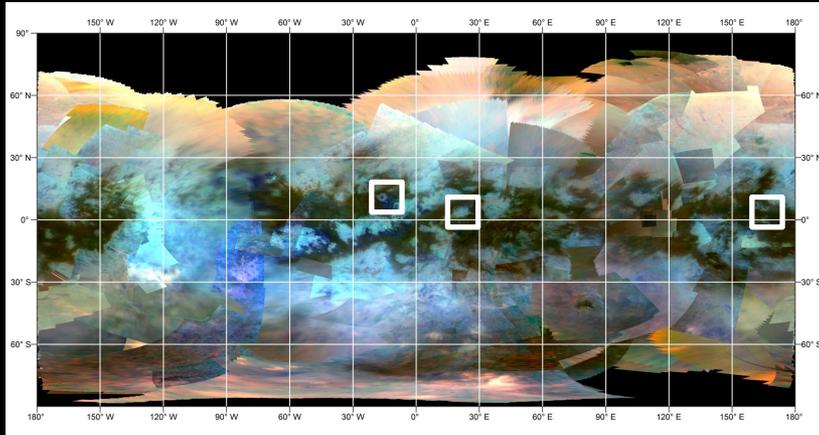
Titan :

Satellite très actif : Climat semi-aride à aride (évaporation > précipitations)

- **Lacs, mers, chenaux fluviatiles composés d'hydrocarbures liquides**
 - formation par dissolution de la surface ?
- **Dunes équatoriales**
 - régime de vents capable de soutenir leur développement
- **Circulation atmosphérique active et visible par Cassini**
 - nuages permanents au Nord en fonction de la saison, nuages occasionnels aux moyennes latitudes
 - tempêtes
- **le couplage VIMS/RADAR permet de réaliser les premières études géologiques de la surface de Titan**

Merci de votre attention

La géologie de Titan : les cratères d'impact

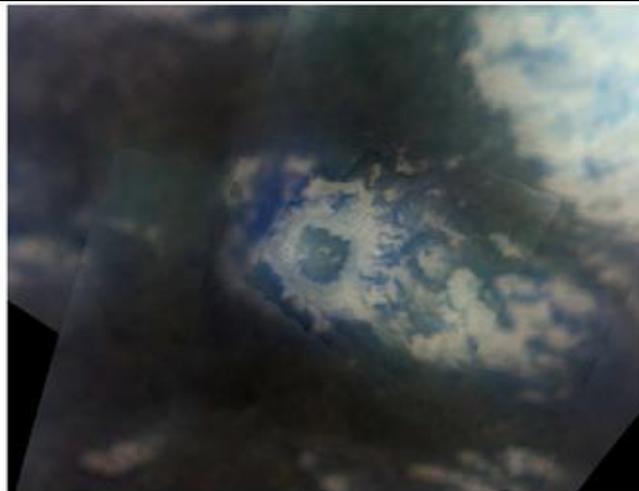


Quelques cratères d'impact détectés sur Titan, dont 3 cratères étudiés par VIMS

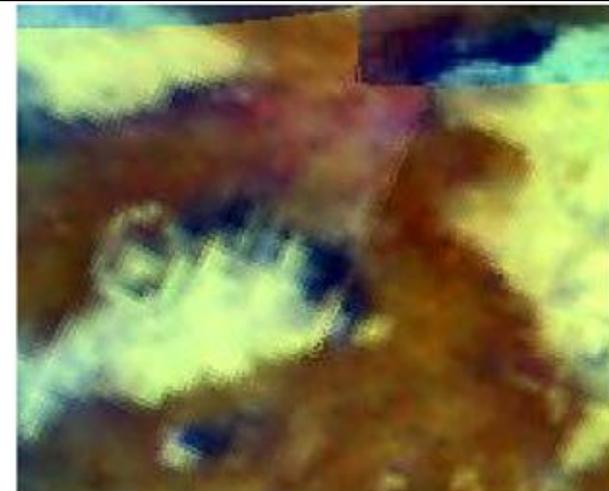
Sinlap



Selk



Paxsi



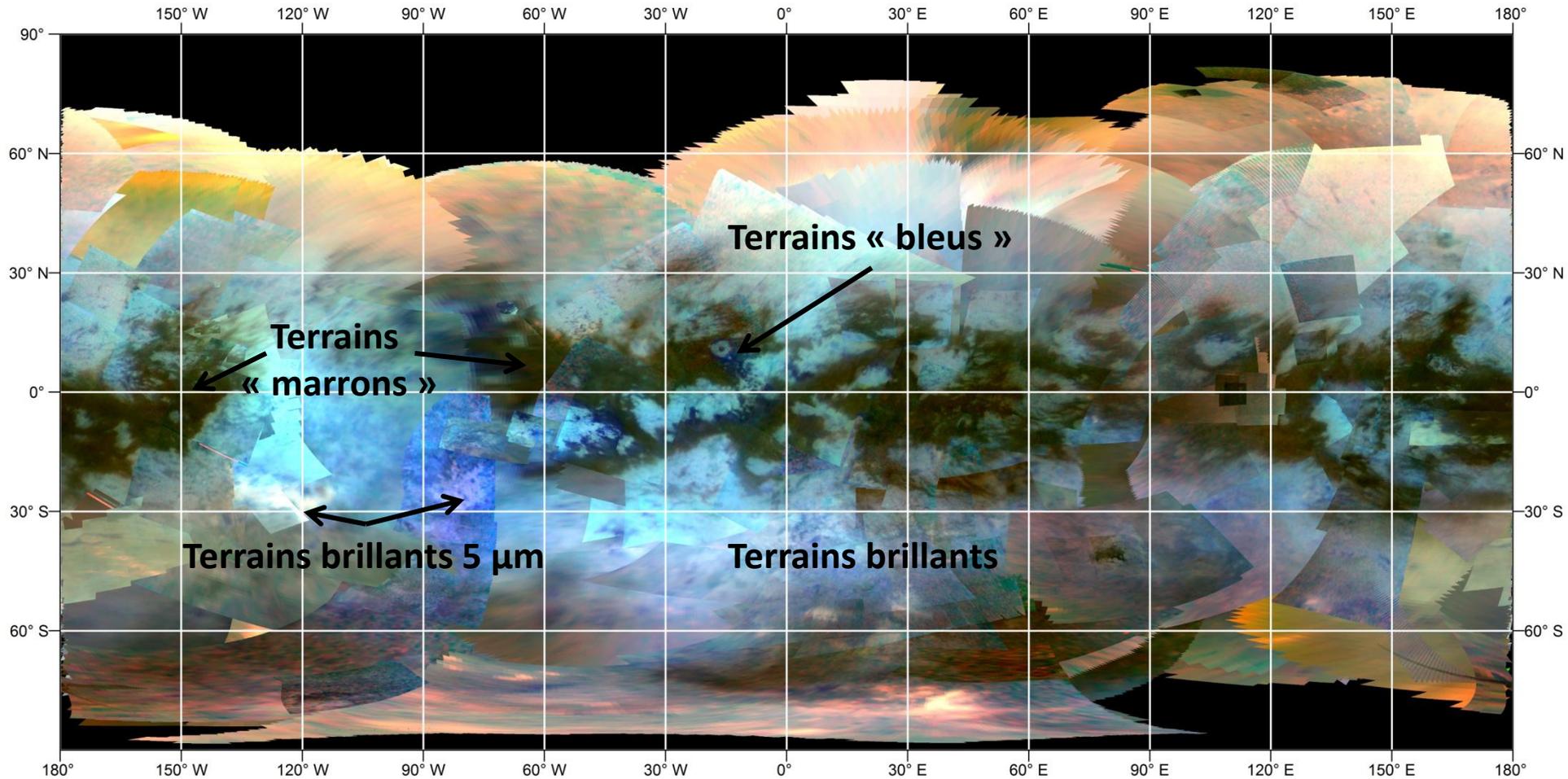
[Le Mouélic et al., 2008]

[Soderblom et al., 2010]

[Buratti et al., 2011]

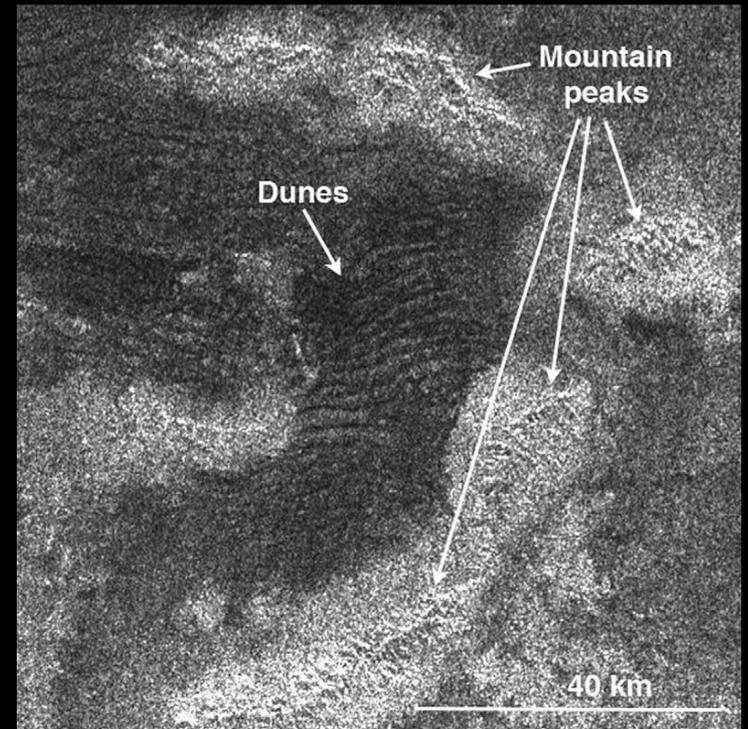
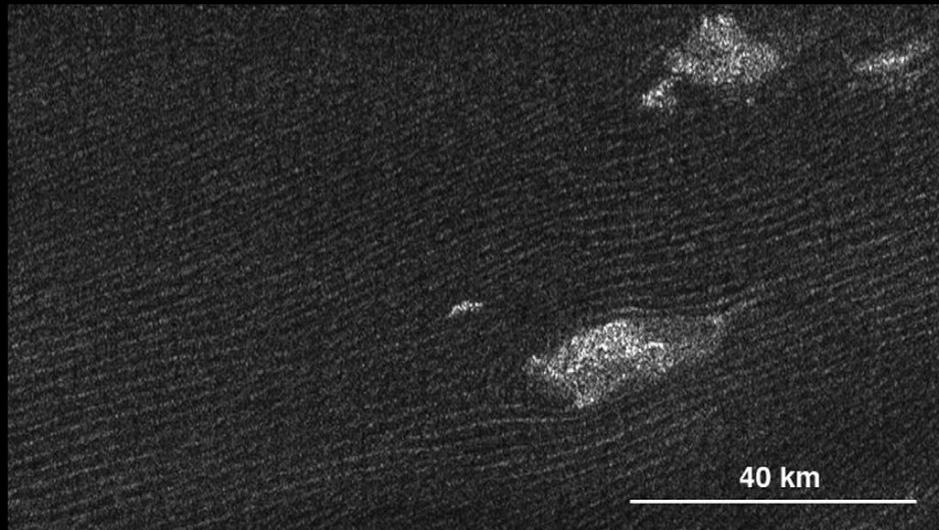
La géologie de Titan : diversité « spectrale »

La surface de Titan, vue dans l'infrarouge par VIMS
(après corrections atmosphérique et photométrique)

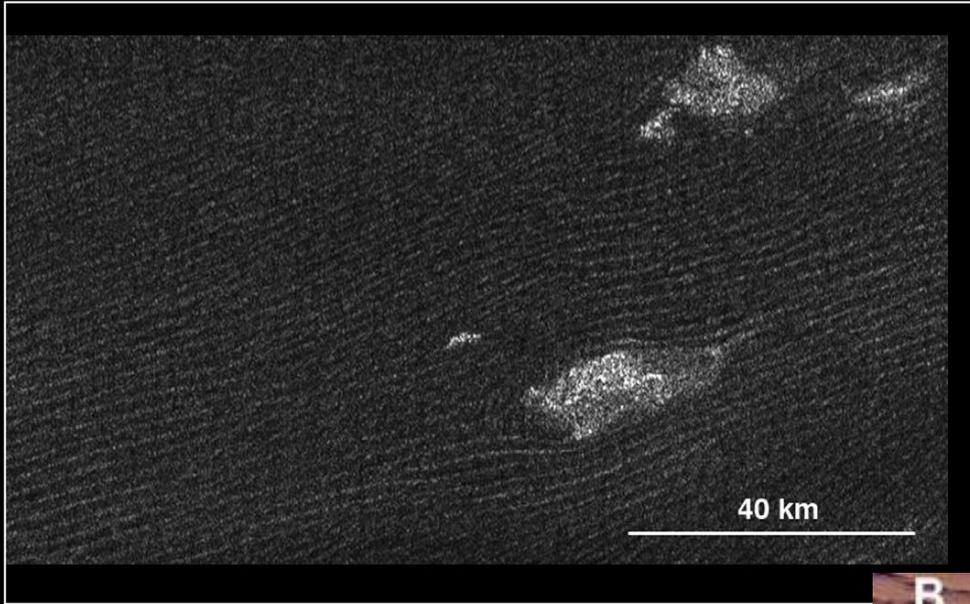


R: 5 μm ; G: 2.01 μm ; B: 1.27 μm

Observation de dunes à l'équateur !



Observation de dunes à l'équateur !



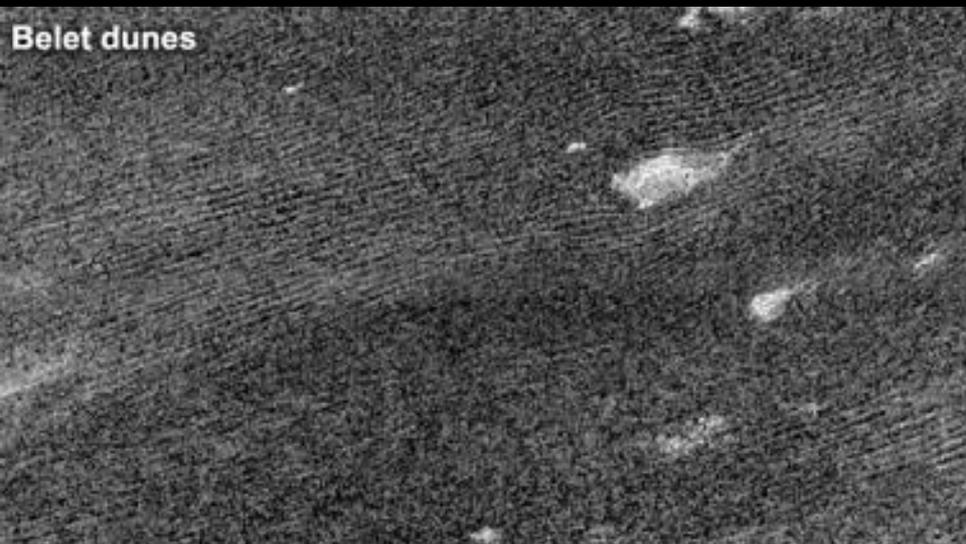
Vastes champs de dunes à l'équateur

Similaires aux champs de dunes dans certains déserts terrestres situés en Namibie, Egypte, Chine...

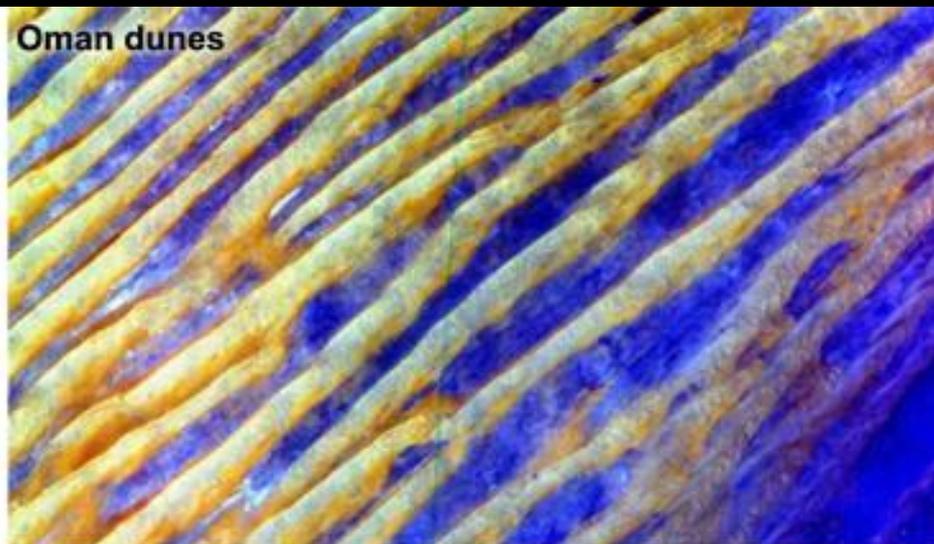
→ Contraintes sur les régimes de vents titaniens → véritable météorologie



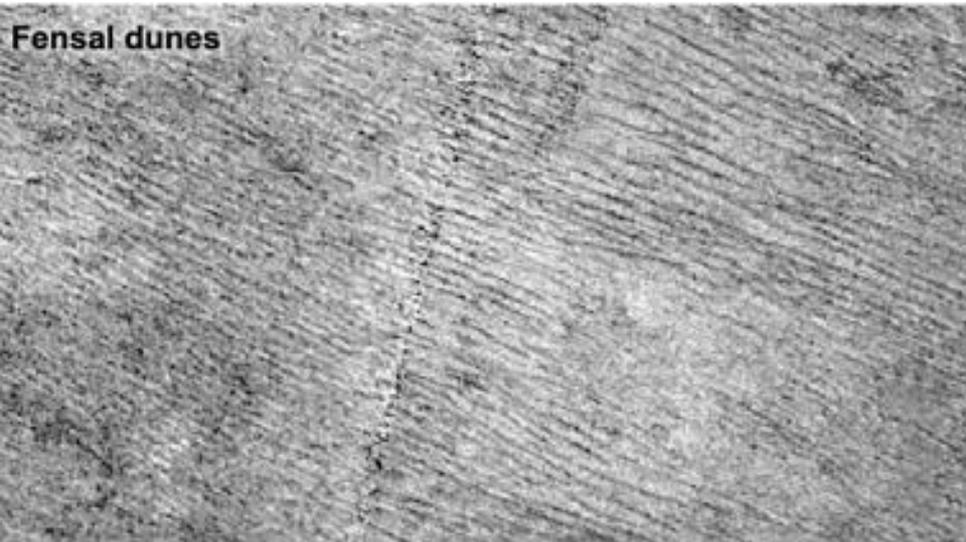
Belet dunes



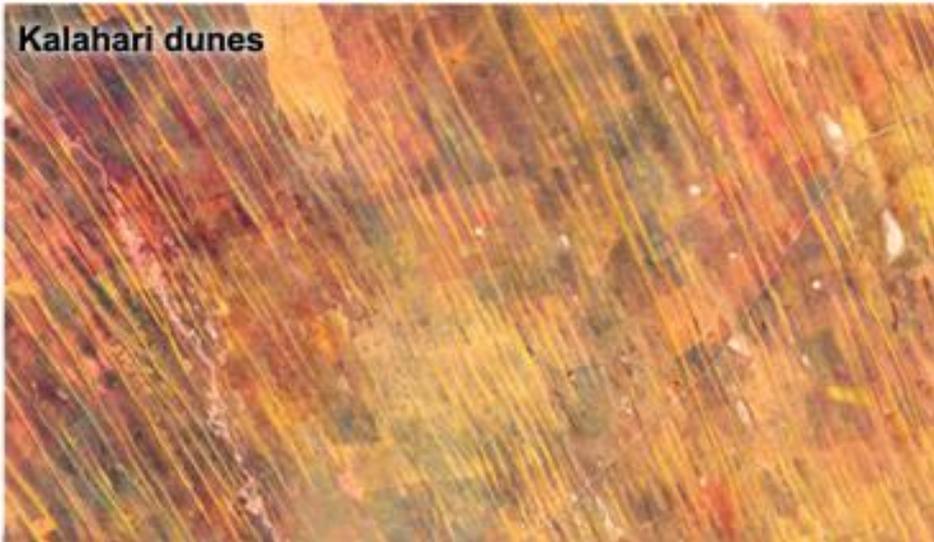
Oman dunes



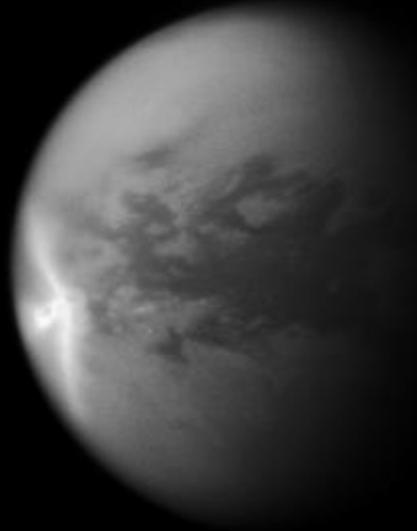
Fensal dunes



Kalahari dunes

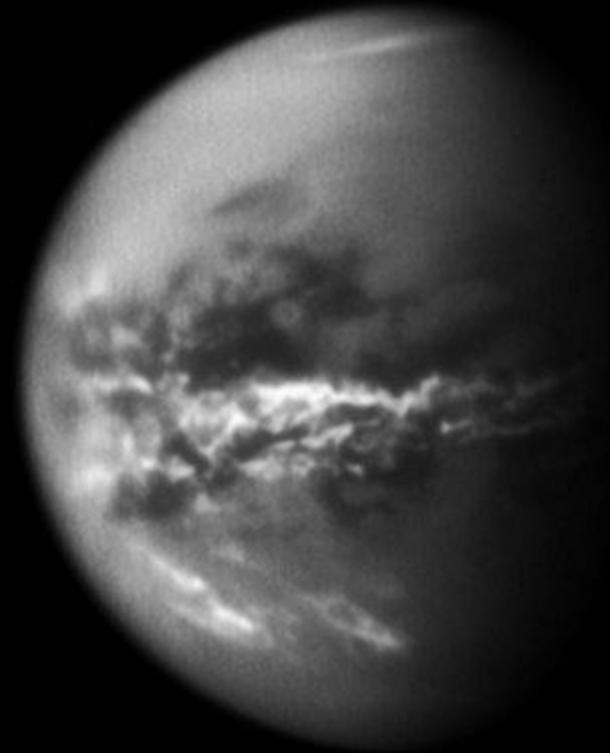


Météorologie bien présente → circulation atmosphérique (nuages)



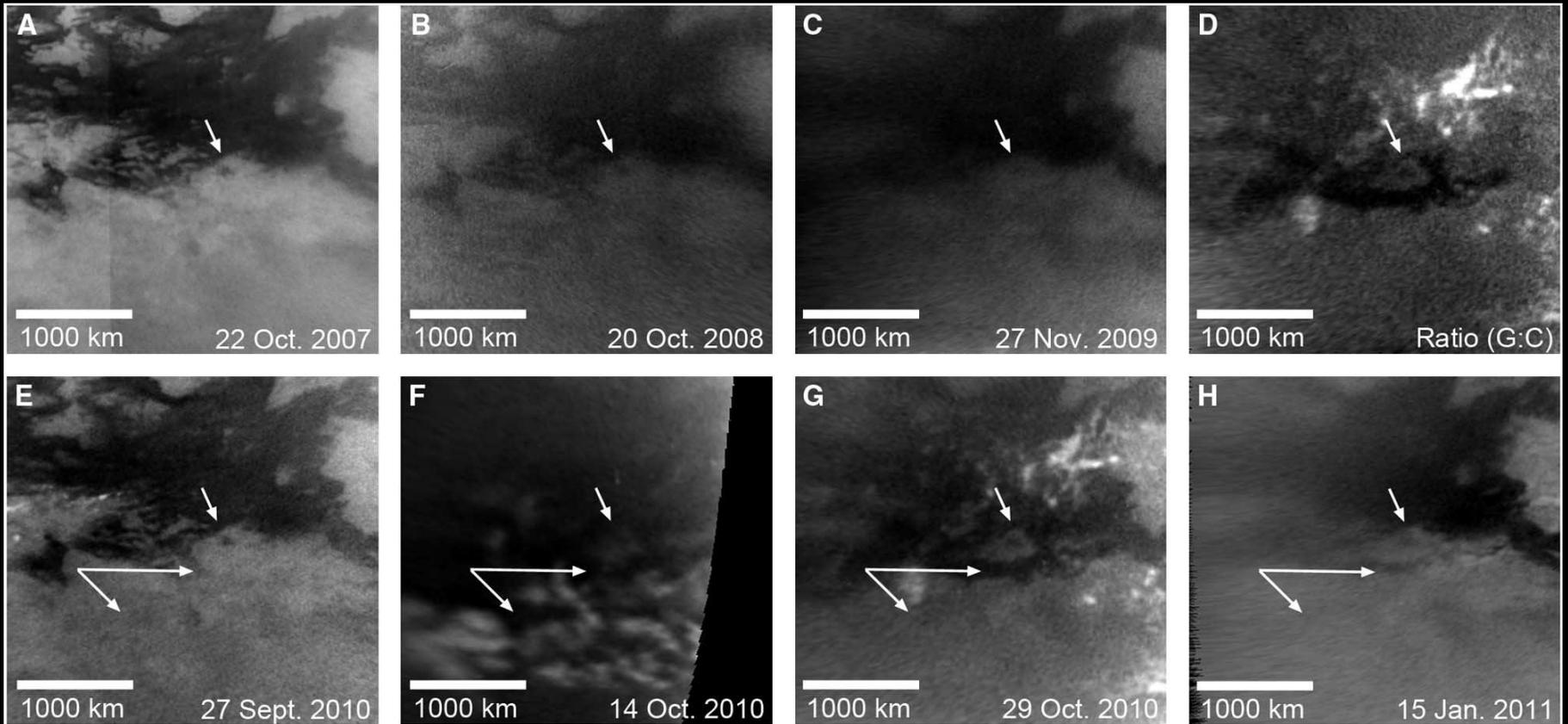
27 septembre 2010

Évènements plus occasionnels aux moyennes latitudes



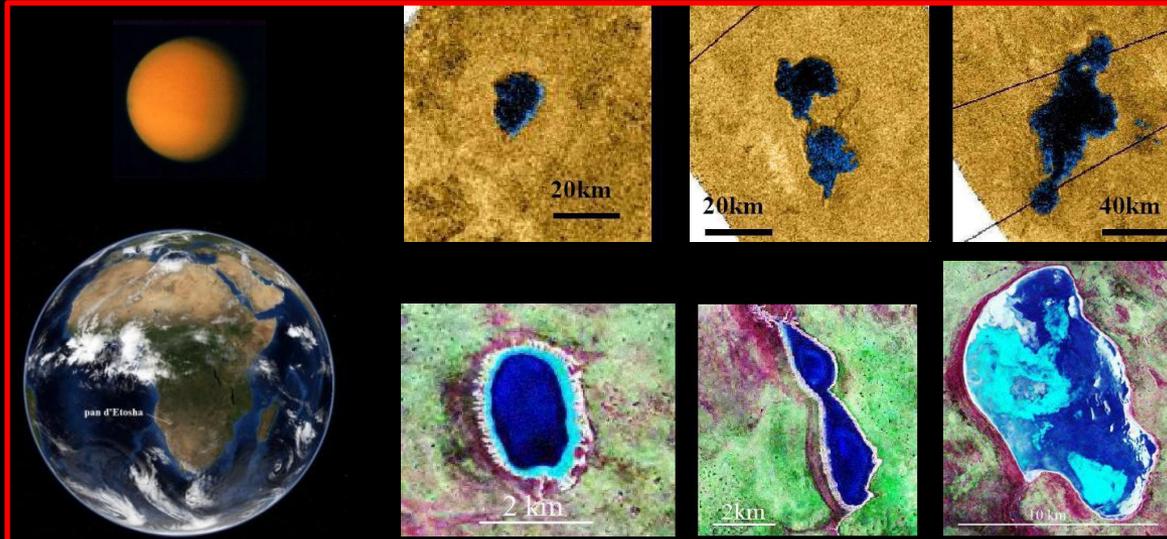
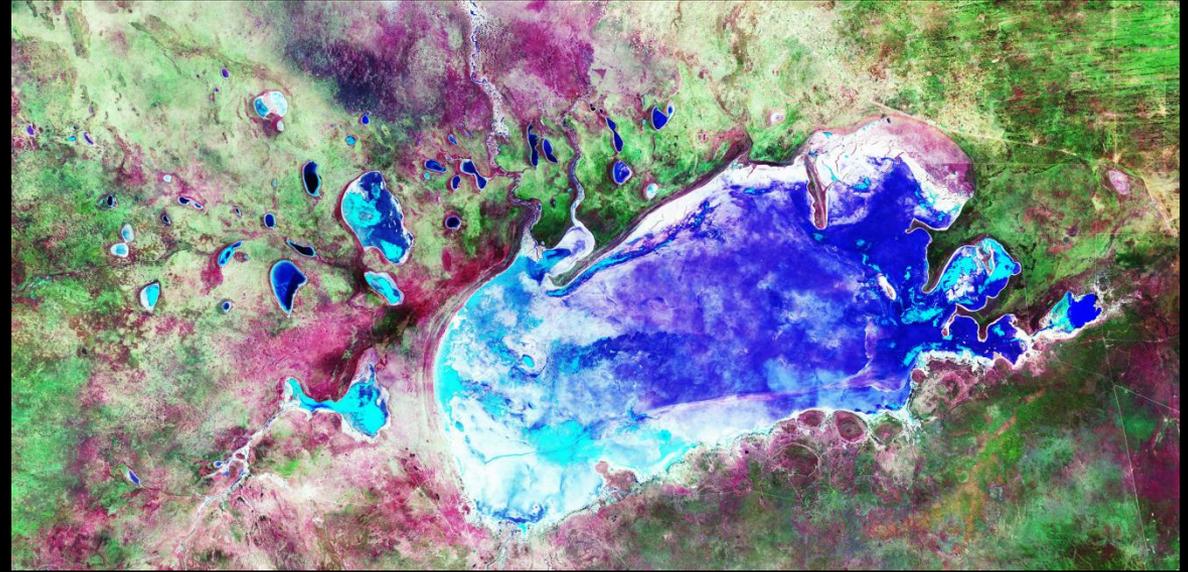
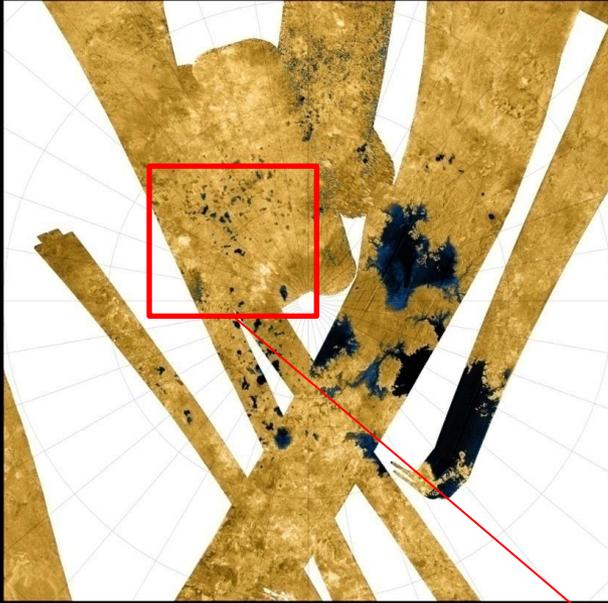
18 octobre 2010

Météorologie bien présente → circulation atmosphérique (nuages)



Tempêtes torrentielles entraînant des changements de surface

Observation de lacs et de mers dans les régions polaires !



Lacs terrestres ayant des formes analogues à celles vues dans les images de Titan.

→ Climat aride, analogue à celui de Titan

→ Etude des mécanismes de formation des lacs de Titan

La géologie de Titan : les champs de dunes équatoriales

