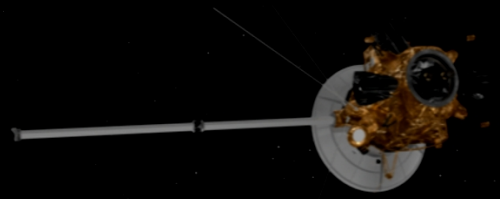


Traitement des données hyperspectrales Cassini/VIMS: Application à Titan, la principale lune de Saturne

Sylvain Philippe , Thomas Cornet (sylvain.philippe@obs.ujf-grenoble.fr),
Stéphane Le Mouélic, Christophe Sotin, Sébastien Rodriguez, Olivier Bourgeois, Nicolas Altobelli et l'équipe Cassini VIMS

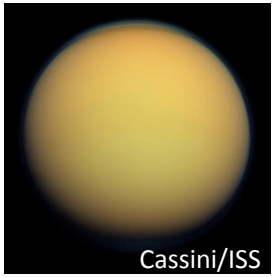
IPAG
Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

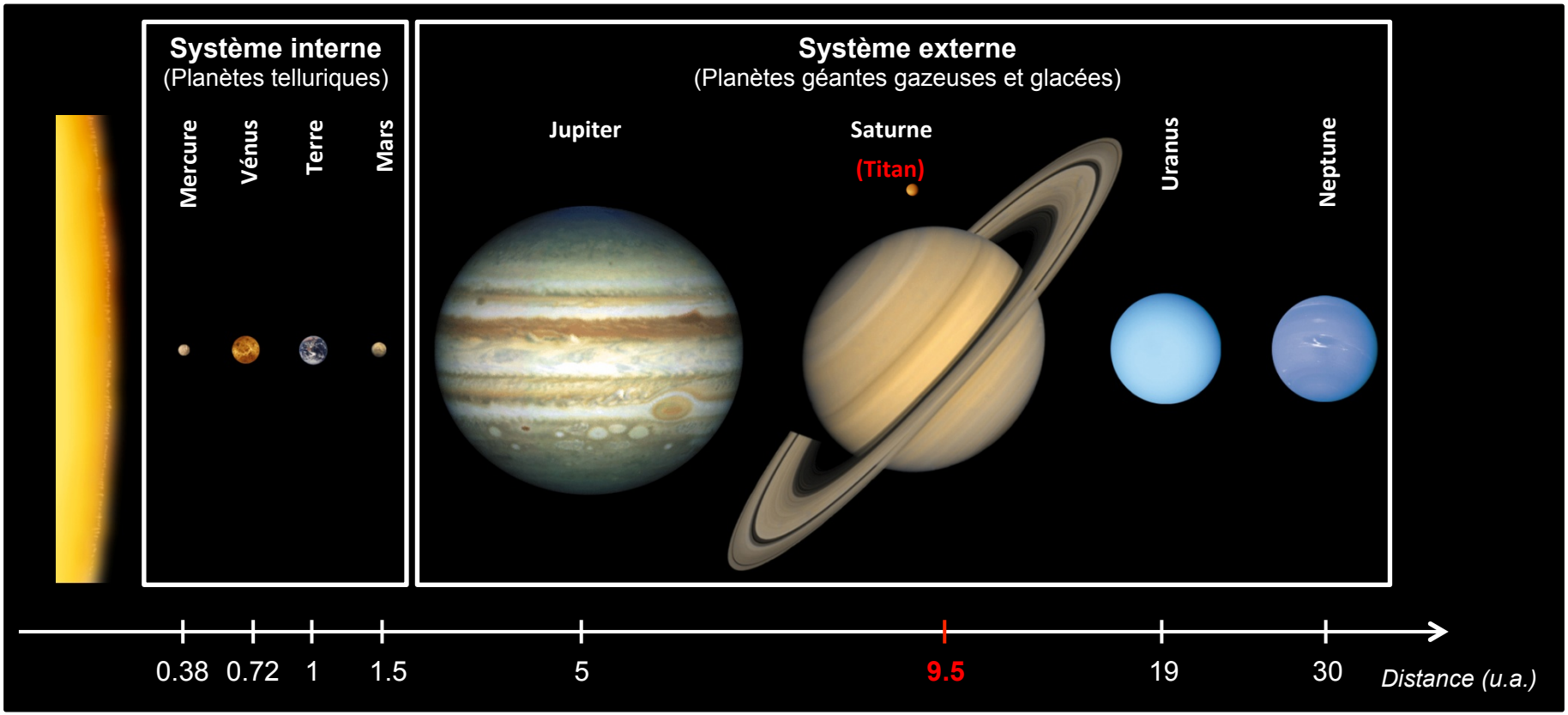
3e colloque scientifique du groupe SFPT-GH
15/05/2014 – IGESA Porquerolles (France)

esa

Place de Titan dans le Système Solaire

- Principal satellite de Saturne (R = 2575 km > Mercure)
- Situé à environ 10 Unités Astronomiques du Soleil
- Second plus gros satellite du Système Solaire après Ganymède (Jupiter)
- Famille des nombreux satellites de glace du système externe





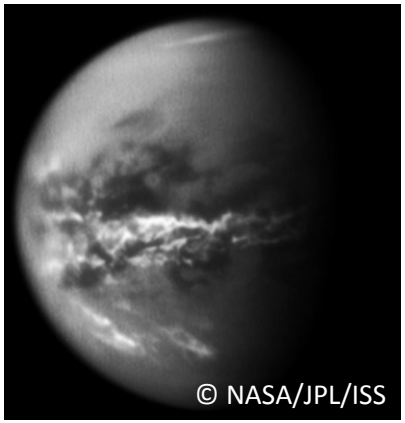
L'atmosphère de Titan

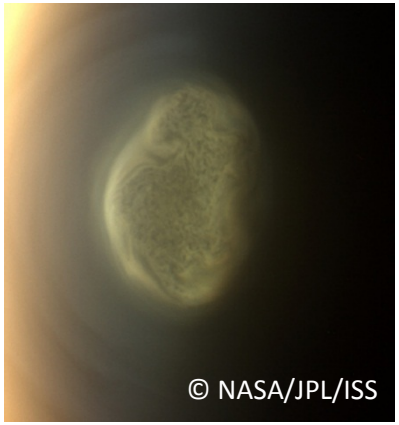
- Principalement composée de diazote (95% N2) et de **méthane** (1-5% CH4)

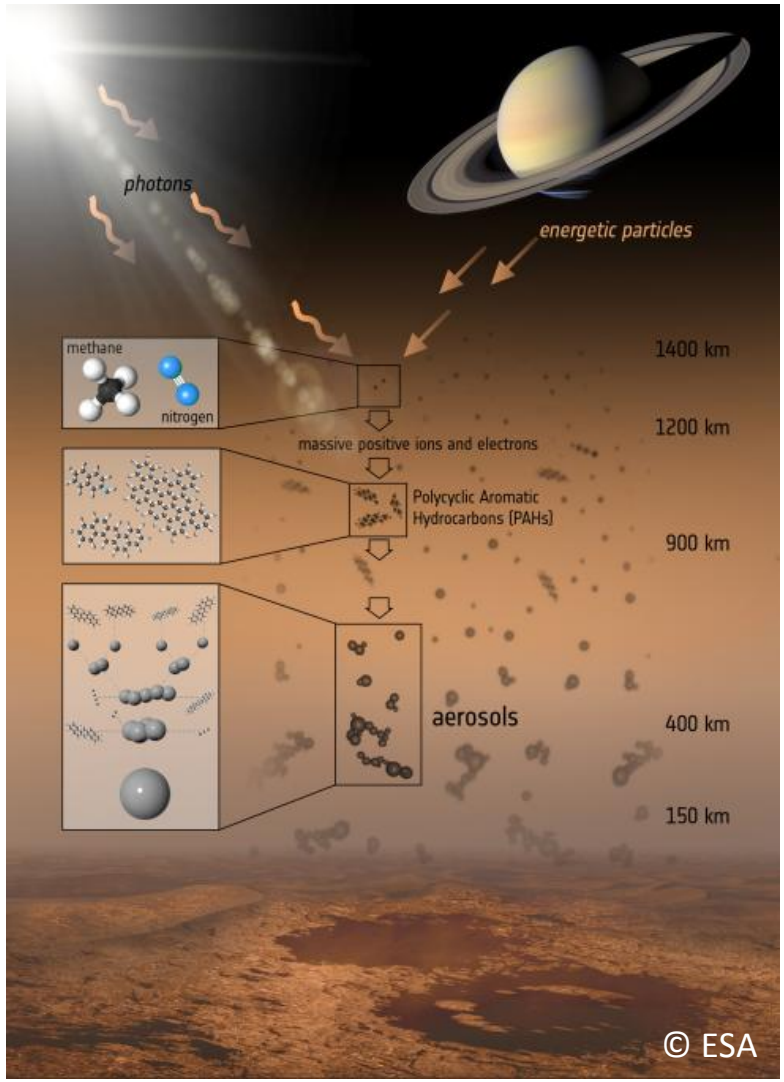
- **Photochimiquement active**: production d'une épaisse **brume opaque** de composés organiques complexes

- Dynamiquement active: nuages, tempêtes, vortex polaire saisonniers

- Pression de surface = 1.47 bars, T = 90 - 95 K
  → méthane, éthane, propane liquides
  → Nombreux hydrocarbures solides

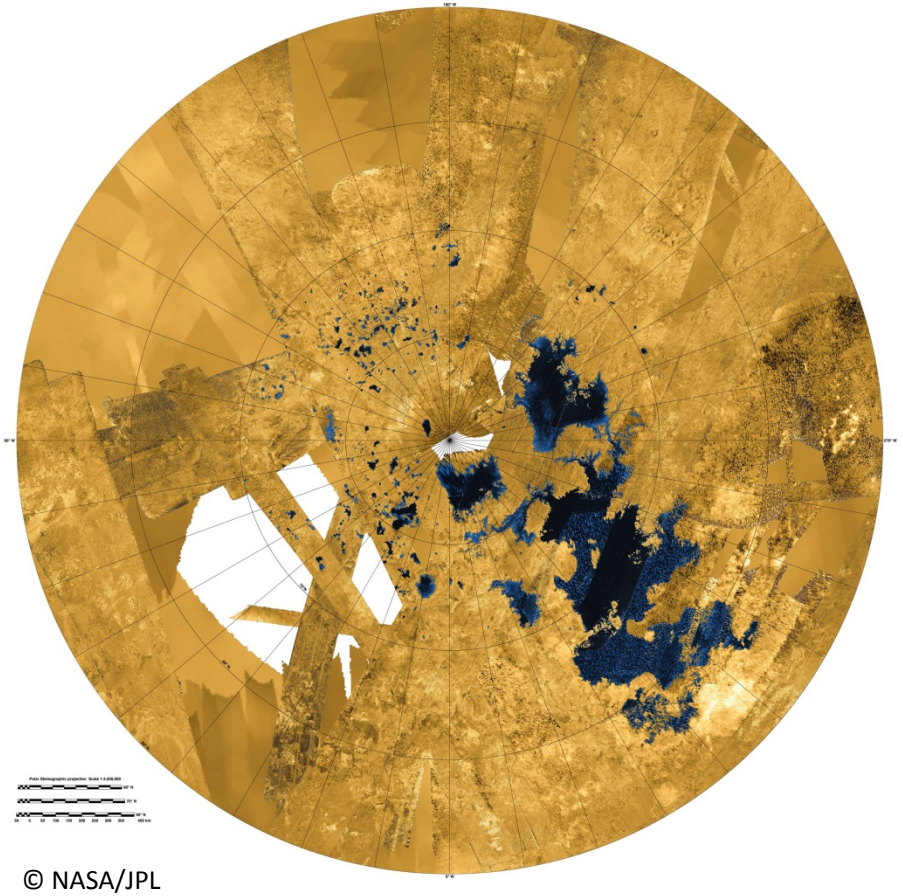






La géologie de Titan vue par le Cassini/RADAR

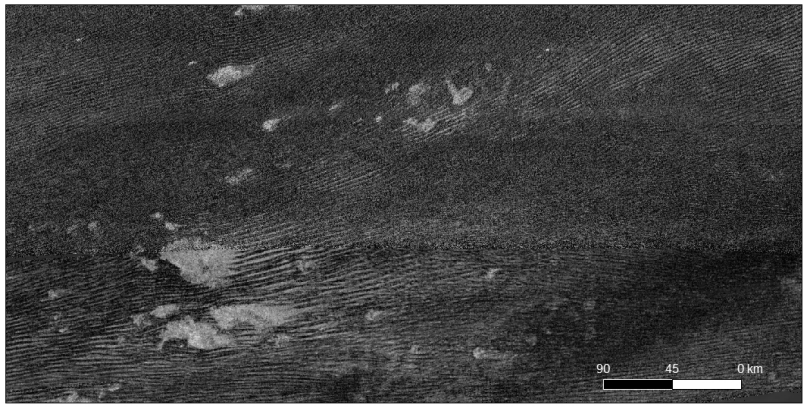
Carte des régions polaires Nord de Titan au RADAR SAR



© NASA/JPL

Géologie de Titan (Cassini/RADAR):

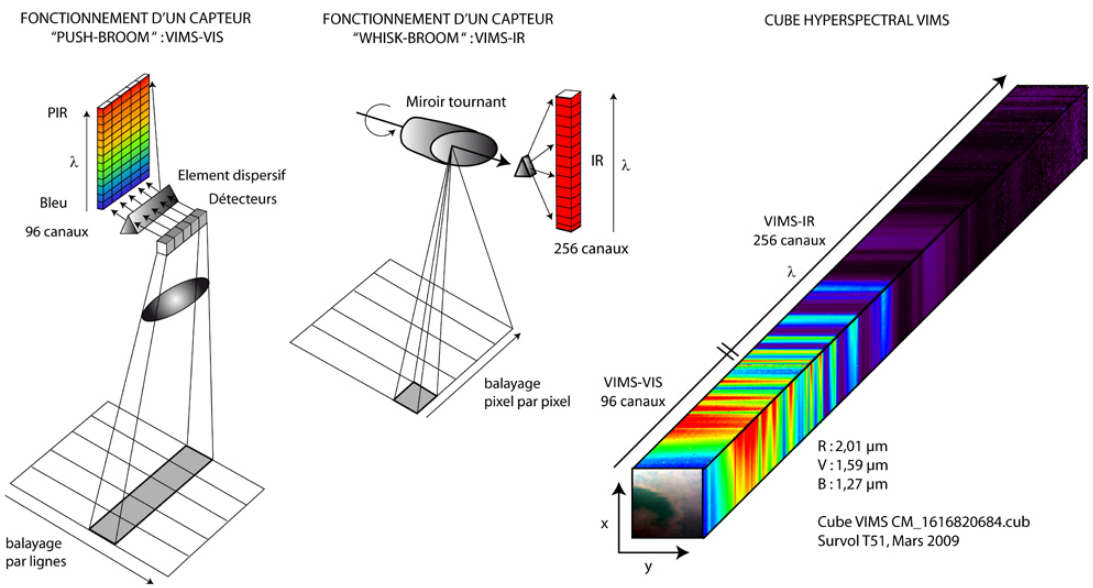
- Regions polaires: lacs, mers et rivières d'hydrocarbures liquides (méthane)
- Tropiques: vastes champs de dunes d'hydrocarbures solides (tholins)
- Toutes des latitudes: quelques cratères d'impact
- **Composition de surface peu contrainte**

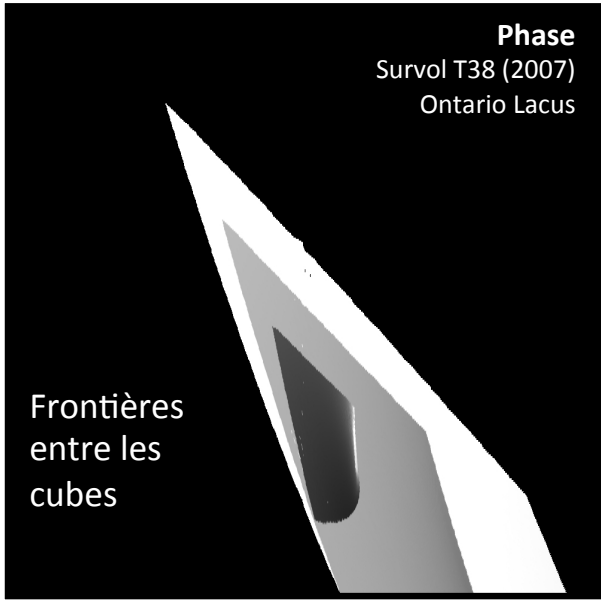


L'instrument VIMS à bord de Cassini

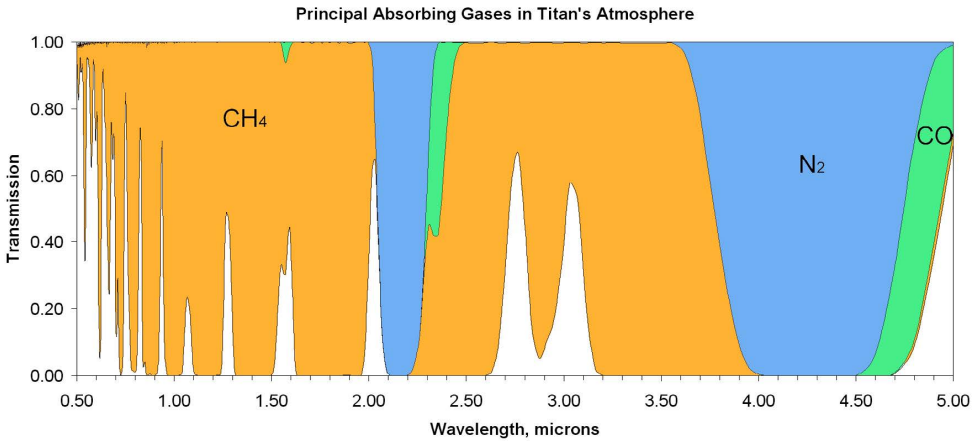
- **Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS):**
  - Spectromètre imageur (x,y,λ) avec une résolution spatiale maximale de 500m:
    - VIMS-VIS: 96 canaux entre 0,35 et 1,05 μm
    - **VIMS-IR: 256 canaux entre 0,88 et 5,10 μm**

- **Acquisition des données par survols:** Les conditions d'observation changent fortement:
  - au sein d'un survol
  - d'un survol à l'autre (2004-2014: 100 survols)

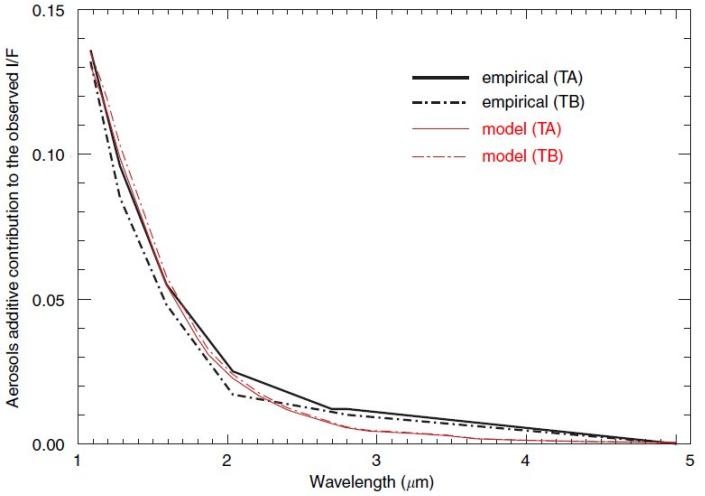




Les effets atmosphériques dans les données VIMS



Clark et al. (2010)



Rodriguez et al. (2006)

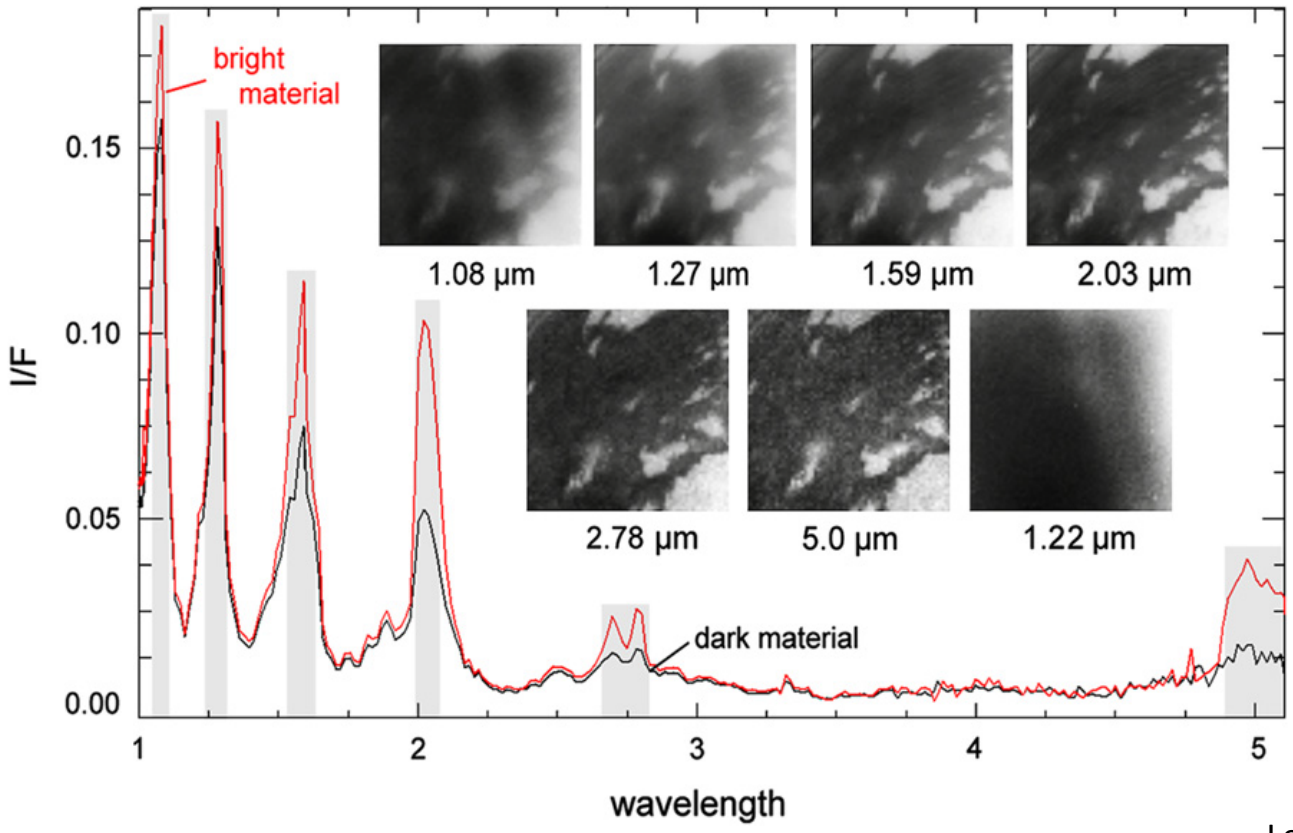
Absorption atmosphérique:
Atmopshère opaque excepté dans 7 fenêtres atmosphériques centrées à 1,08, 1,27, 1,59, 2,01, 2,7-2,8 et 5 μm

Diffusion atmosphérique:
causée par les aerosols ($\lambda < 3$ μm) et présente dans toutes les fenêtres atmosphériques excepté la fenêtre à 5 μm (faible rapport signal sur bruit)

(+ effets photométriques de surface…)

Le facteur de luminance mesuré par VIMS (I/F)

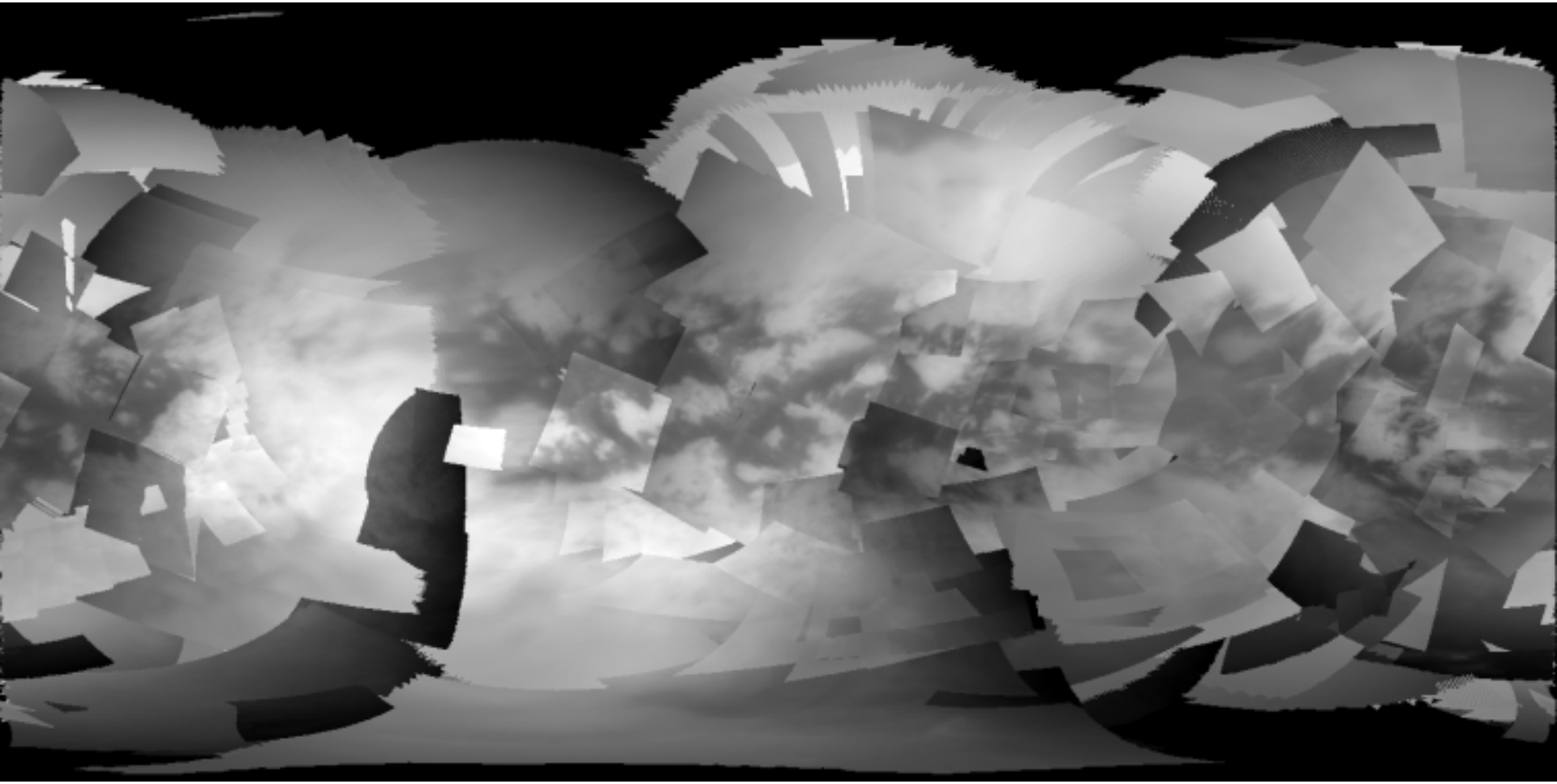
$$\underbrace{\left(\frac{I_{i,e,g,\lambda}}{F_\lambda}\right)_{\text{mes}}}_{RADF_{\text{mes}}} = \underbrace{\left(\frac{I_\lambda}{F_\lambda}\right)_{\text{surf}} f(i,e,g)\, \mathrm{e}^{-\tau_{\text{atm}}(\lambda)\left(\frac{1}{\mu_0}+\frac{1}{\mu}\right)}}_{RADF_{\text{surf}}} + \underbrace{\left(\frac{I_{i,e,g,\lambda}}{F_\lambda}\right)_{\text{atm}}}_{RADF_{\text{atm}}},$$



Le Mouélic et al. (2012)

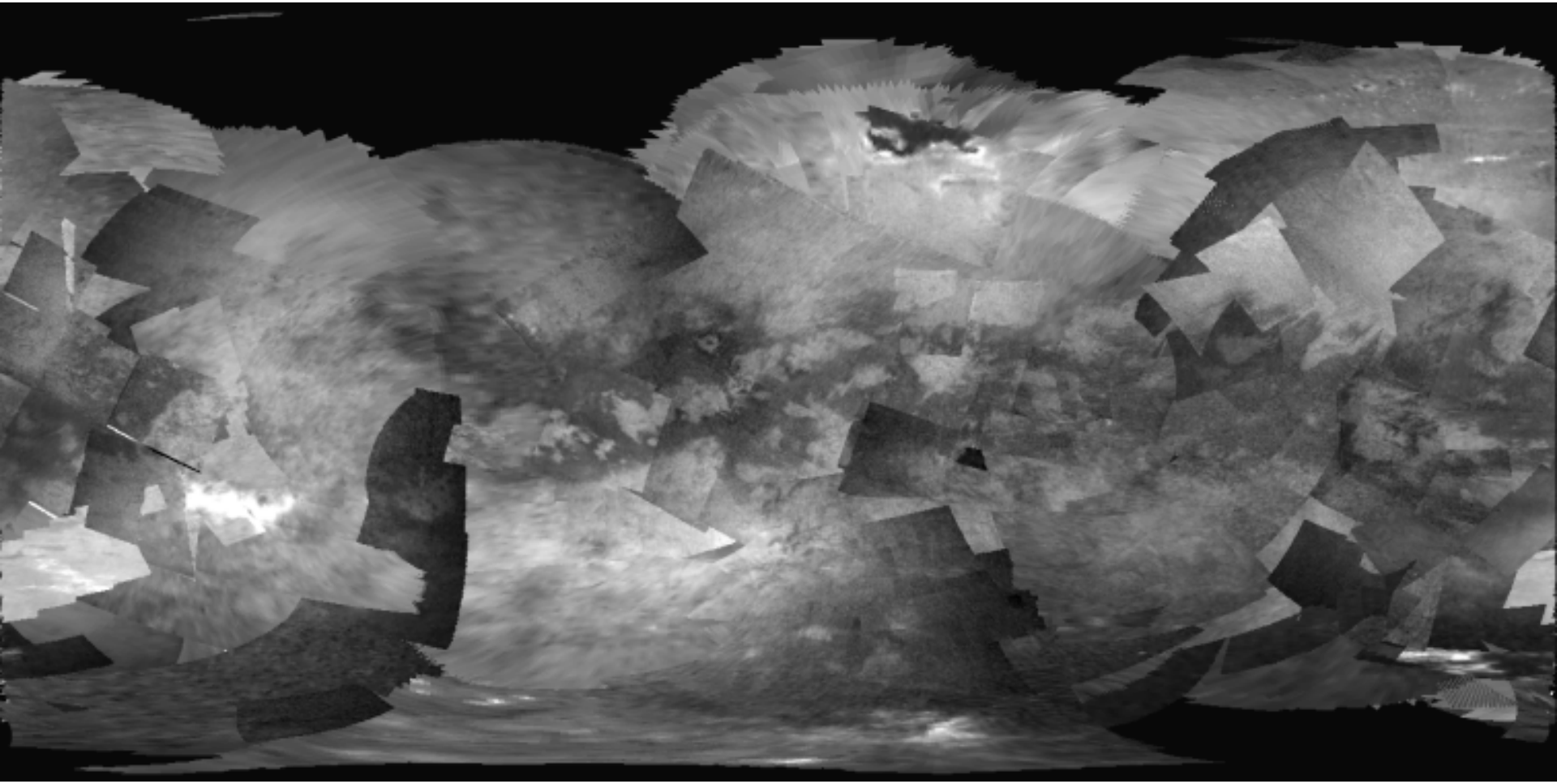
Carte globale VIMS de la surface de Titan à 1,27 μm

(photometrie de surface + diffusion et absorption atmospherique)



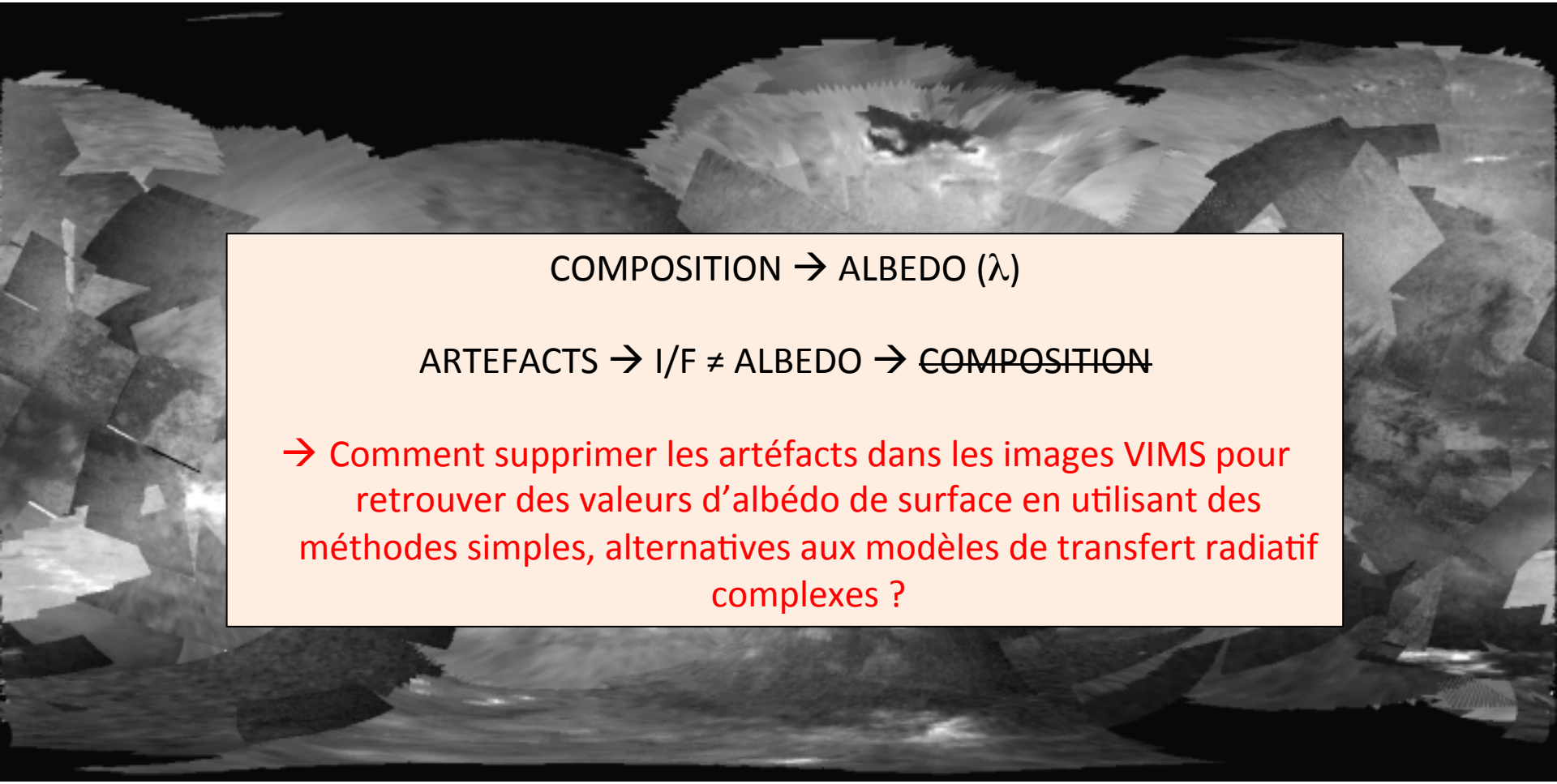
VIMS TA – T90

Carte globale VIMS de la surface de Titan à 5 μm
(photometrie de surface + absorption atmospherique)



VIMS TA – T90

Carte globale VIMS de la surface de Titan à 5 μm
(photometrie de surface + absorption atmospherique)



COMPOSITION → ALBEDO (λ)

ARTEFACTS → I/F ≠ ALBEDO → ~~COMPOSITION~~

→ Comment supprimer les artéfacts dans les images VIMS pour retrouver des valeurs d'albédo de surface en utilisant des méthodes simples, alternatives aux modèles de transfert radiatif complexes ?

VIMS TA – T90

Photométrie à 5 μm sur les cartes globales

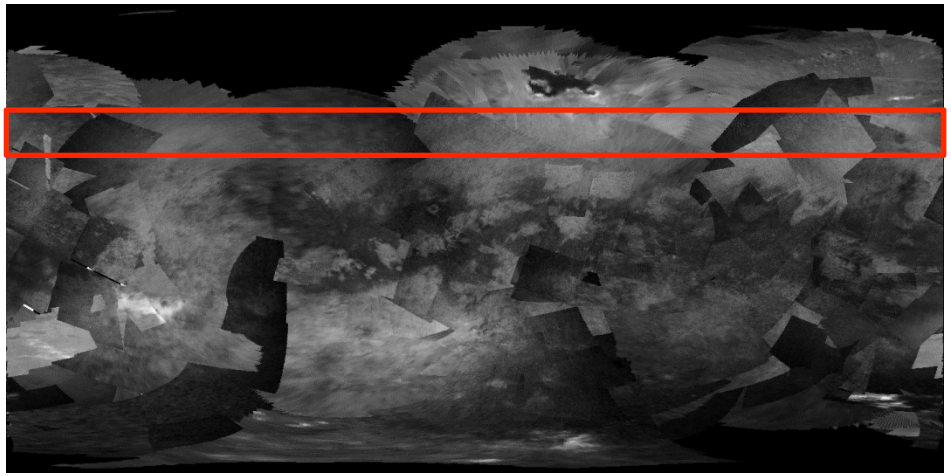
Hypothèses de base:

- À 5 μm, la diffusion atmosphérique est négligeable
- τ_{atm} = 0 (absorption négligeable)
- $(I/F)_{surf}$ = constante (zone homogène)

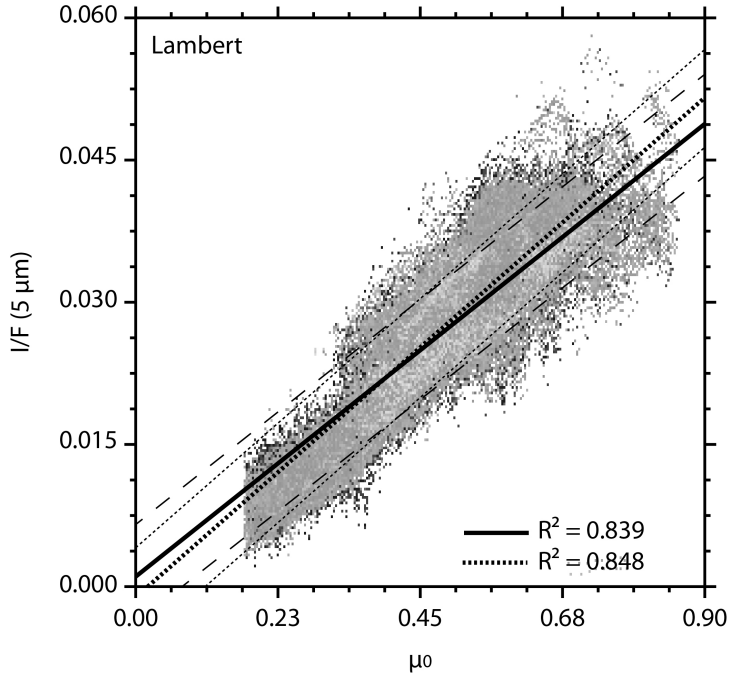
Critères de sélection de f(i,e,g)

Maximisation d'un coefficient de corrélation R^2

Minimisation d'un écart type normalisé σ_R



$$\underbrace{\left(\frac{I_{i,e,g,\lambda}}{F_\lambda}\right)_{\text{mes}}}_{RADF_{\text{mes}}} = \underbrace{\left(\frac{I_\lambda}{F_\lambda}\right)_{\text{surf}}}_{RADF_{\text{surf}}} f(i,e,g)\, e^{-\tau_{\text{atm}}(\lambda)\left(\frac{1}{\mu_0}+\frac{1}{\mu}\right)}$$



Photométrie à 5 μm sur les cartes globales

Hypothèses de base:

- À 5 μm, la diffusion atmosphérique est négligeable
- τ_{atm} = 0 (absorption négligeable)
- $(I/F)_{surf}$ = constante (zone homogène)

Critères de sélection de f(i,e,g)

Maximisation d'un coefficient de corrélation R^2

Minimisation d'un écart type normalisé σ_R

Lois photométriques testées

Rappel :
μ_0 = cos i
μ = cos e

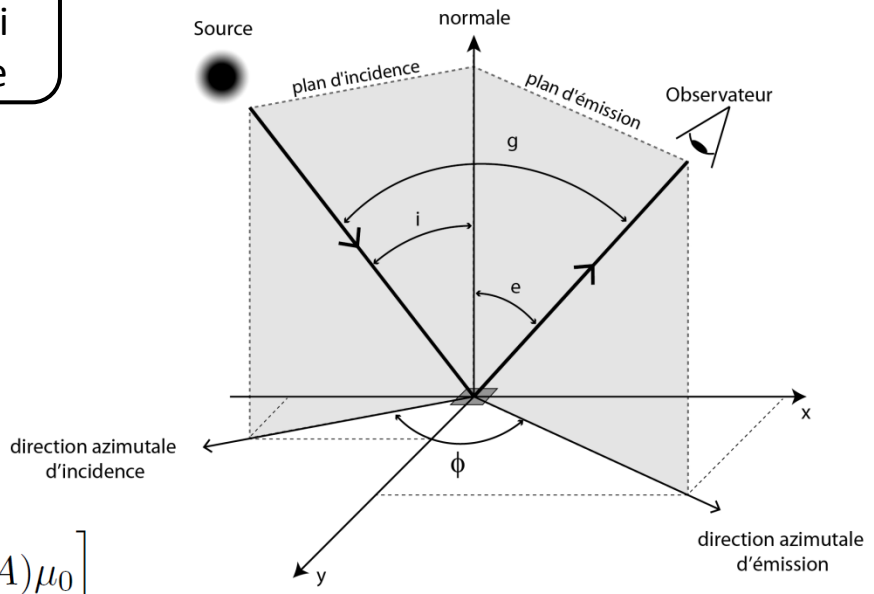
Diffusion isotrope:

Lambert : $$\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\mu_0$$

Effets directionnels:

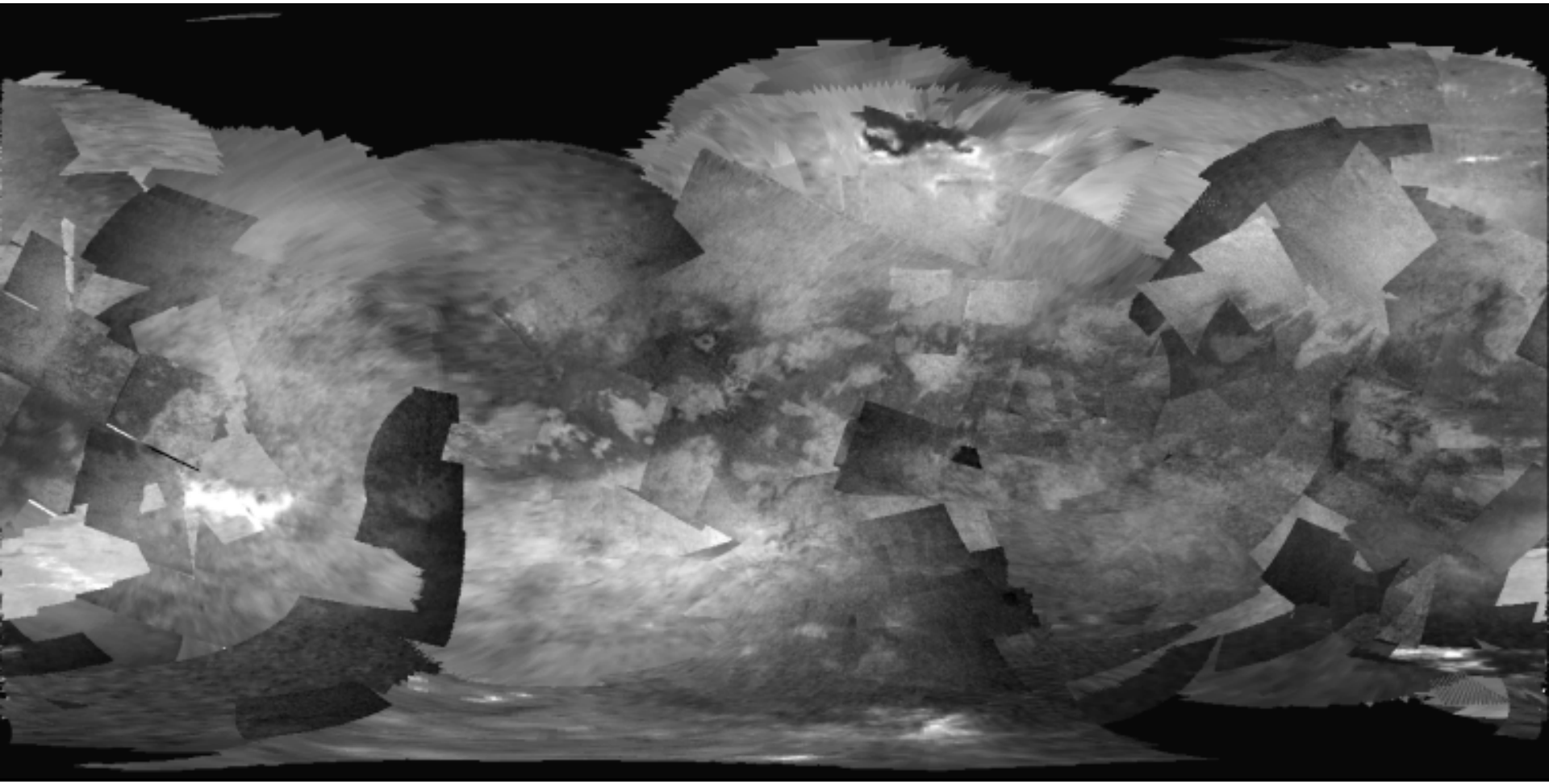
Lommel-Seeliger : $$\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g)$$

Lunar Lambert : $$\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\left[A\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) + (1-A)\mu_0\right]$$



Photométrie à 5 μm sur les cartes globales

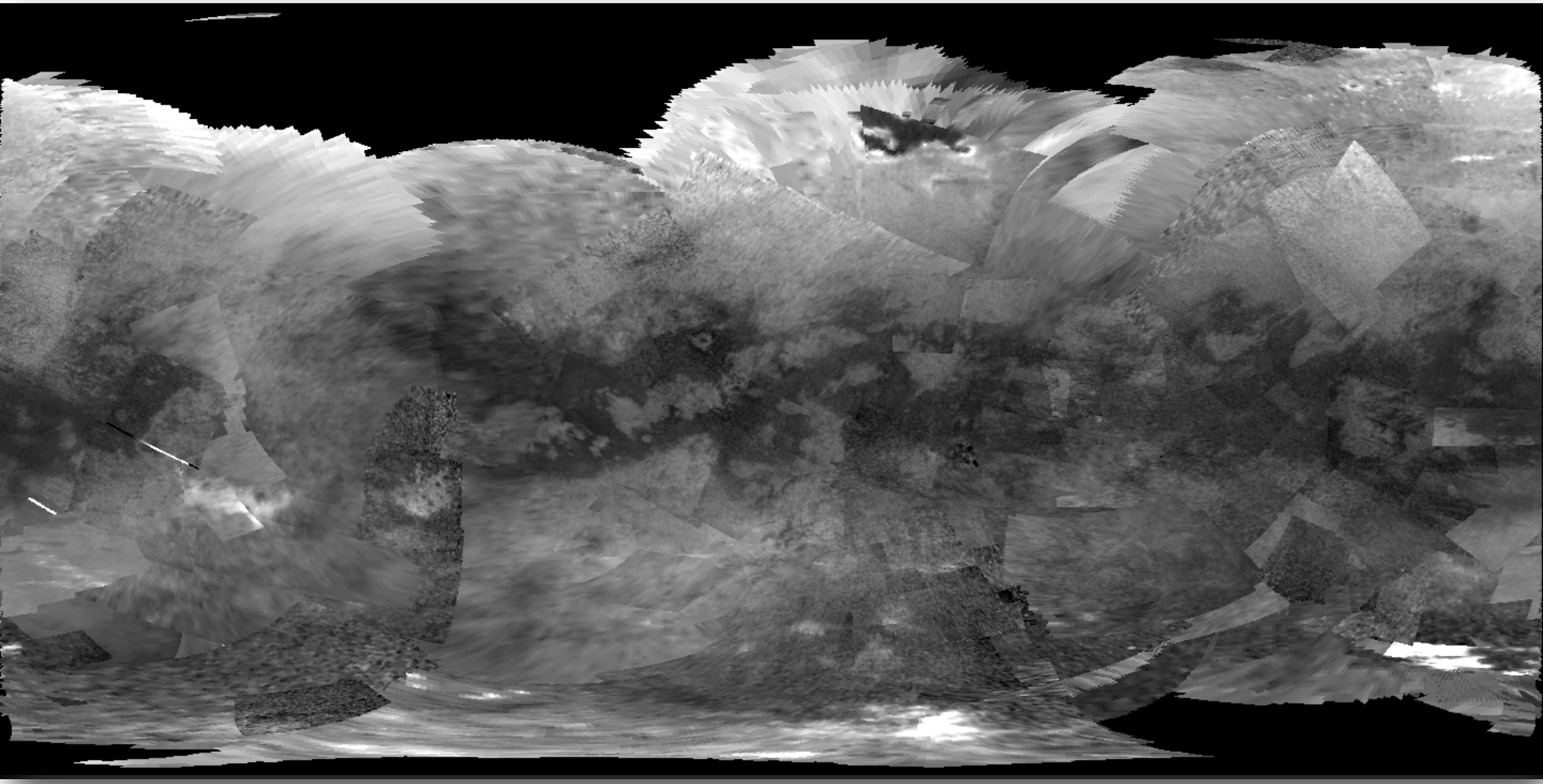
Mosaïque brute



Photométrie à 5 μm sur les cartes globales

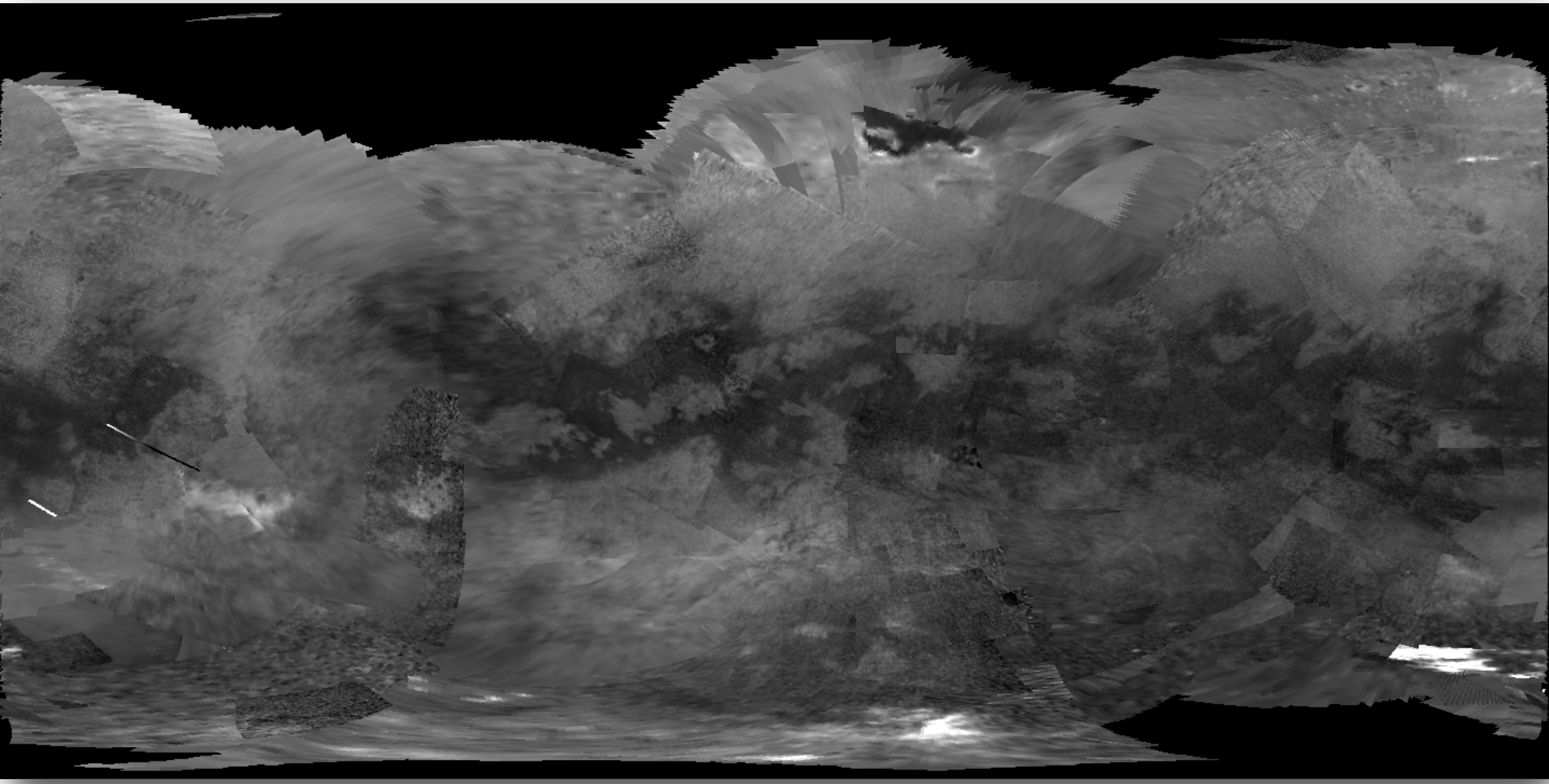
Lambert : $\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\mu_0$ R^2=0.886, σ=0.156

(Le Mouélic et al., 2012)



Photométrie à 5 µm sur les cartes globales

Lunar Lambert : $\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\left[A\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) + (1-A)\mu_0\right]$ R^2=0.899, σ=0.134



Absorption atmospherique à 5 μm sur les cartes globales

τ at 5 μm = 0.06 in the northern hemisphere test zone
Transmission ~ 94.2 %

τ at 5 μm = 0.11 in the southern hemisphere test zone
Transmission ~ 89.6 %

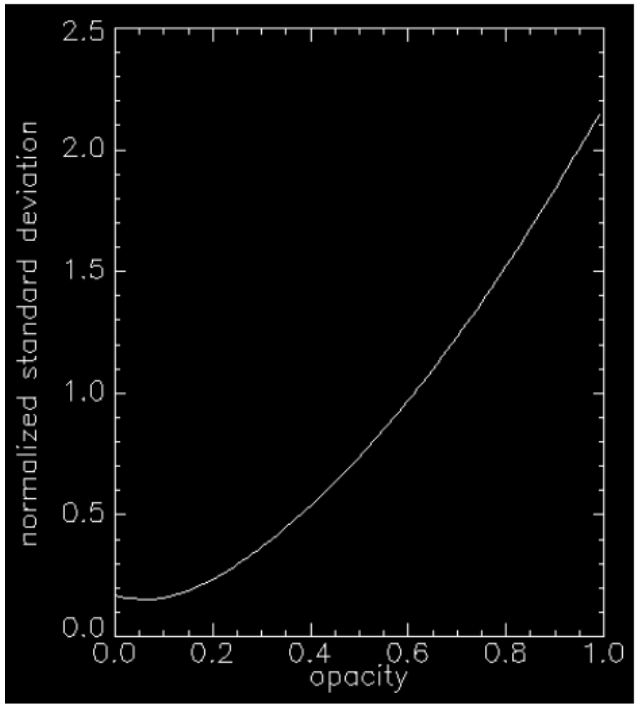
Comparaison avec d'autres etudes

Barnes et al. (2013) : reflection speculaire sur un lac
τ **= 0.04 – 0.07 at 5 microns**

Sotin et al. (2012) : etude des lacs du Nord
τ **~ 0.10 at 5 microns**

Sotin et al. (2014, in prep.) : occultation solaires
τ **~ 0.10 – 0.12 at 5 microns**

Absorption ?



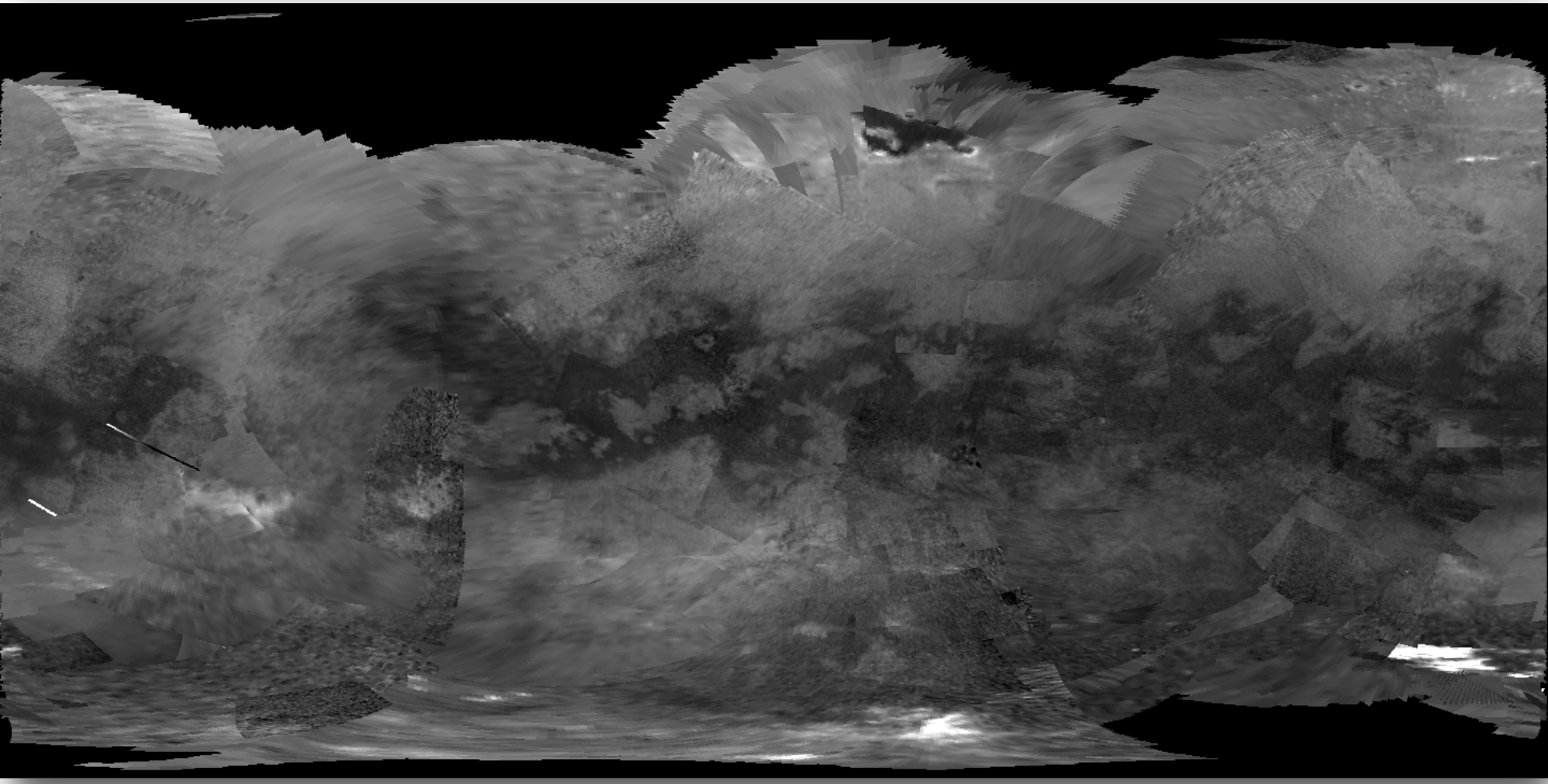
Study of the normalized standard deviation in the surface photometry corrected and non-corrected images at 5 μm (homogeneous northern region)

Can we find a minimum ?

→ **Yes at τ = 0.06 (North)**

Photométrie à 5 µm sur les cartes globales

Lunar Lambert : $\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\left[A\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) + (1-A)\mu_0\right]$ R^2=0.899, σ=0.134

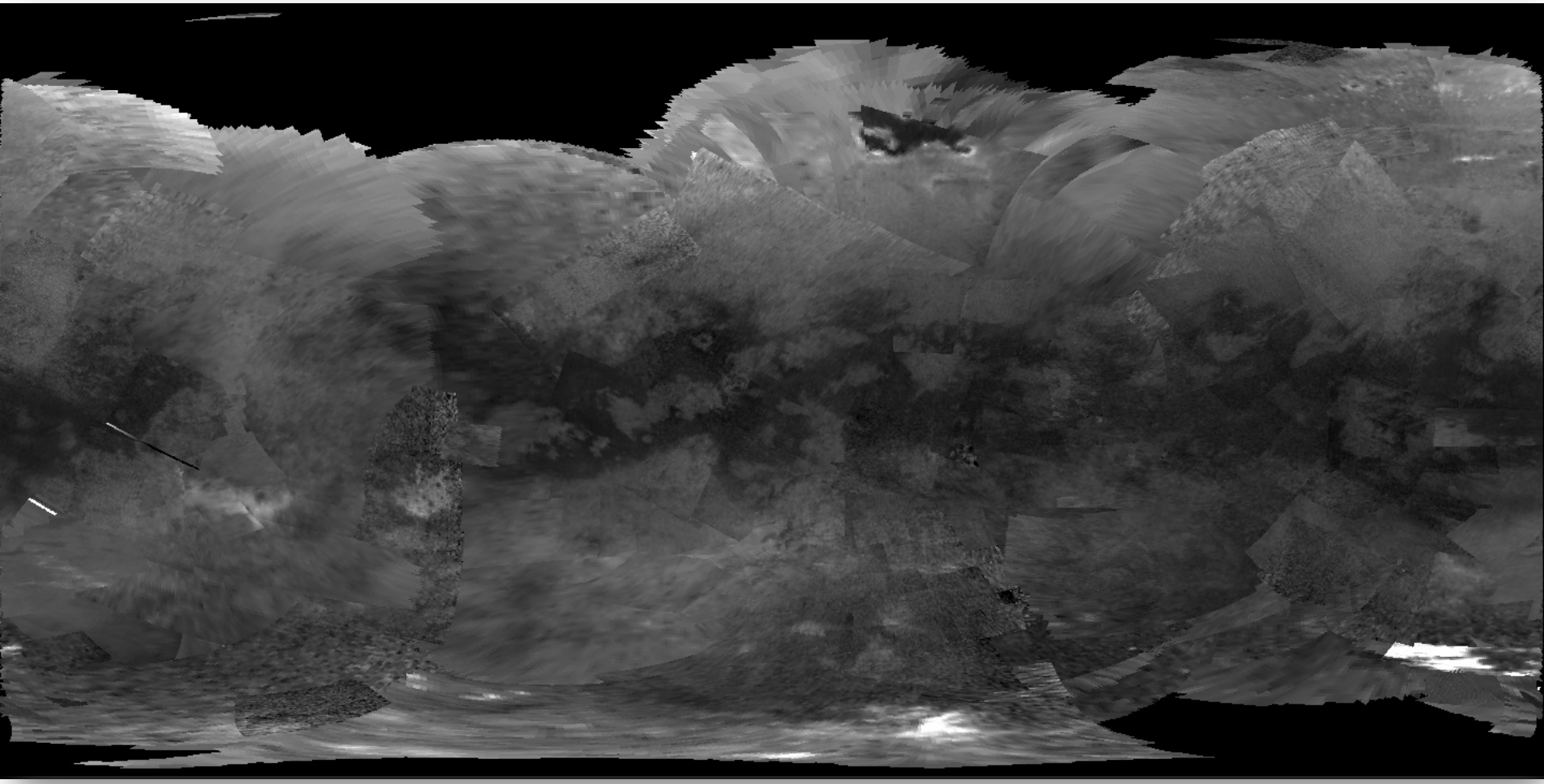


Traitements à 5 μm

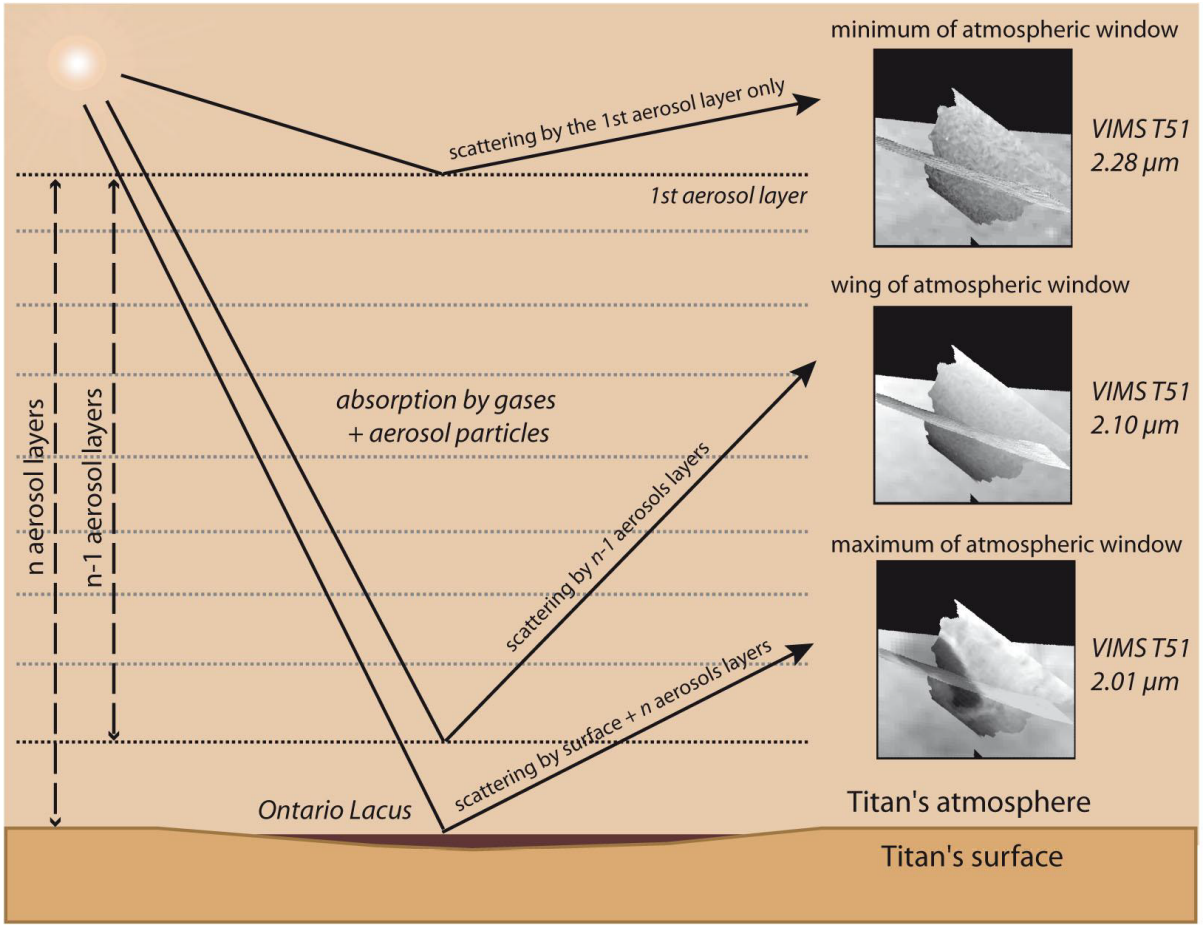
Photométrie + absorption à 5 μm sur les cartes globales

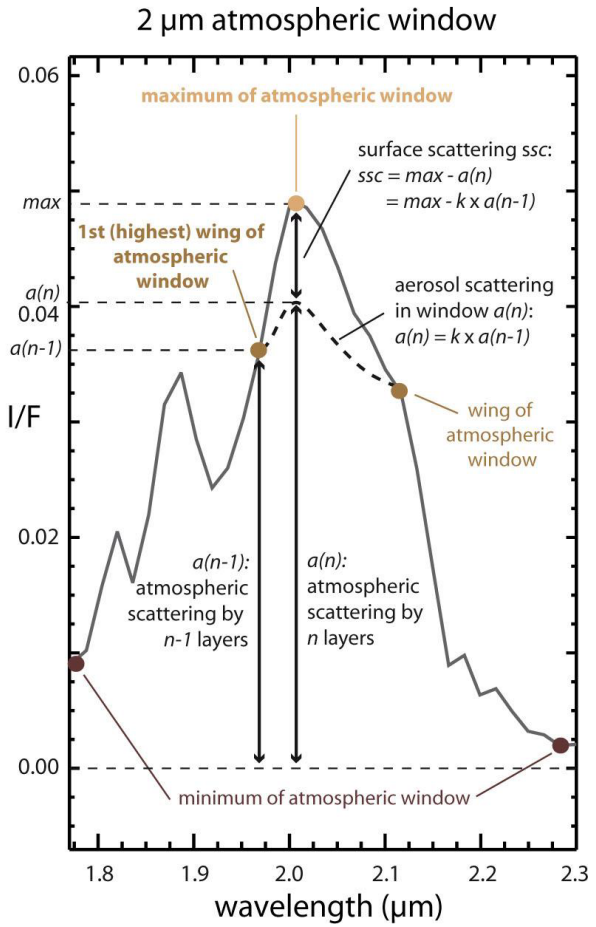
Lunar Lambert : $\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\left[A\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) + (1-A)\mu_0\right] e^{-\tau_{\text{atm}}(\lambda)\left(\frac{1}{\mu_0}+\frac{1}{\mu}\right)}$

R^2=0.925, σ=0.124



Correction de la diffusion atmosphérique: principe





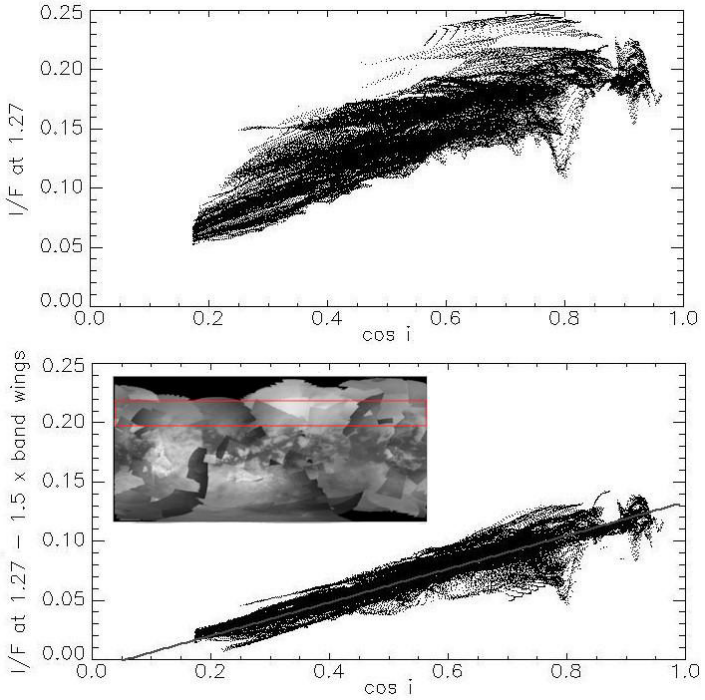
Cornet et al. (2012)

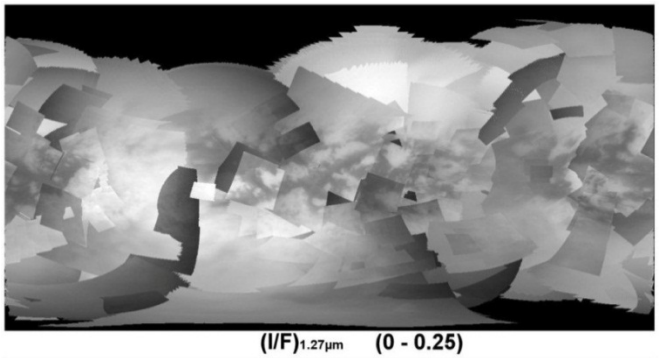
Correction de la diffusion atmosphérique sur les mosaïques globales

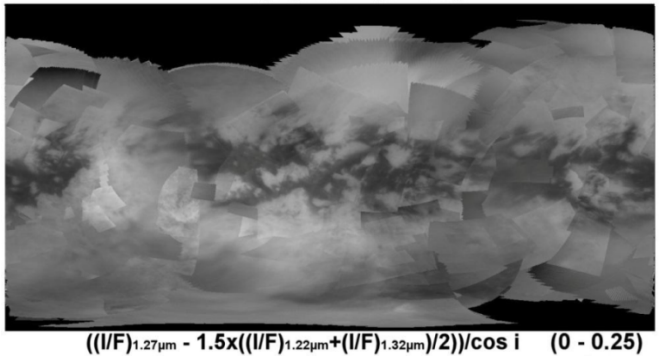
Étude de corrélations entre un I/F corrigé de la diffusion et la fonction photométrique de surface

Hypothèses de base:

- Diffusion purement additive
- Fenêtres atmosphériques transparentes ($\tau = 0$)
- Fonction photométrique de surface identique à celle déterminée à 5 μm

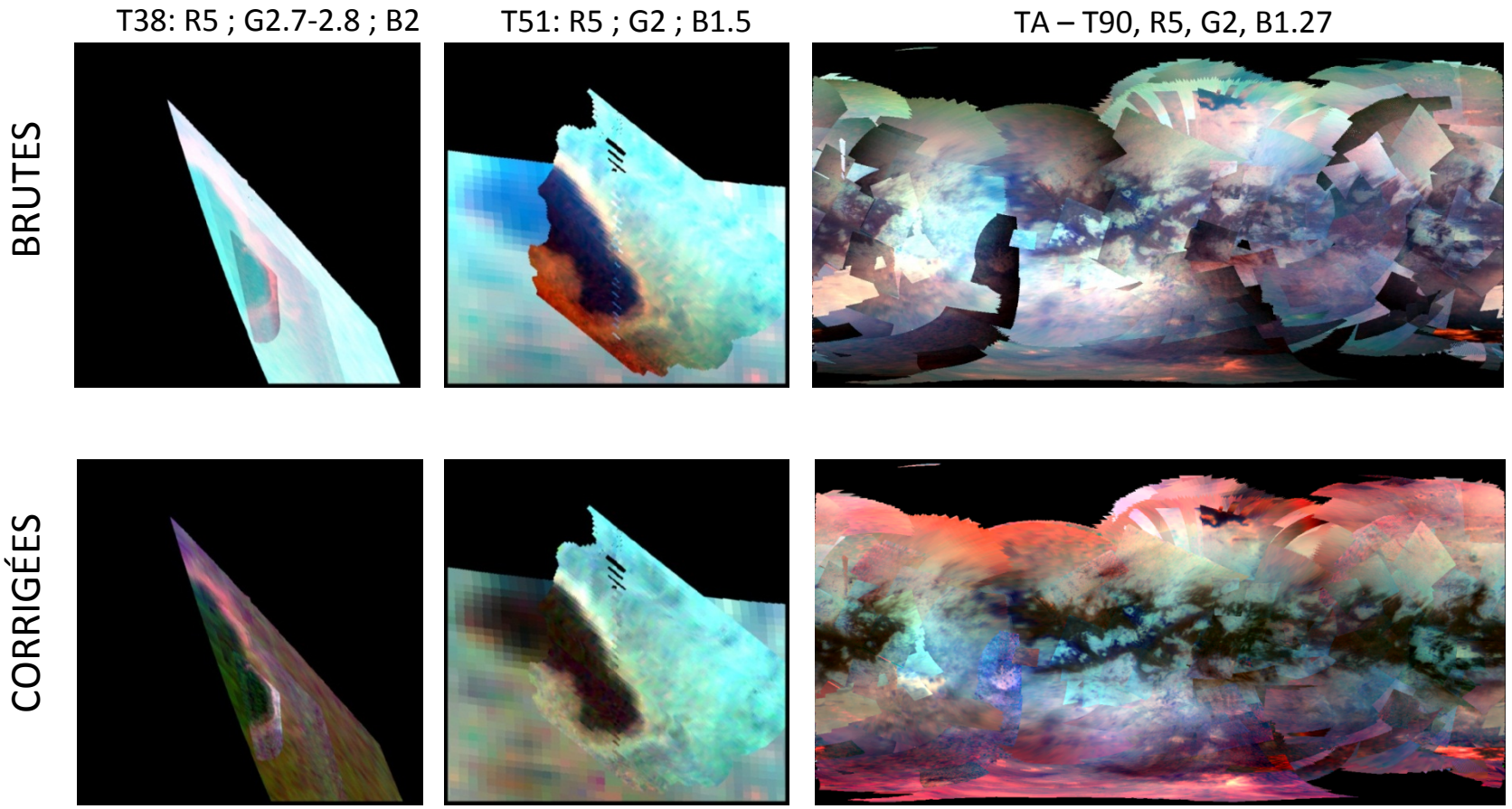






Le Mouelic et al. (2012)

Exemples de corrections sur des mosaïques de survols et globales



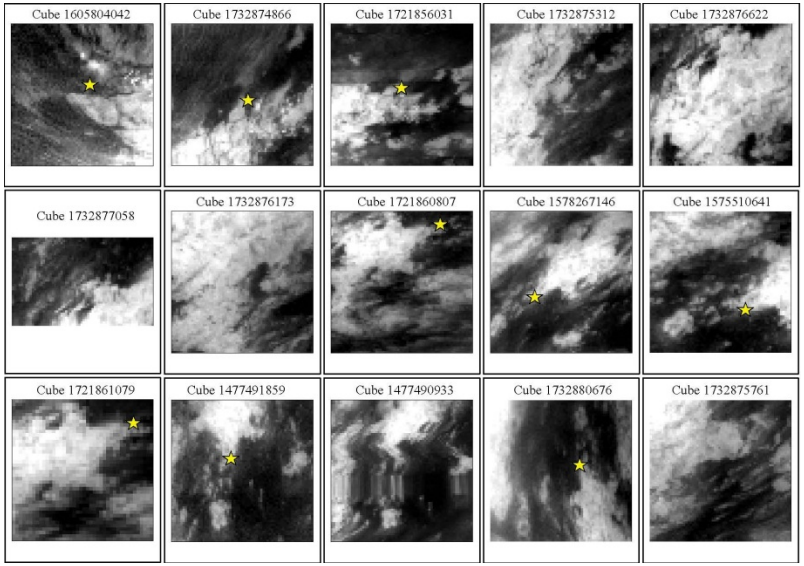
Bonne première approche MAIS:

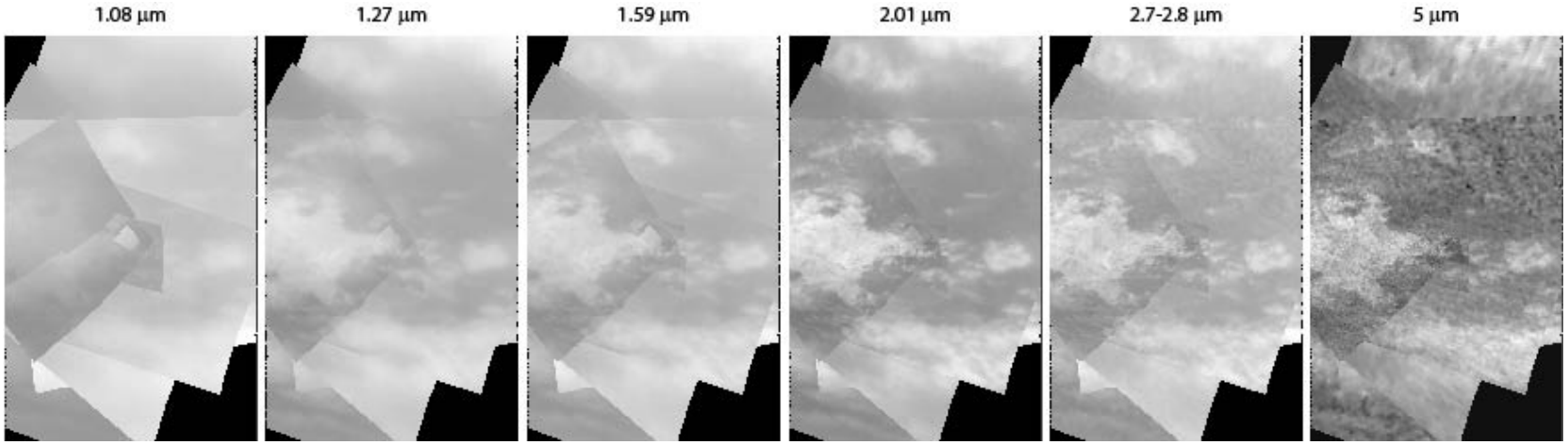
- Dépend fortement de la photométrie de surface toujours incertaine
- Applicable uniquement sur des mosaïques de cubes dans des portions d'image homogène

Le site d'atterrissage du module Huygens

Site idéal pour contraindre les corrections:
- Nombreuses observations du site
- Comparaison avec des modèles de transfert radiatifs en développement
- Validation des méthodes de correction empiriques

MAIS:
- Terrains trop heterogènes et zone trop restreinte: nécessite d'une **nouvelle méthode cube par cube**
- Utilisation des rapports de bandes (I/F)xμm / (I/F)5μm



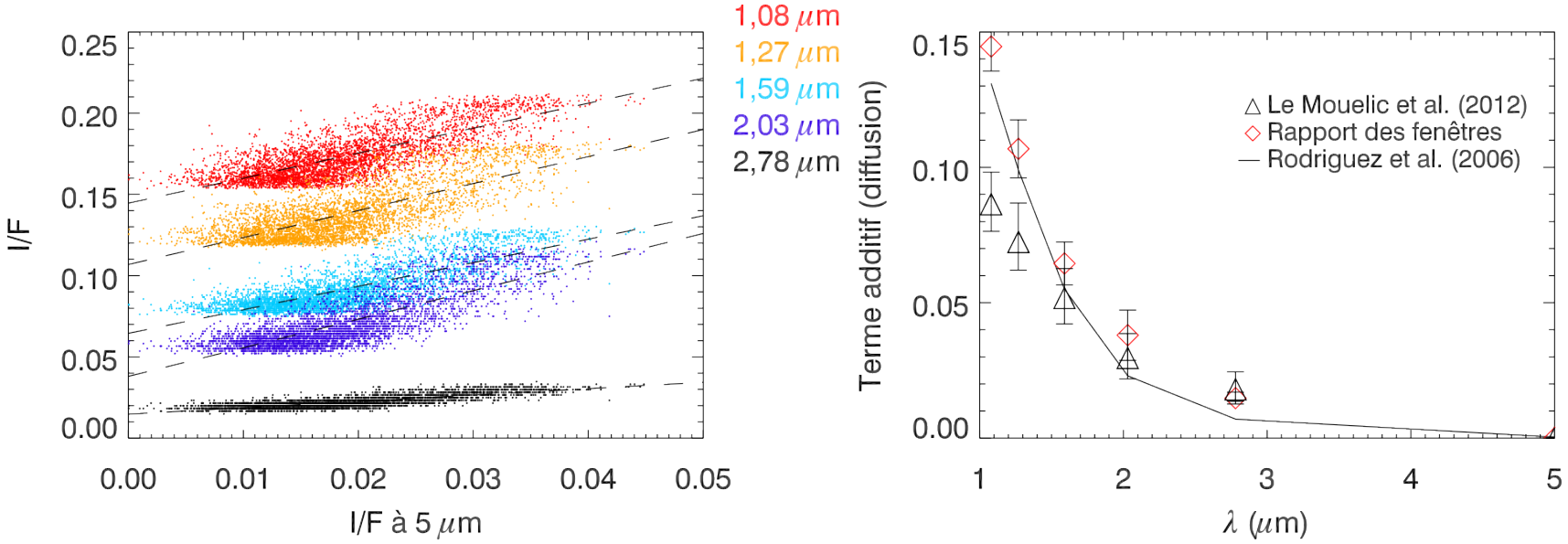


Méthode de correction cube par cube par rapports de fenêtres

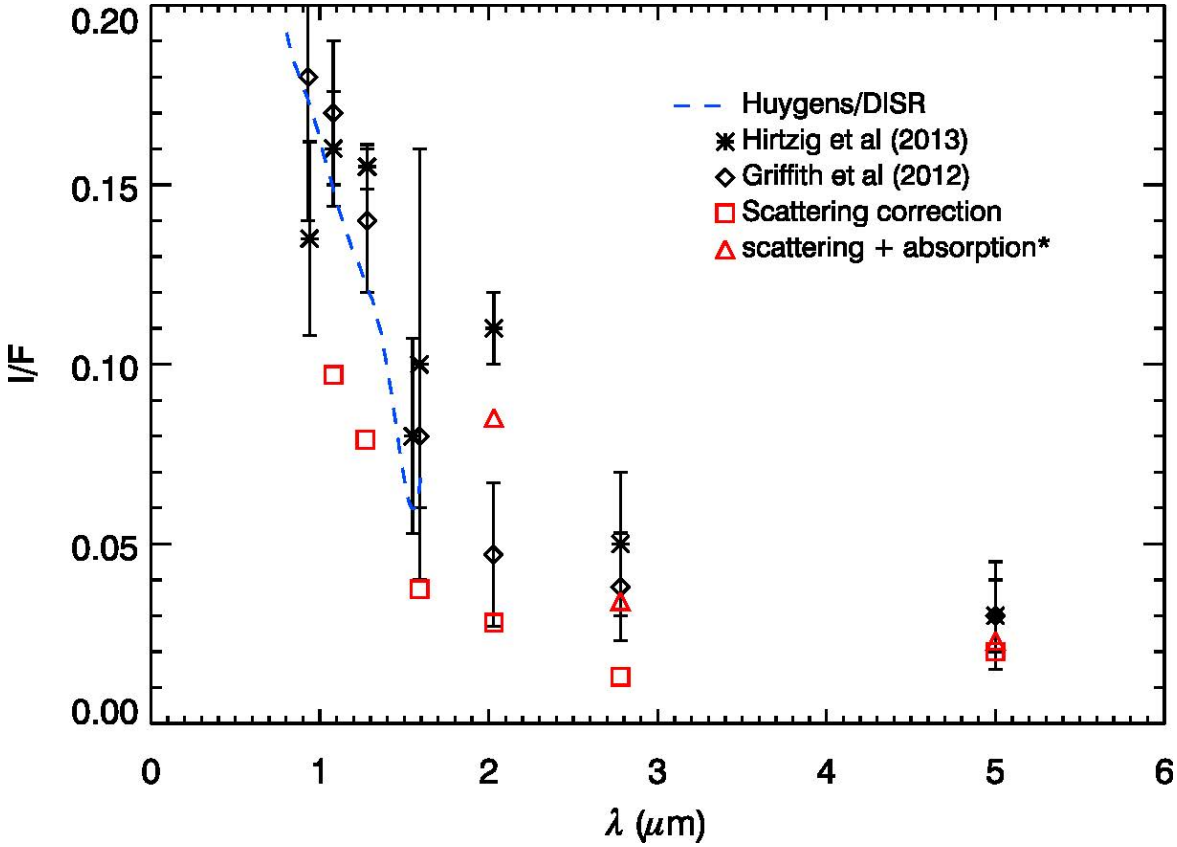
Hypothèses de base:

- Fenêtres atmosphériques transparentes : exp(-τ x airmass) = 1
- I/F à 5 µm fortement corrélée avec le I/F des autres fenêtres atmosphériques
- Photométrie de la fenêtre à 5 µm est identique à la photométrie des fenêtres atmosphériques

$$\frac{\left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m}}{\left(\frac{I}{F}\right)_{5\ \mu m}} = \frac{\left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m,surf} f(i,e,g)\ exp^{-\tau \times airmass} + \left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m,atm}}{\left(\frac{I}{F}\right)_{5\ \mu m,surf} f(i,e,g)\ exp^{-\tau \times airmass}}$$



Comparaison avec les modèles de transfert radiatif



Limitations: valeur de diffusion constante sur tout un cube, difficulté à estimer l'absorption atmosphérique

MAIS I/F de plus en plus proches de valeurs d'albédo issues de modèles de transfert radiatif complexes

→ Alternative simple aux modèles de transfert radiatif au premier ordre

Conclusions et perspectives

Étude à 5 microns:

- Amélioration des corrections photométriques et atmosphériques à 5 microns (effets directionnels)
- Premières estimations de l'absorption atmosphérique

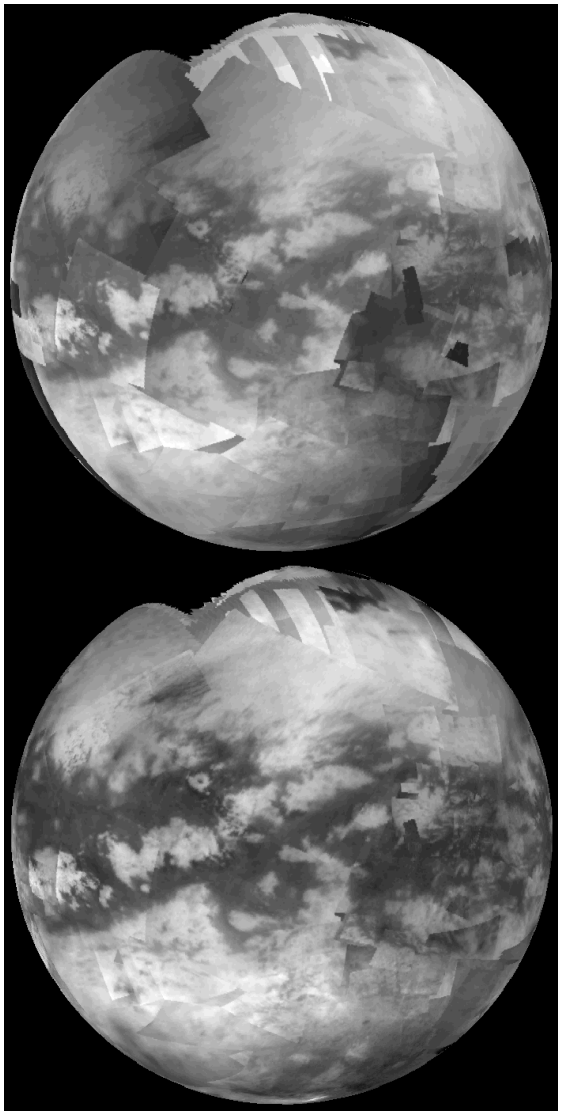
Étude des corrections sur le site Huygens:

- Validation de la méthode de correction de la diffusion atmosphérique par les ailes de bandes (Le Mouélic et al. 2012)
- Méthode cube par cube donne des résultats proches des résultats des modèles de transfert radiatifs complexes

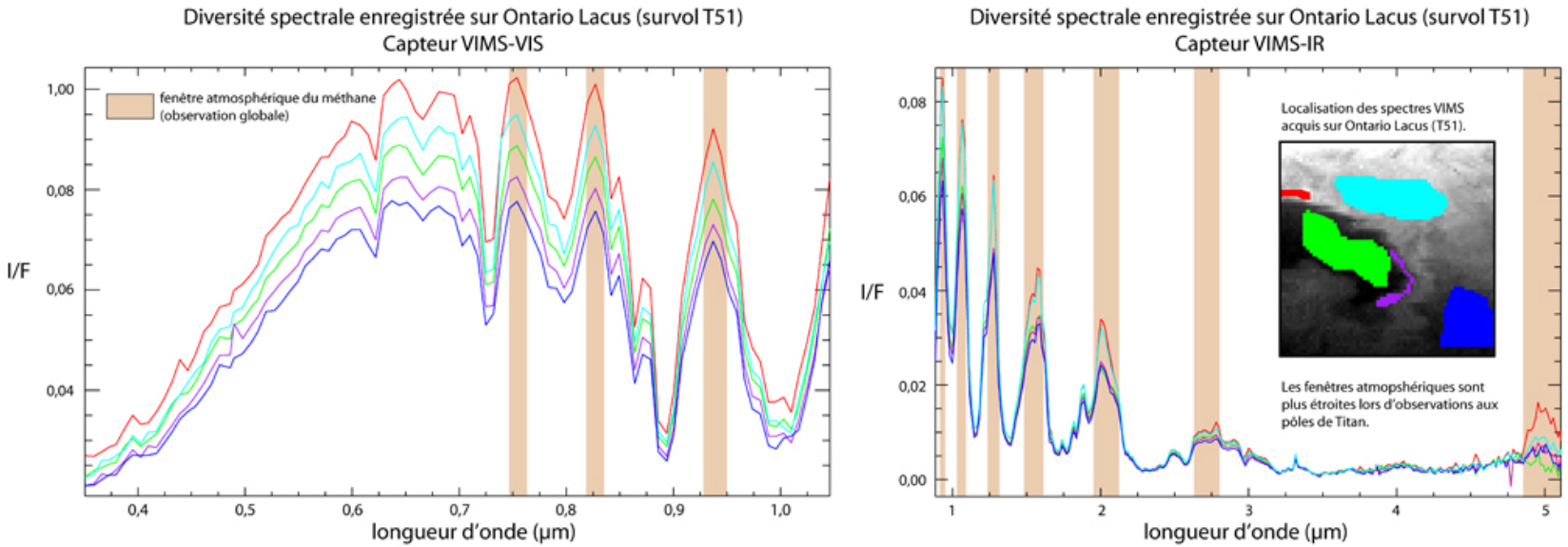
Le I/F est de plus en plus proche de valeurs d'albédo

Perspectives:

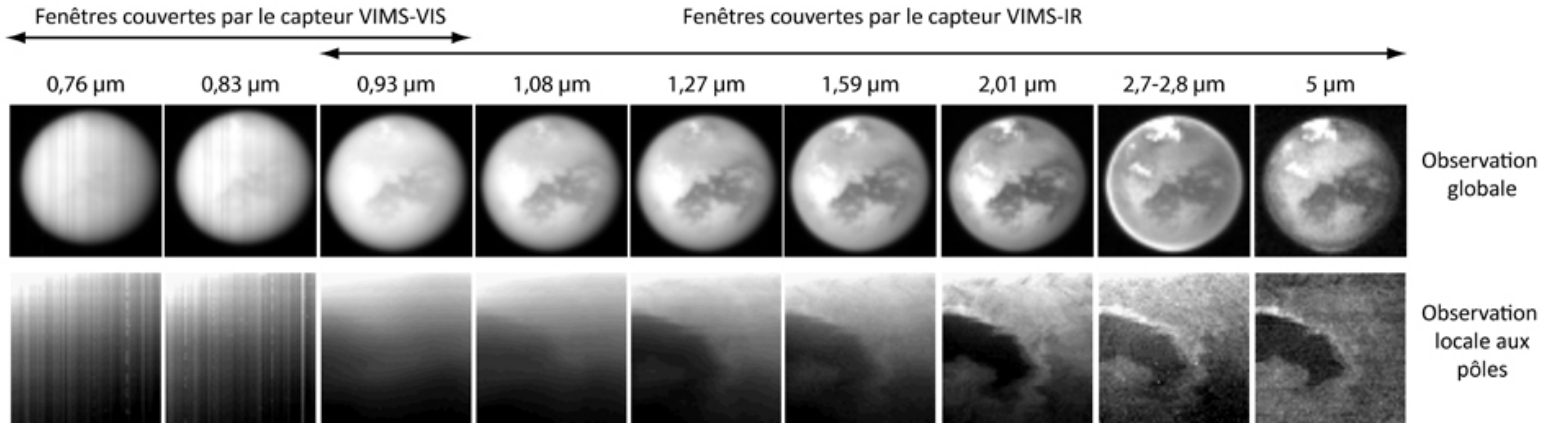
- Amélioration de la fonction photométrique de la surface
- Meilleure prise en compte des effets de diffusion et d'absorption (fonction du temps, de la latitude, de l'airmass, …)



Les effets atmosphériques dans les données VIMS

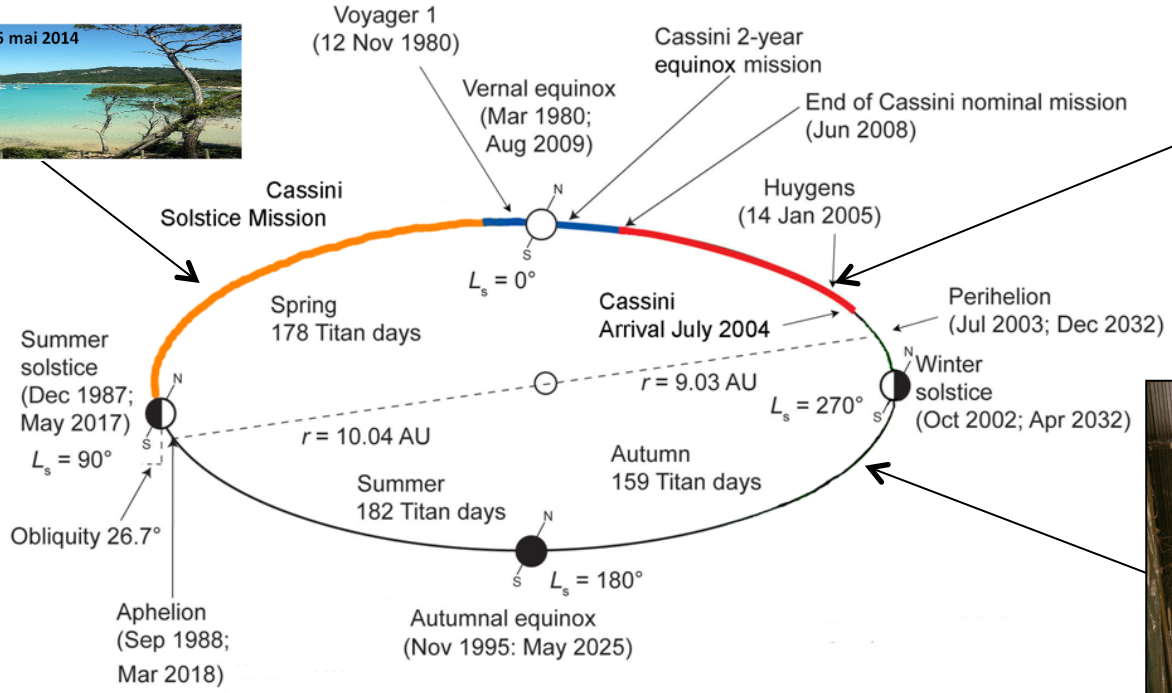


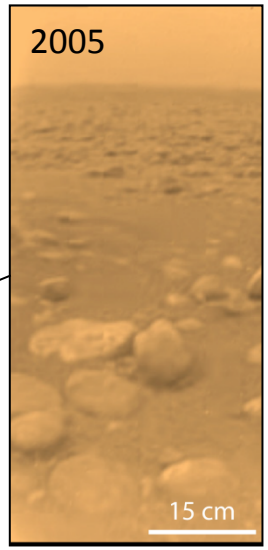
IMAGES ACQUISES DANS LES FENETRES ATMOSPHERIQUES DU METHANE



La mission Cassini-Huygens

- Cooperation NASA/ESA/ASI
- Envoyée vers le système de Saturne en 1997, arrivée en 2004
- 1 orbiteur (Cassini) et 1 lander (Huygens)
- Mission étendue sur presque une demie-année titanienne (13 ans)

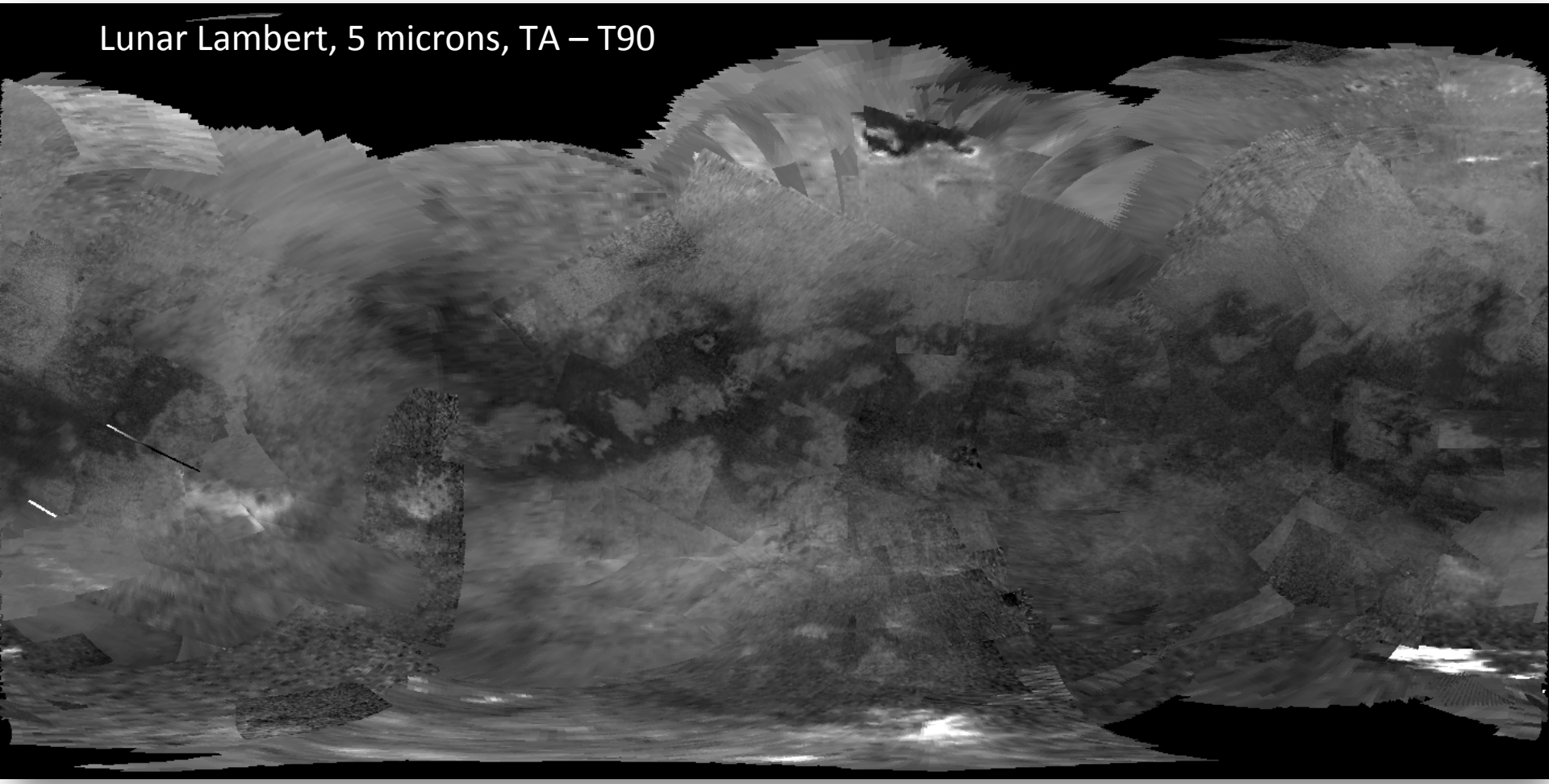




Lancement de la sonde Cassini-Huygens (15/10/1997)
Image: http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/pia01051

Photométrie à 5 µm sur les cartes globales

Lunar Lambert : $\frac{I}{F}(i,e,g) = \left(\frac{I}{F}\right)\left[A\frac{\mu_0}{\mu_0+\mu}P(g) + (1-A)\mu_0\right]$



Methode de correction cube par cube

Hypothèses de base:

- Fenêtres atmosphériques transparentes : exp(-τ x airmass) = 1
- I/F à 5 µm fortement corrélée avec le I/F des autres fenêtres atmosphériques
- Photométrie de la fenêtre à 5 µm est identique à la photométrie des fenêtres atmosphériques

$$\frac{\left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m}}{\left(\frac{I}{F}\right)_{5\ \mu m}} = \frac{\left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m,surf} f(i,e,g)\ exp^{-\tau \times airmass} + \left(\frac{I}{F}\right)_{2.03\ \mu m,atm}}{\left(\frac{I}{F}\right)_{5\ \mu m,surf} f(i,e,g)\ exp^{-\tau \times airmass}}$$