

Variations saisonnières de l'activité nuageuse dans l'atmosphère de Titan suivies avec VIMS/Cassini

S. Rodriguez

&

S. Le Mouélic, C. Sotin, P. Rannou, J. Burgalat, S. Lebonnois, B. Charnay

J.W. Barnes, C.A. Griffith, R.H. Brown

K.H. Baines, B.J. Buratti, R.N. Clark, P.D. Nicholson

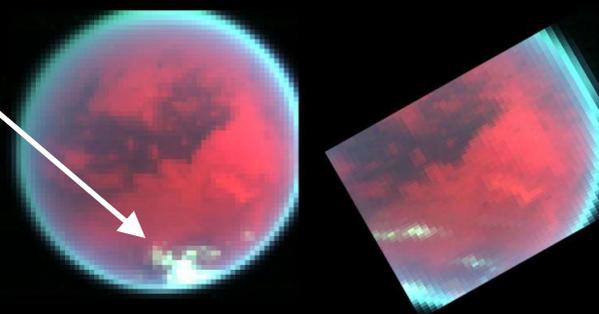
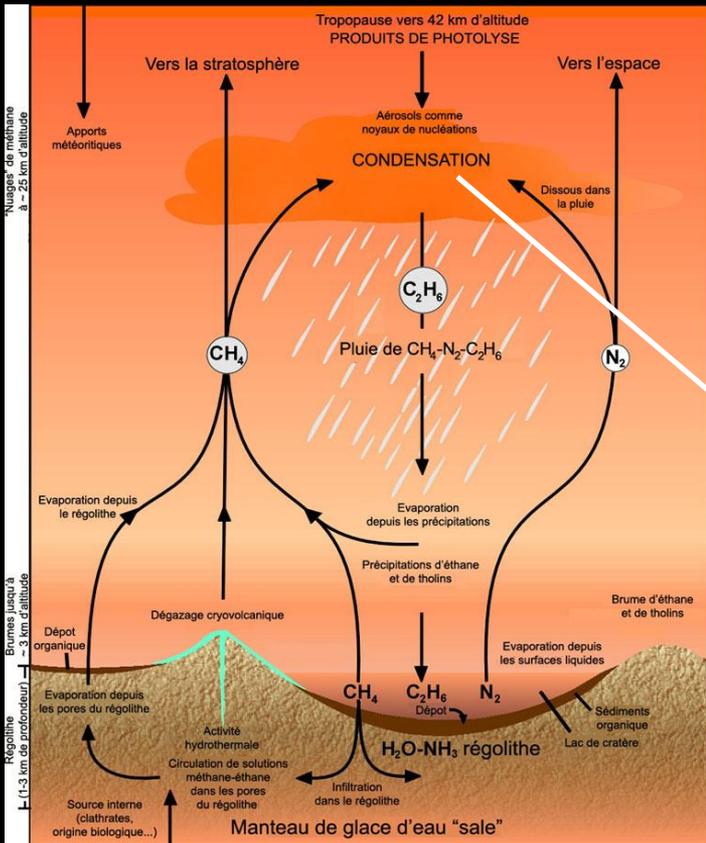


Titan et son atmosphère

© NASA/JPL/Space Science Institute



- le plus gros satellite de Saturne
- la seule lune du Système Solaire avec une **atmosphère dense**, de la **brume épaisse et étendue** et des **nuages**
- cycle d'hydrocarbures (évaporation, formation de nuages, pluies?, ...), saisonniers (7 ans) ?



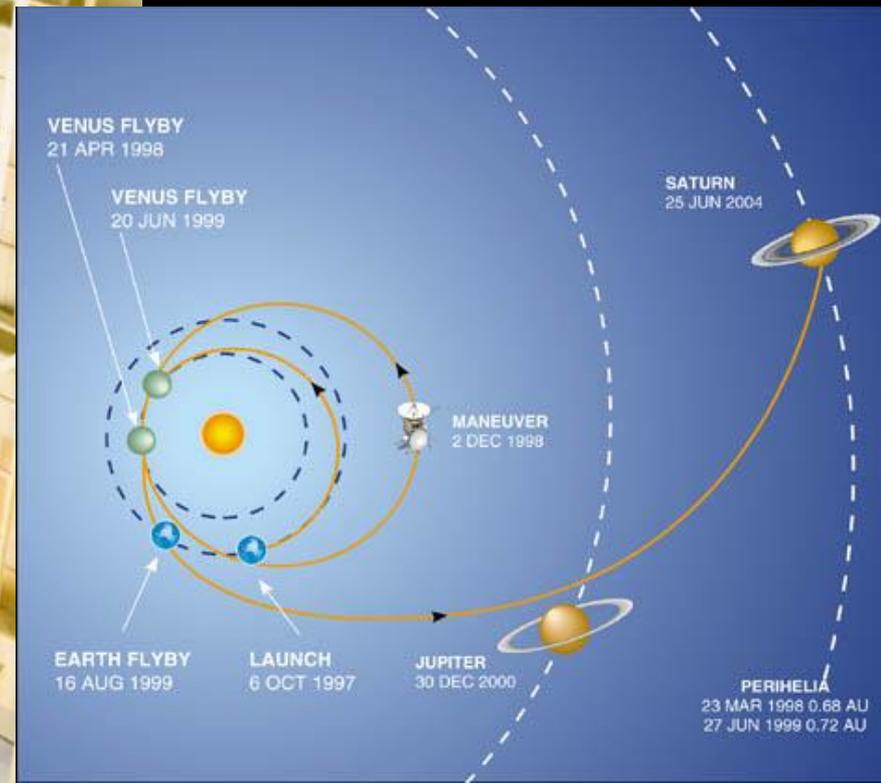
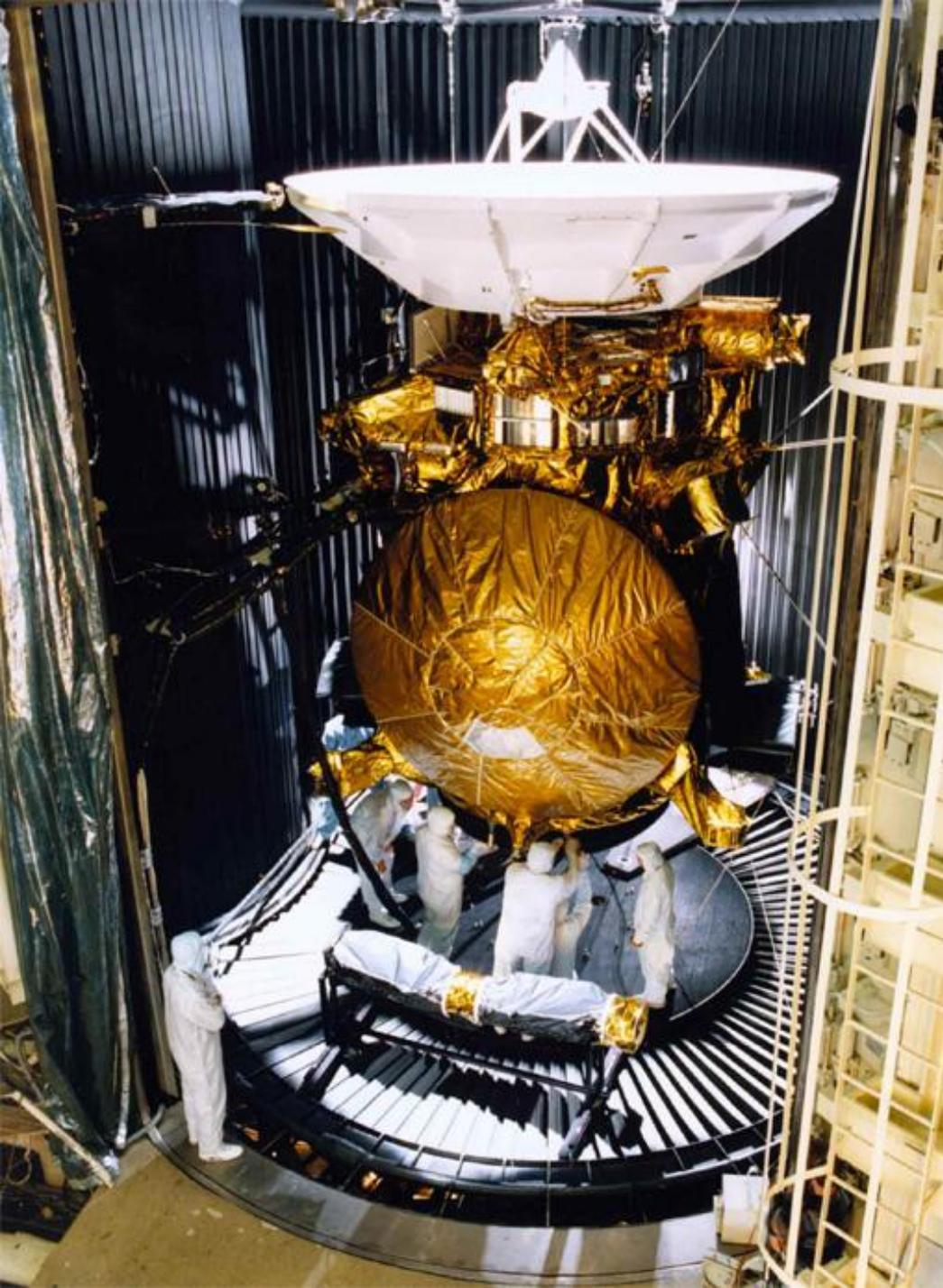
Cassini-Huygens

Remote
sensing

UVIS
ISS
VIMS
CIRS
RADAR
RSS

Fields, particles
and waves

CAPS
CDA
INMS
MAG
MIMI
RPWS

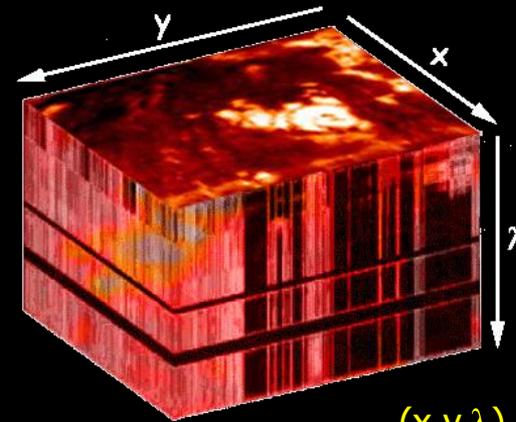


Visual and Infrared Mapping Spectrometer à bord de CASSINI

VIMS

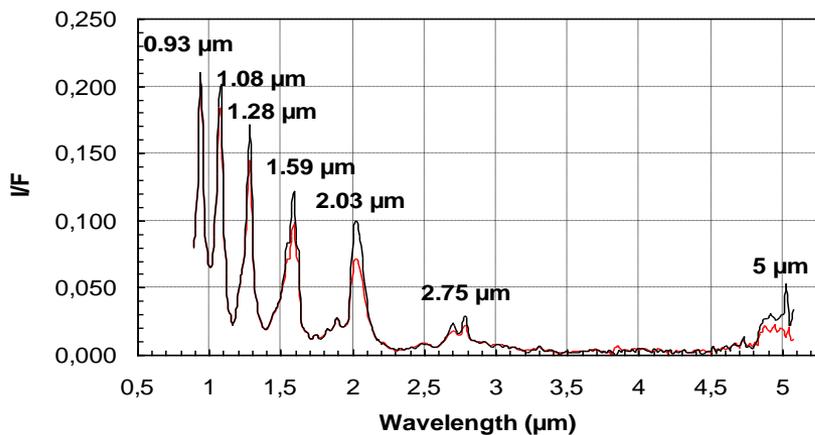
(Visual and Infrared Mapping Spectrometer)

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

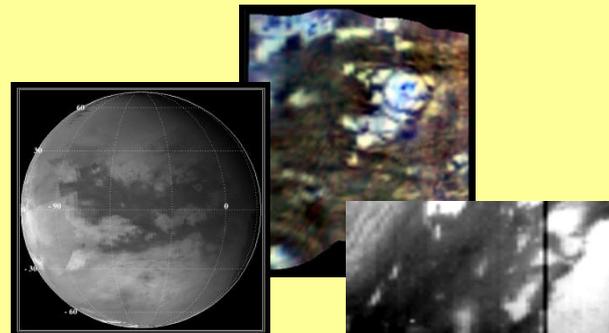
observant Titan ...



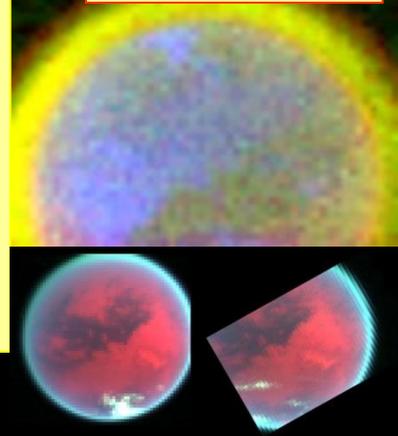
Spectres VIMS typiques de Titan

Surface : cartographie et analyse

- morphologie
- composition

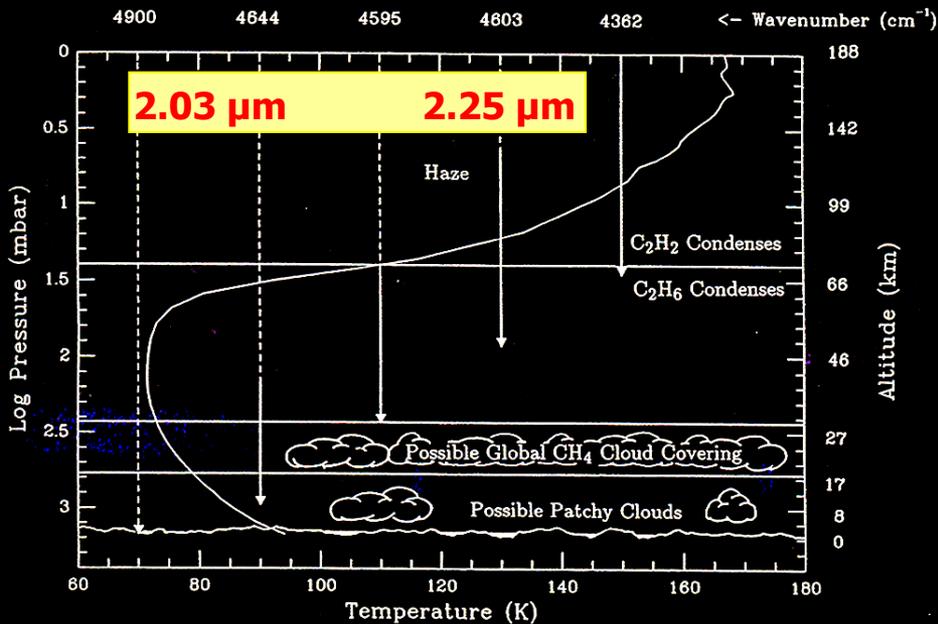


Suivi de phénomènes atmosphériques

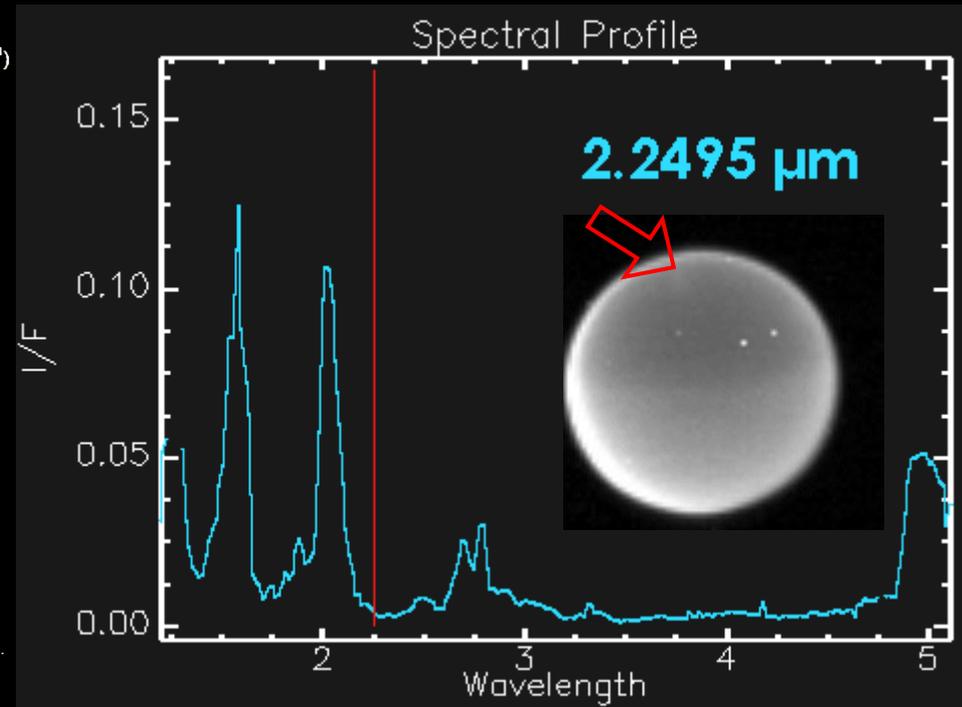


Observations IR de la basse atmosphere de Titan avec VIMS

canaux VIMS-IR : 256 bandes de 0.9 μm à 5.1 μm



(Griffith *et al.*, 1991)



- ⇒ Les nuages sont accessibles dans les ailes des fenêtres.
- ⇒ Ils intensifient le signal dans les fenêtres atmosphériques.

Détecter et cartographier les nuages de Titan avec VIMS

6 ans d'observation (entre T0 - juillet 2004 - et T67 - avril 2010) :

Nombre total de cubes VIMS > 19000

Peut être réduit à ~2000 spectro-images

⇒ Décorrélation : Nuages, surface et limbe

Choix d'une méthode semi-automatique de détection : utilisation des propriétés des nuages dans l'infrarouge proche (augmentation simultanée relative de la brillance des fenêtres à 2.75 et 5- μm)

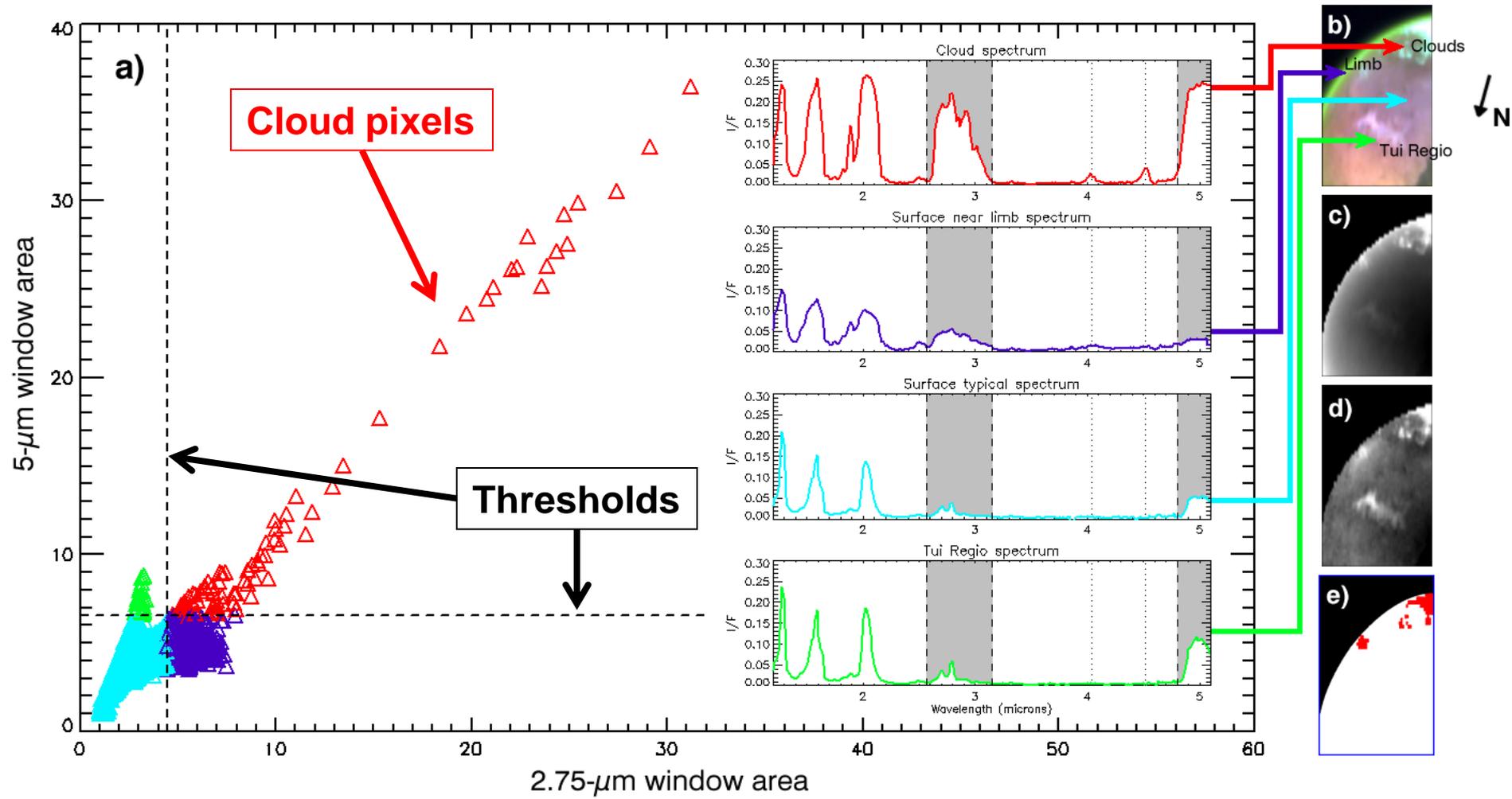
Méthode utilisée par Rodriguez *et al.* (2009) :

- Nuage de points : aires de la fenêtre à 5- μm vs. aires de la fenêtre à 2.75- μm
- Seuillage automatique pour isoler les pixels du pôle "nuage"
- Supervision finale des seuils pour corriger si besoin les détections
- Reprojection des pixels "nuages"

avec quelques améliorations :

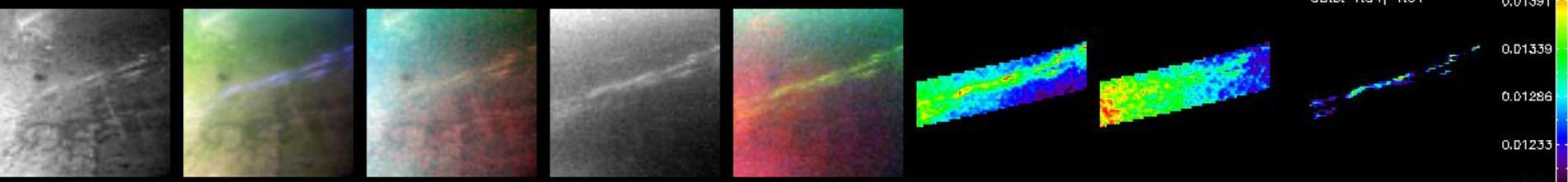
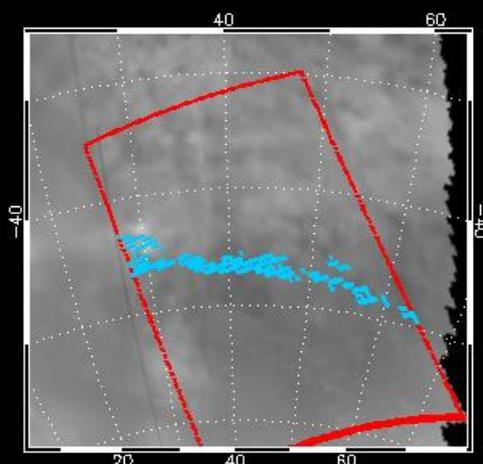
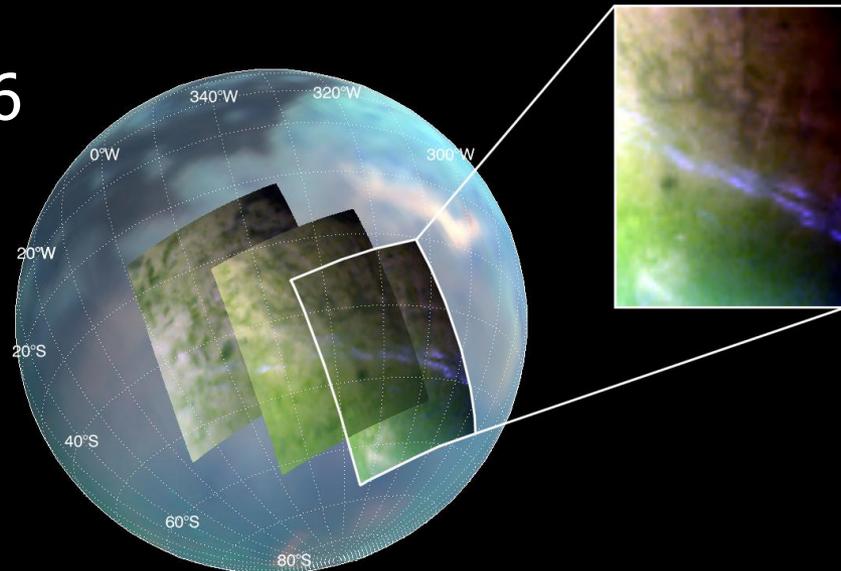
- Possibilité de définir des ROI dans les images VIMS
- Masquage du limbe pour améliorer la sensibilité (nuages peu brillants)
- Utilisation de la bande à 2.1 μm image comme référence

Détecter et cartographier les nuages de Titan avec VIMS



7 sept. 2006

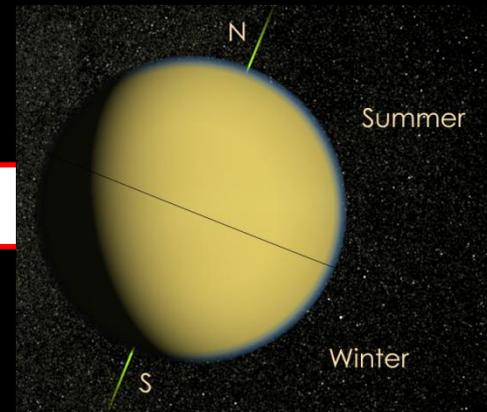
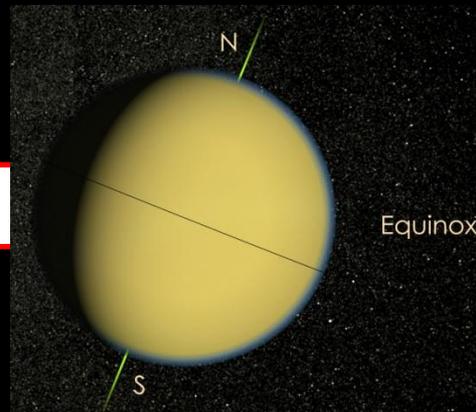
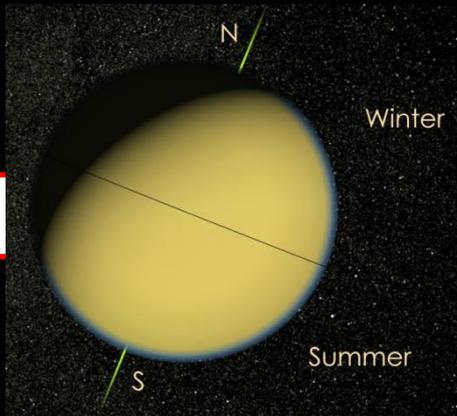
red = 2- μ m
 green = 1.6- μ m
 blue = 2.7- μ m



S23 T17 64x64 S23\cubes\HIGHRESNA001\1536358270_1.nav dist= 30353 to 27304 km. 80 ms. phase= 57 to 59°

Cartographie globale

juillet 2004 - déc. 2007 : légère amélioration des détections de Rodriguez et al. (2009)
déc. 2007 - avril 2010 : nouvelles détections



Cartographie globale

juillet 2004 - déc. 2007 : légère amélioration des détections de Rodriguez et al. (2009)
déc. 2007 - avril 2010 : nouvelles détections

T0



Rodriguez et al., 2009

T38



29 survols

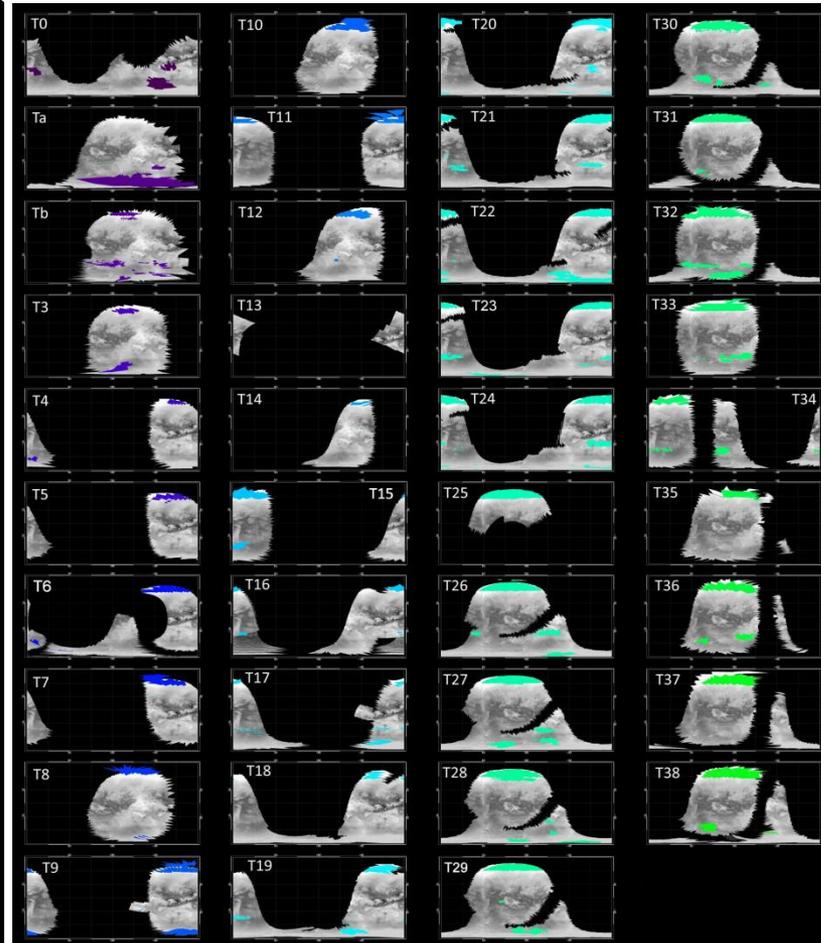


T67



July 04 Jan 05 July 05 Jan 06 July 06 Jan 07 July 07 Jan 08 July 08 Jan 09 July 09 Jan 10 July 10

Equinox



Cartographie globale

juillet 2004 - déc. 2007 : légère amélioration des détections de Rodriguez et al. (2009)
déc. 2007 - avril 2010 : nouvelles détections

T0



Rodriguez et al., 2009

T38



29 survols

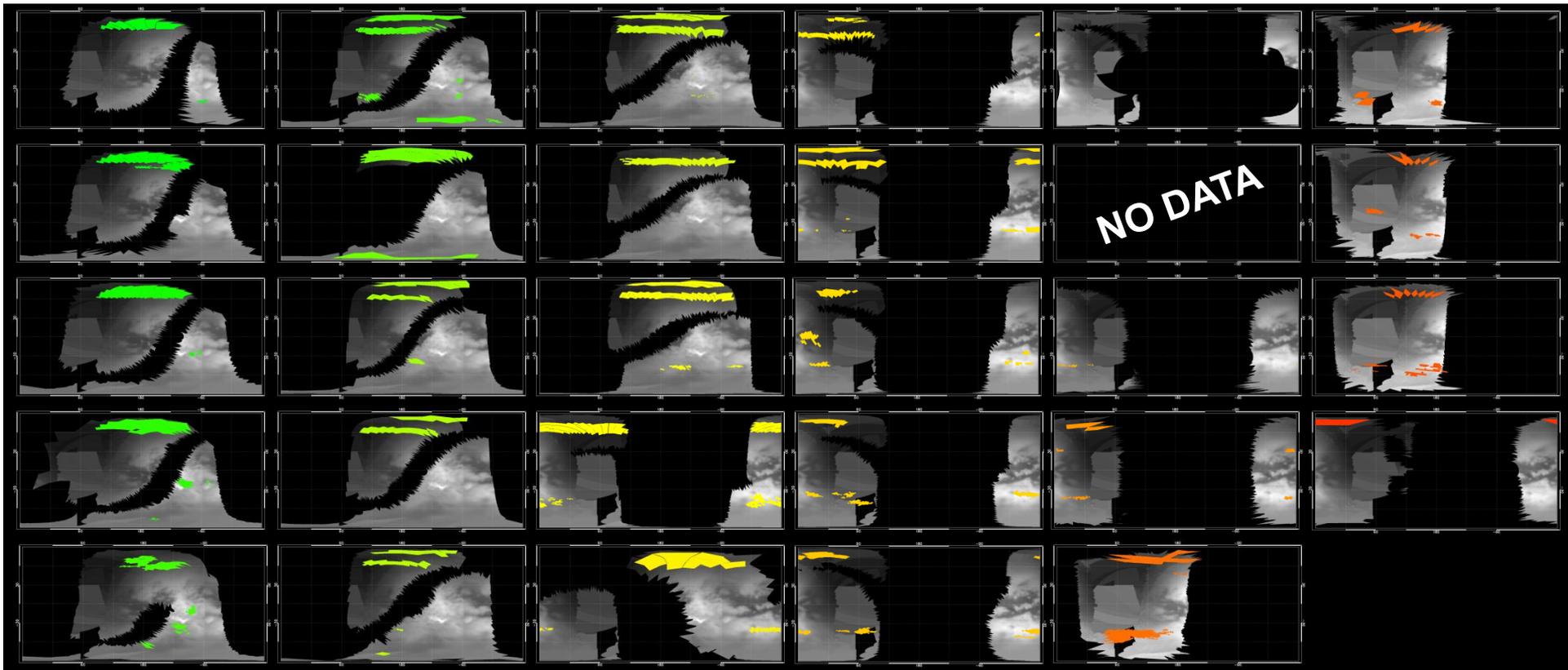


T67



July 04 Jan 05 July 05 Jan 06 July 06 Jan 07 July 07 Jan 08 July 08 Jan 09 July 09 Jan 10 July 10

Equinox



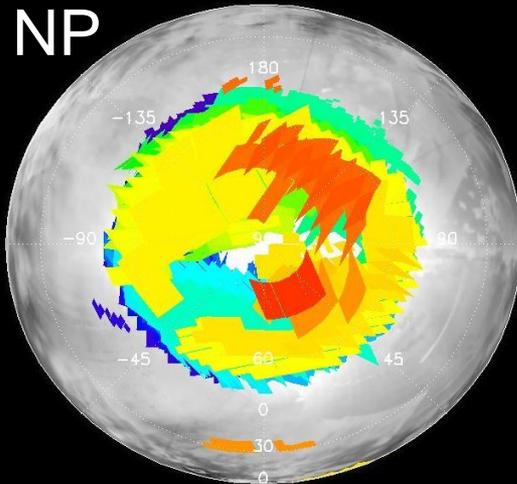
Compilation des six années d'observations VIMS

Cartographie globale de T0 (juillet 2004) à T67 (avril 2010)

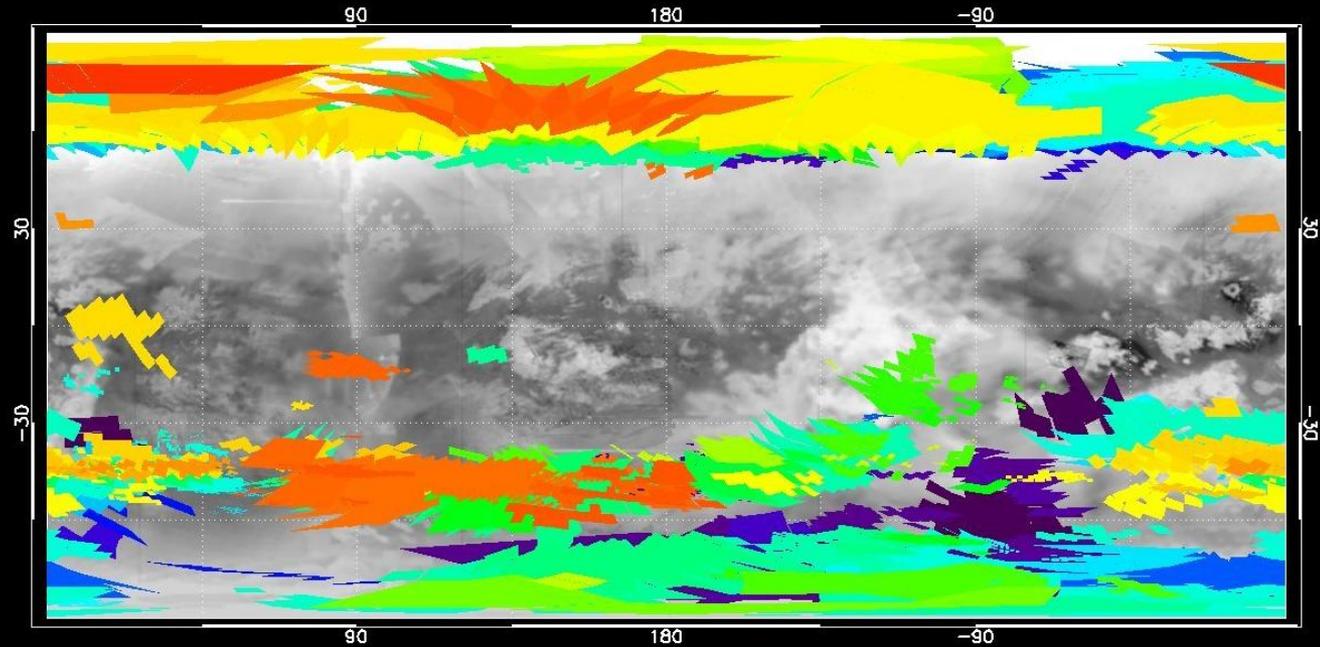
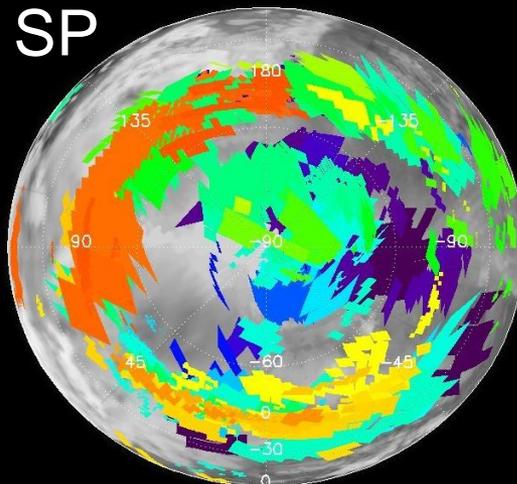
67 survols

July 04 Jan 05 July 05 Jan 06 July 06 Jan 07 July 07 Jan 08 July 08 Jan 09 July 09 Jan 10 July 10

NP



SP



Compilation des six années d'observations VIMS

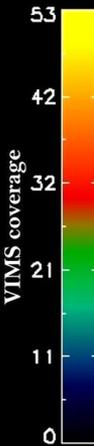
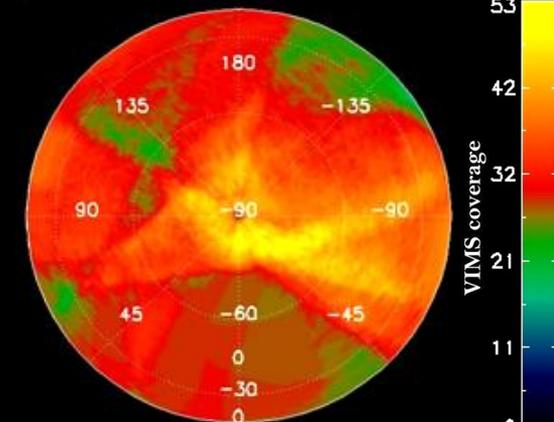
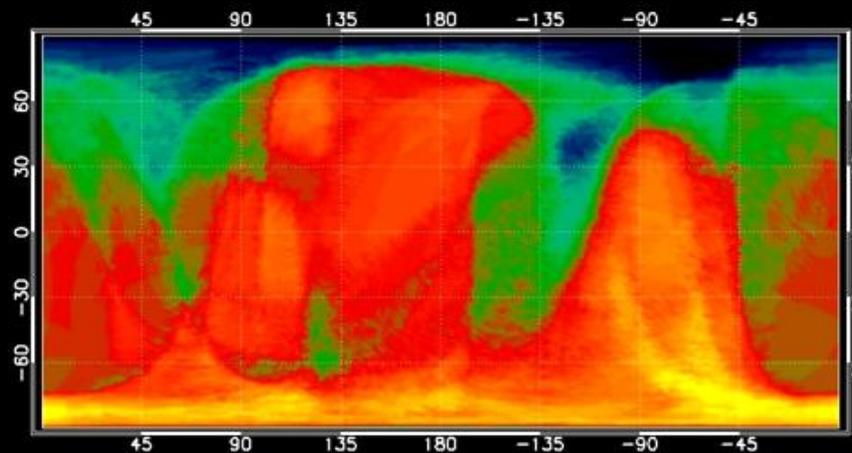
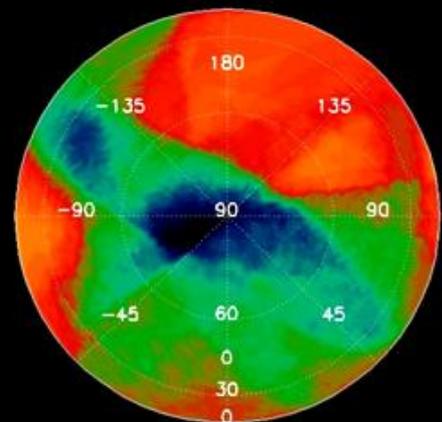
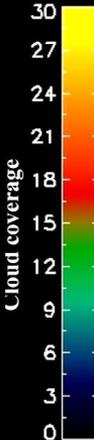
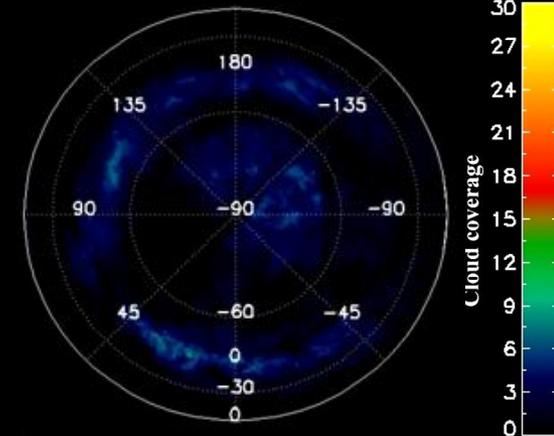
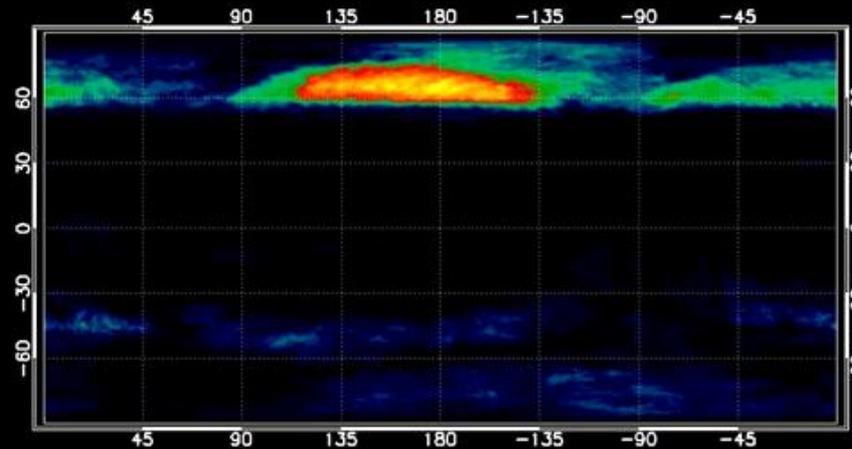
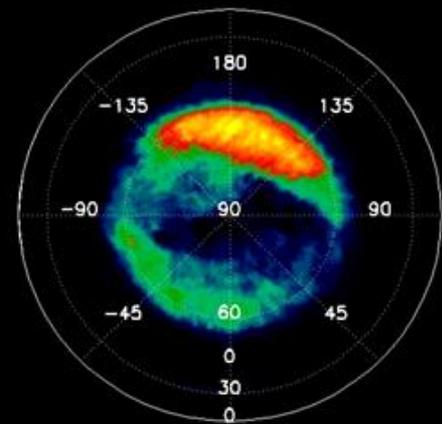
Cartographie globale de T0 (juillet 2004) à T67 (avril 2010)

67 survols

July 04 Jan 05 July 05 Jan 06 July 06 Jan 07 July 07 Jan 08 July 08 Jan 09 July 09 Jan 10 July 10

NP

SP



Pourcentage de couverture nuageuse - VIMS entre T0 (juillet 2004) et T67 (avril 2010)

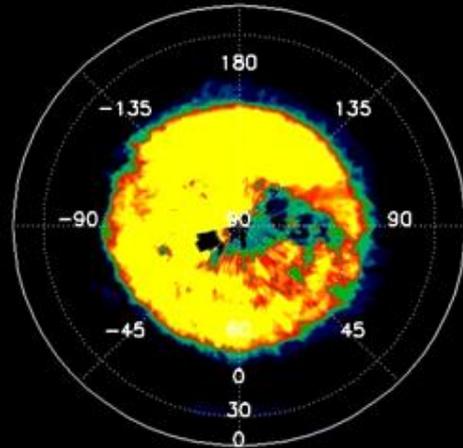
67 survols



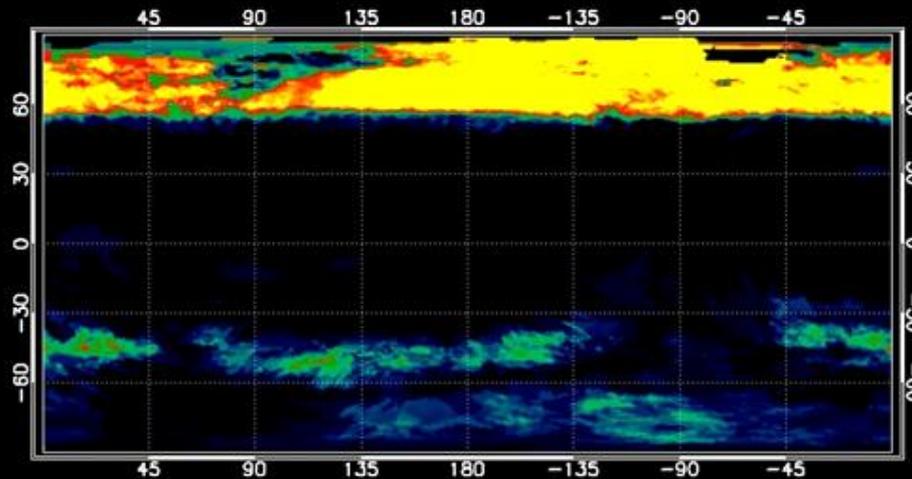
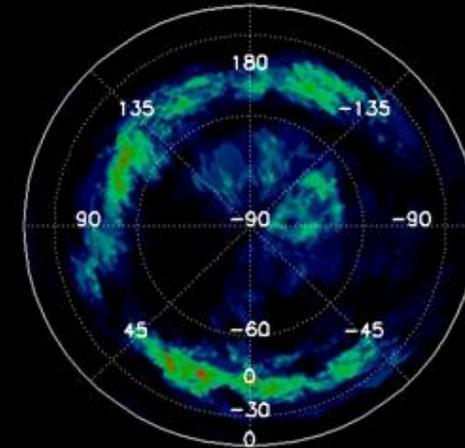
Fractional cloud coverage



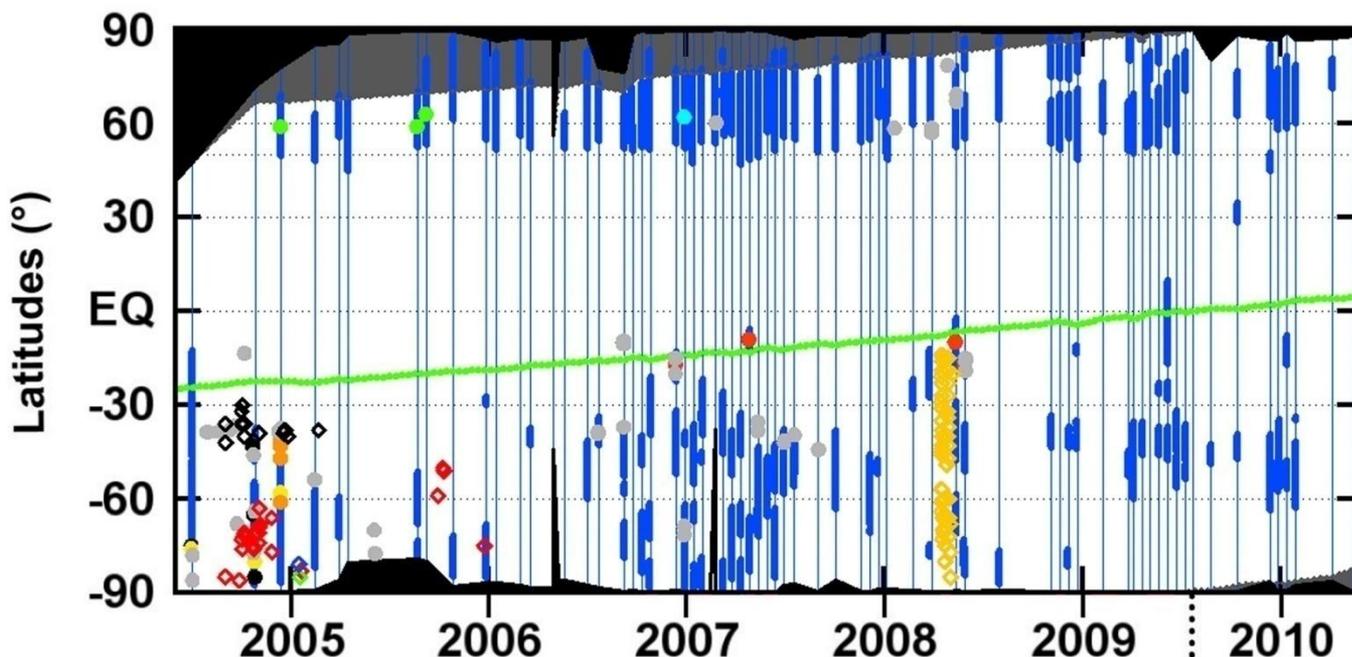
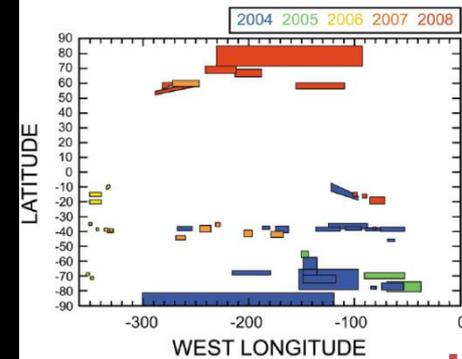
NP



SP



Evolution de la couverture nuageuse entre T0 (juillet 2004) et T67 (avril 2010)



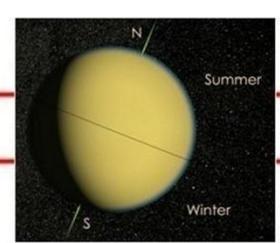
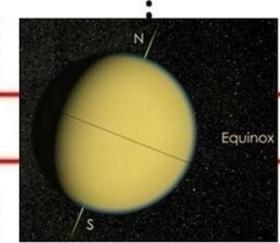
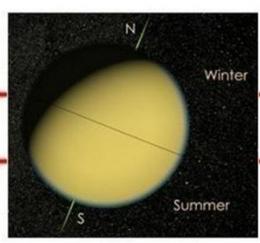
Nightside
 Not observed by VIMS
 Sub-solar point

Cassini:

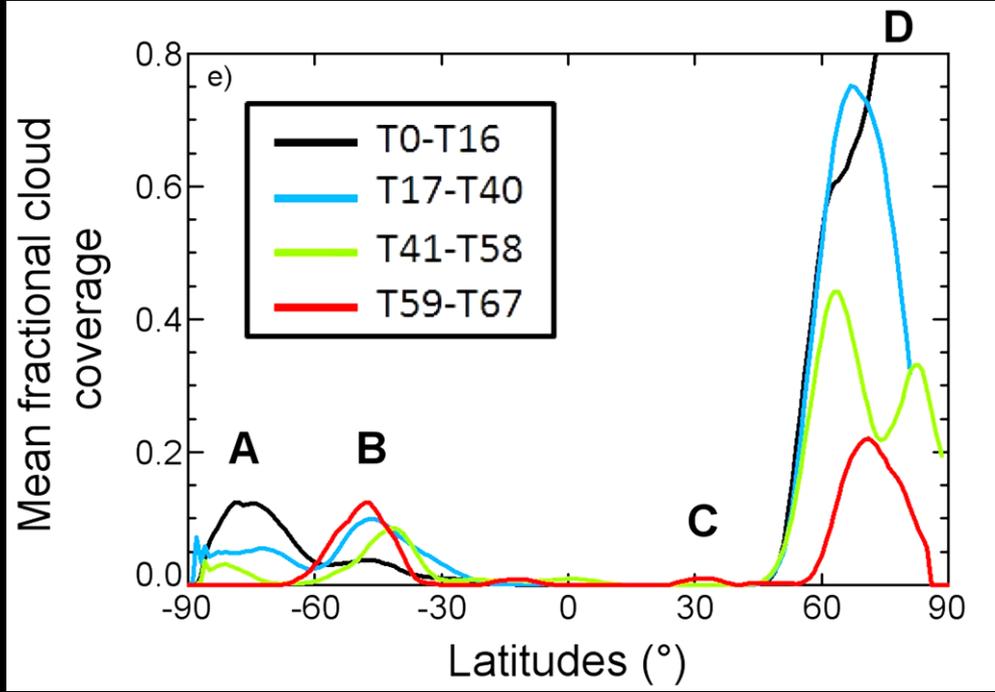
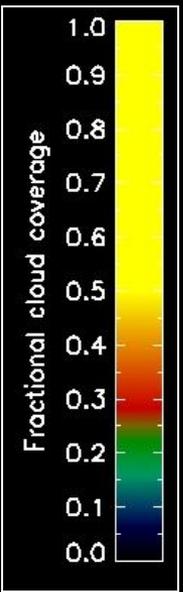
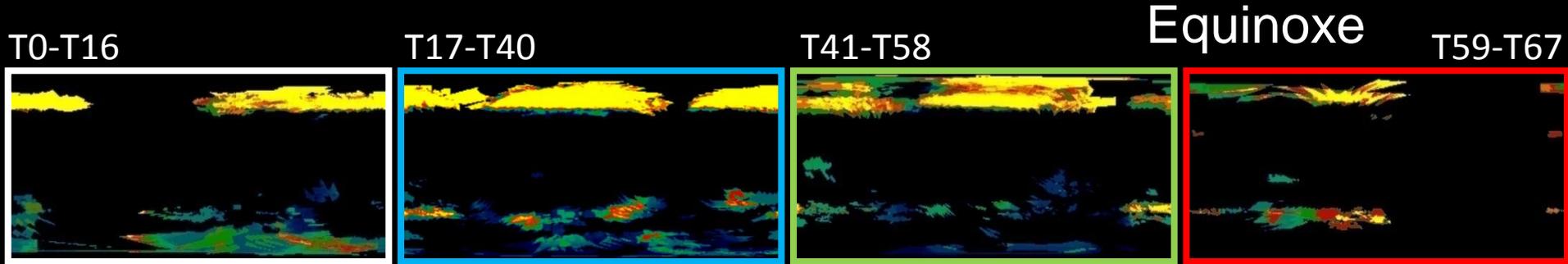
- ISS: Porco et al. (2005)
- VIMS: Baines et al. (2005)
- VIMS: Griffith et al. (2005)
- VIMS: Griffith et al. (2006)
- VIMS: Le Mouélic et al. (2008)
- VIMS: Griffith et al. (2009)
- ISS: Turtle et al. (2009)
- VIMS: Rodriguez et al. (2009) and this study

Earth-based:

- ◇ Roe et al. (2005b)
- ◇ Schaller et al. (2006b)
- ◇ de Pater et al. (2006)
- ◇ Hirtzig et al. (2006)
- ◇ Schaller et al. (2009)



Evolution du pourcentage de couverture (4 périodes)

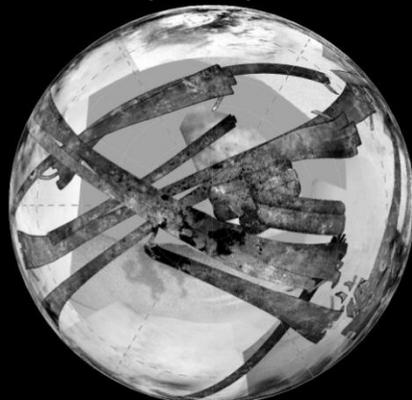


A. & D. Déclin progressif de l'activité nuageuse aux 2 pôles

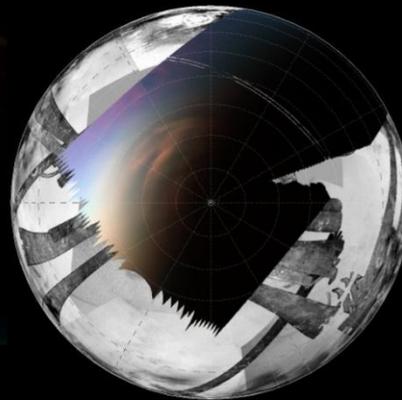
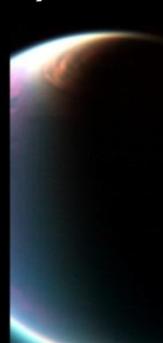
B. Activité constante aux latitudes tempérées sud

C. Premiers nuages aux latitudes tempérées nord (juste après l'équinoxe)

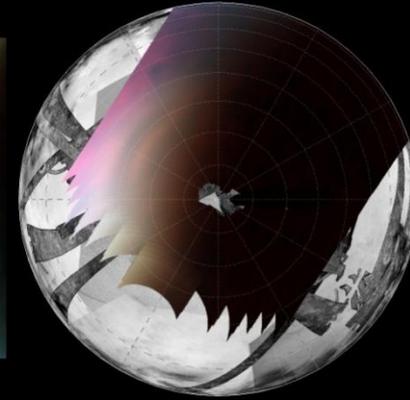
(Le Mouélic *et al.*, PSS, en révision)



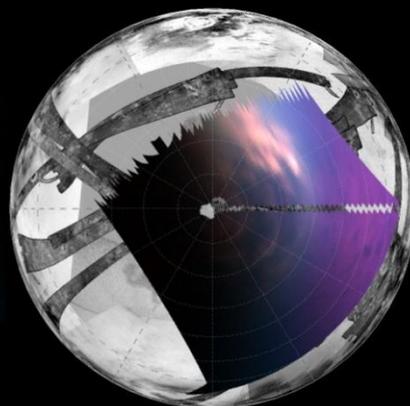
ISS+SAR



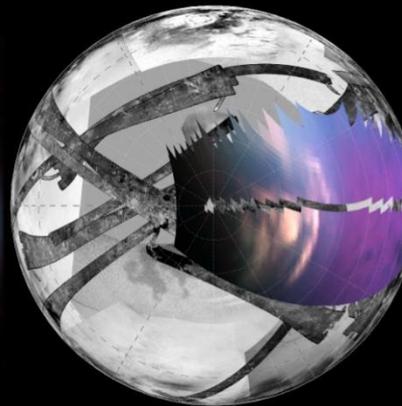
22 December 2006 (T22)



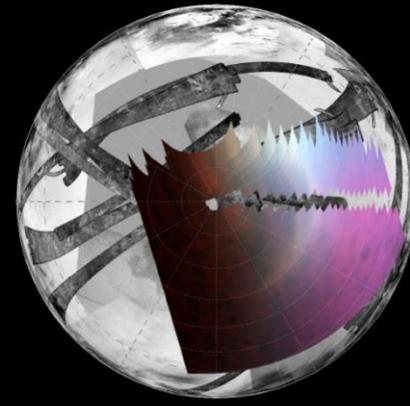
13 January 2007 (T23)



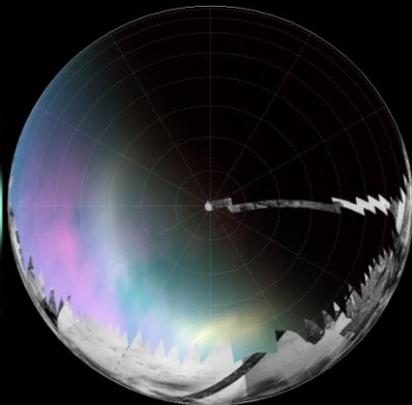
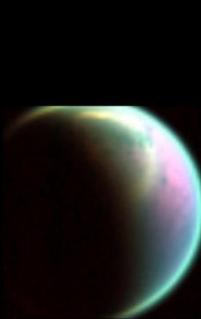
26 March 2008 (T42)



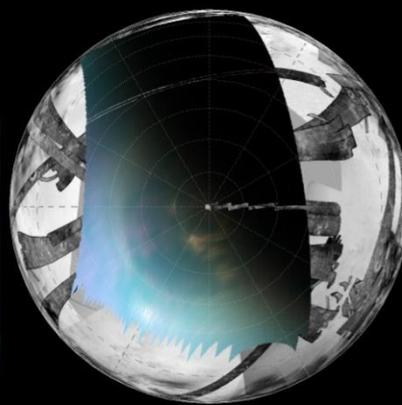
12 May 2008 (T43)



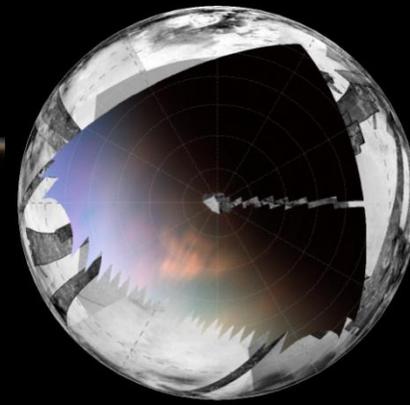
28 May 2008 (T44)



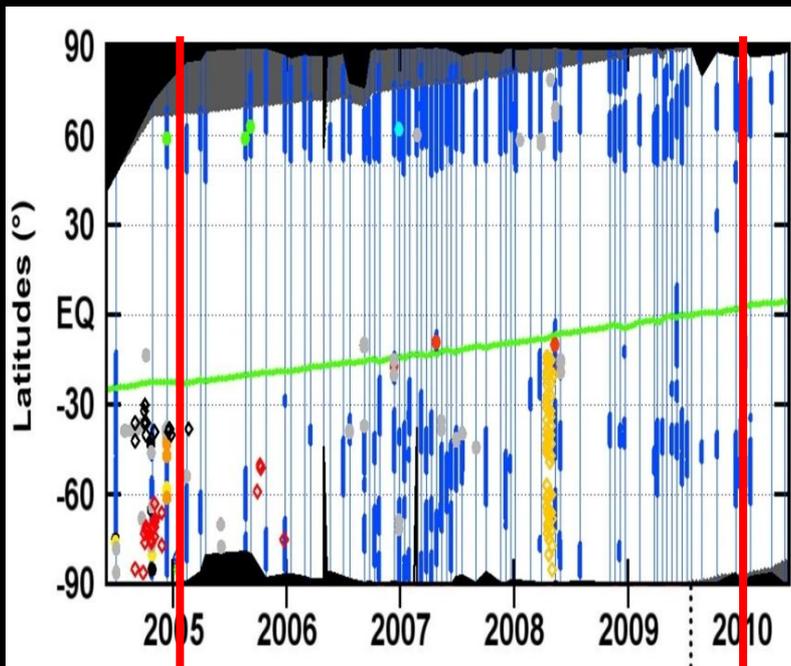
3 April 2009 (T52)



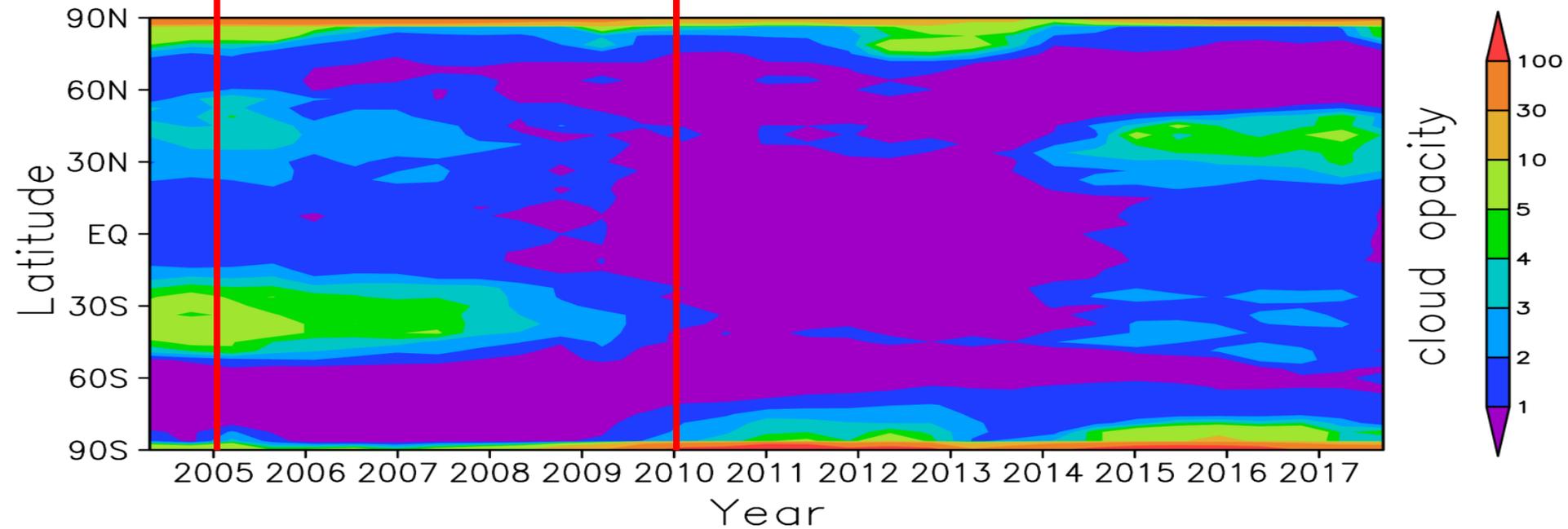
5 May 2009 (T54)



6 June 2009 (T56)



(Rannou *et al.*, Science, 2006)



Conclusions

Circulation générale :

La distribution en latitudes des nuages et son évolution dans le temps sont d'excellents traceurs de la circulation générale

6 ans d'observations VIMS (mi-hiver au début printemps nord) : baisse notable de l'activité nuageuse (mais retardée vis à vis des prédictions GCM)

A la fin de l'été sud et quelques mois après l'équinoxe (août 2009) :

- Latitudes tempérées sud : nuages toujours actifs et accrochés à $\sim 40^{\circ}\text{S}$
- 2 pôles : évidences nettes de l'arrêt de l'activité nuageuse (telle que connues lors de l'été sud)
- Tropiques : quelques rares orages (HS), plus fréquents à l'approche de l'équinoxe
- Latitudes tempérées nord : Premières détections !

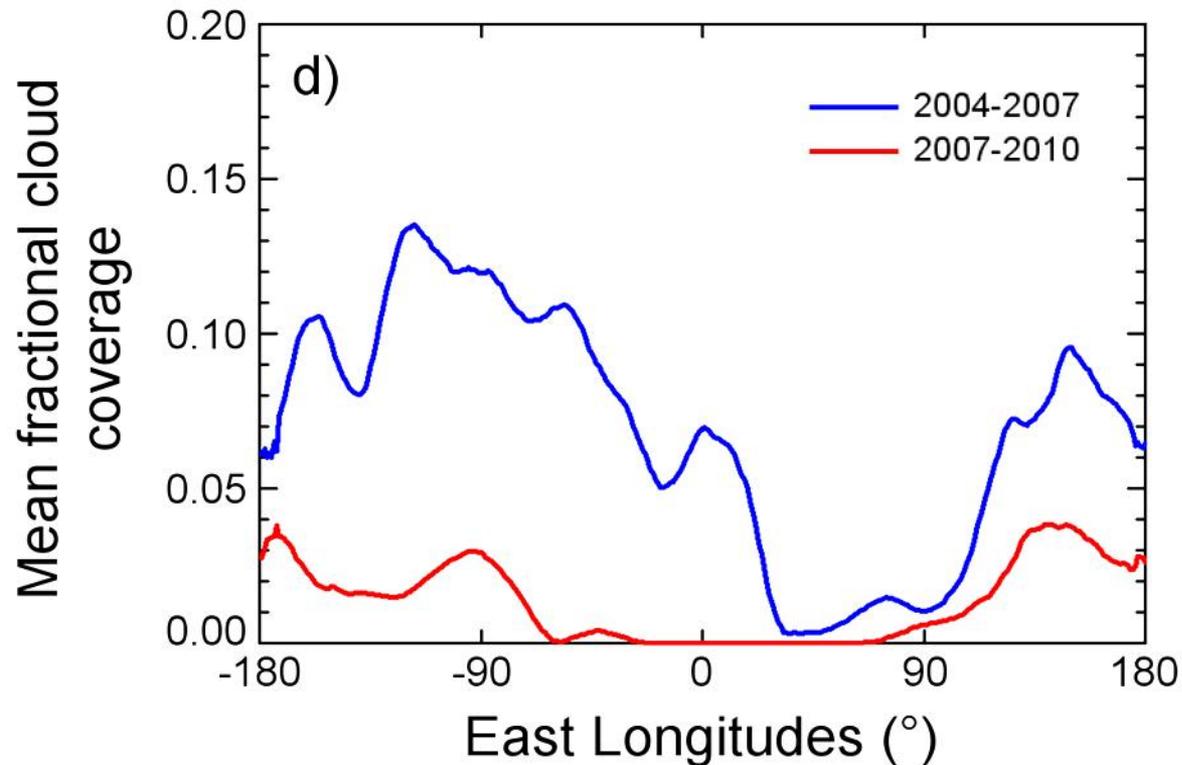
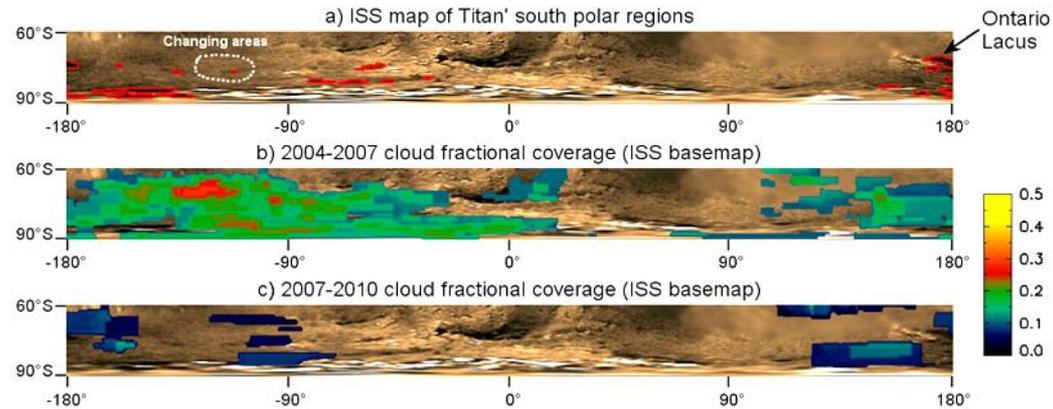
⇒ La circulation pôle-pôle est en train de s'arrêter et se prépare à s'inverser, avec apparemment un déplacement **subit** de l'activité nuageuse vers l'hémisphère nord (Cassini solstice mission – 2017)

Perspectives

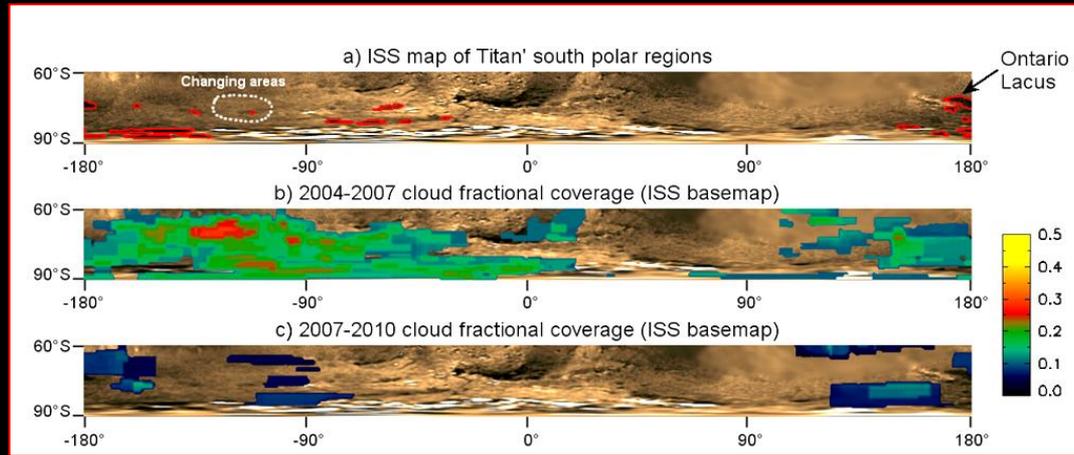
1. Continuer les observations : pendant le printemps ?
2. Améliorer la technique de détection : BPSS
3. Caractériser les propriétés physiques des nuages détectés : RT
4. Travailler à l'amélioration des GCMs (troposphère) et à la meilleure compréhension des cycles saisonniers des hydrocarbures

Suppléments

Distribution en longitudes – Pôles sud



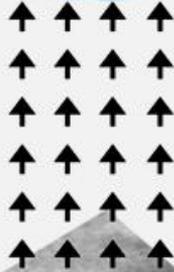
Distribution en longitudes – Pôle sud



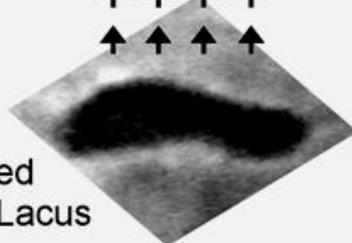
Mean annual
Eastward winds



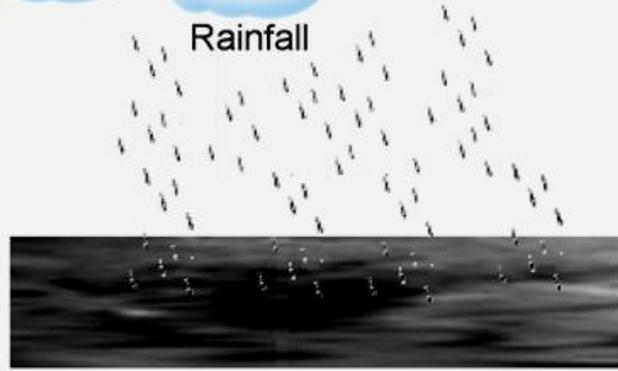
Evaporation
during summer



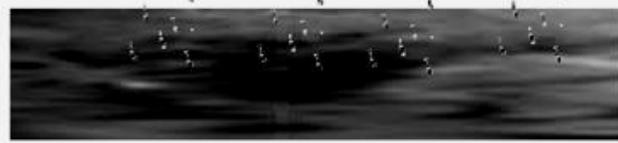
Long-lived
Ontario Lacus



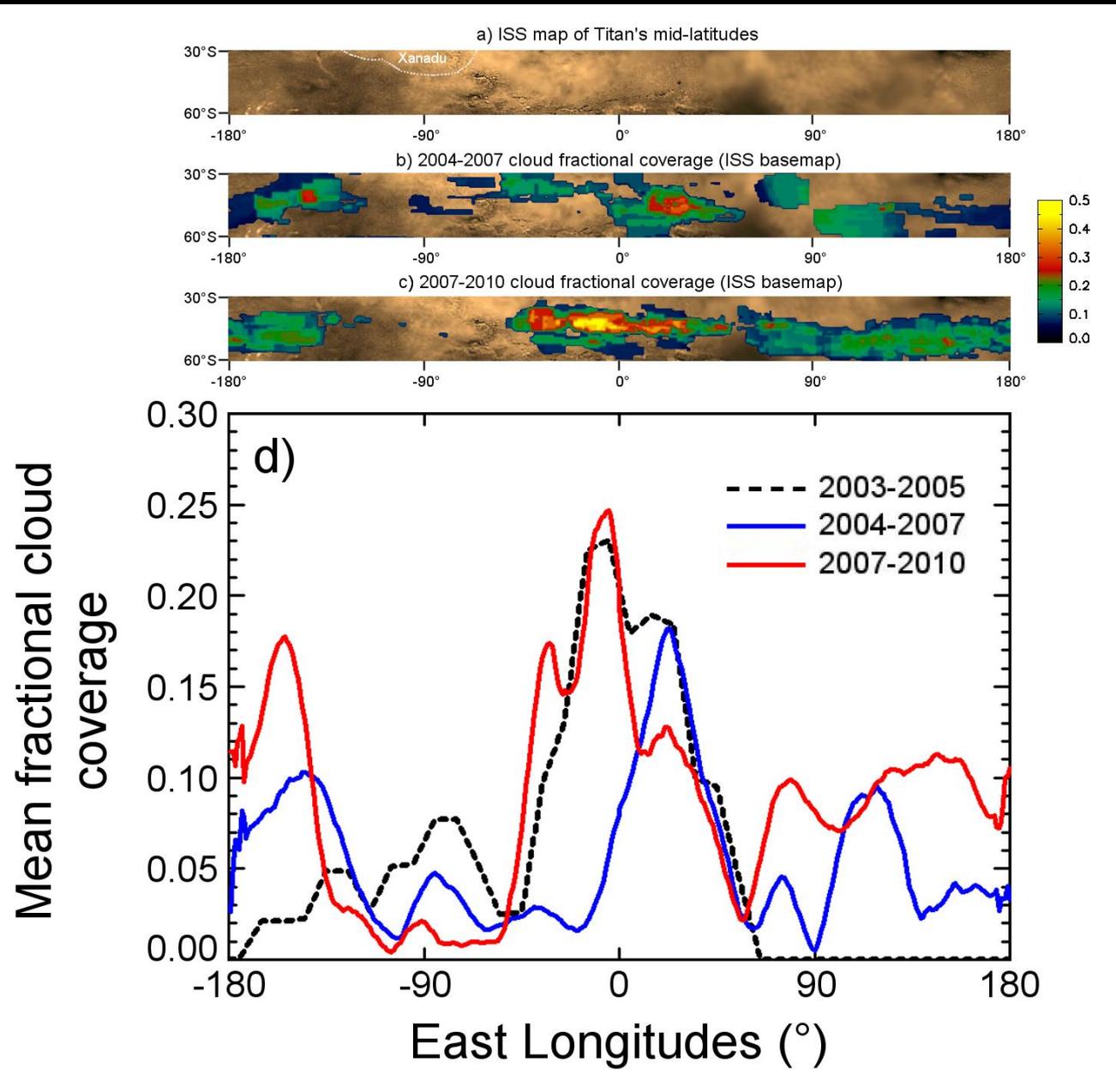
Rainfall



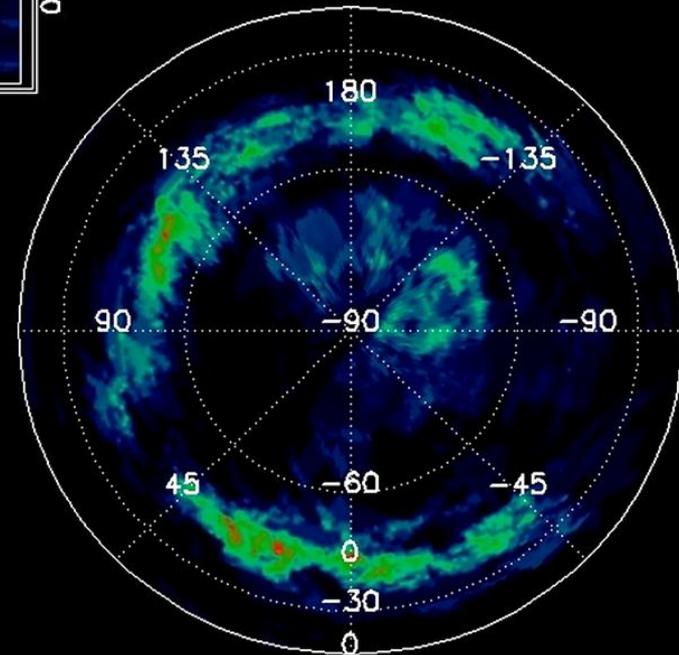
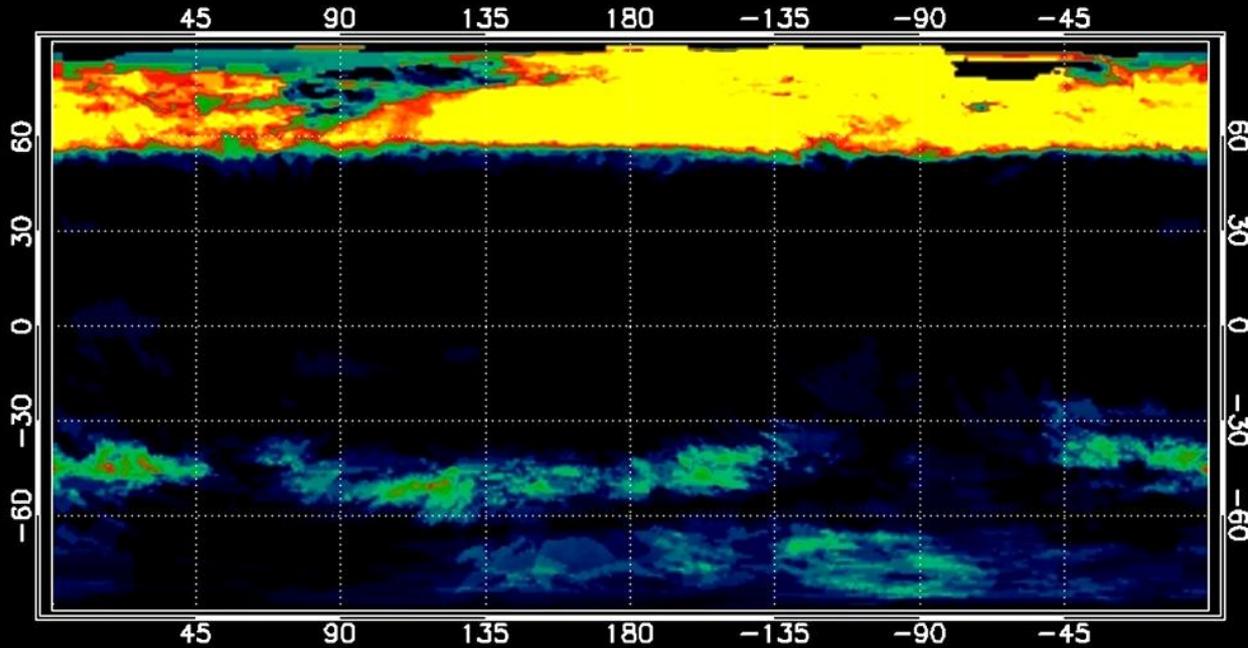
Seasonal
lakes and ponds



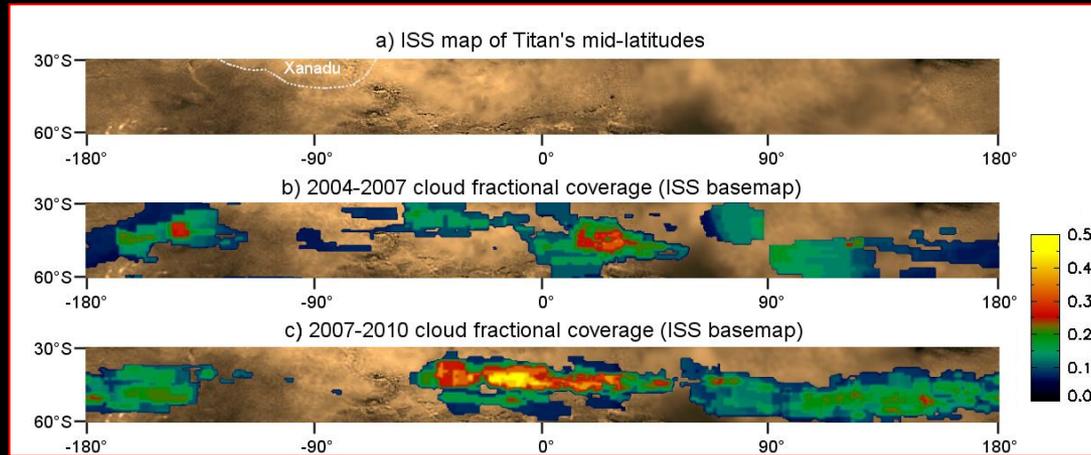
Distribution en longitudes – Latitudes tempérées sud



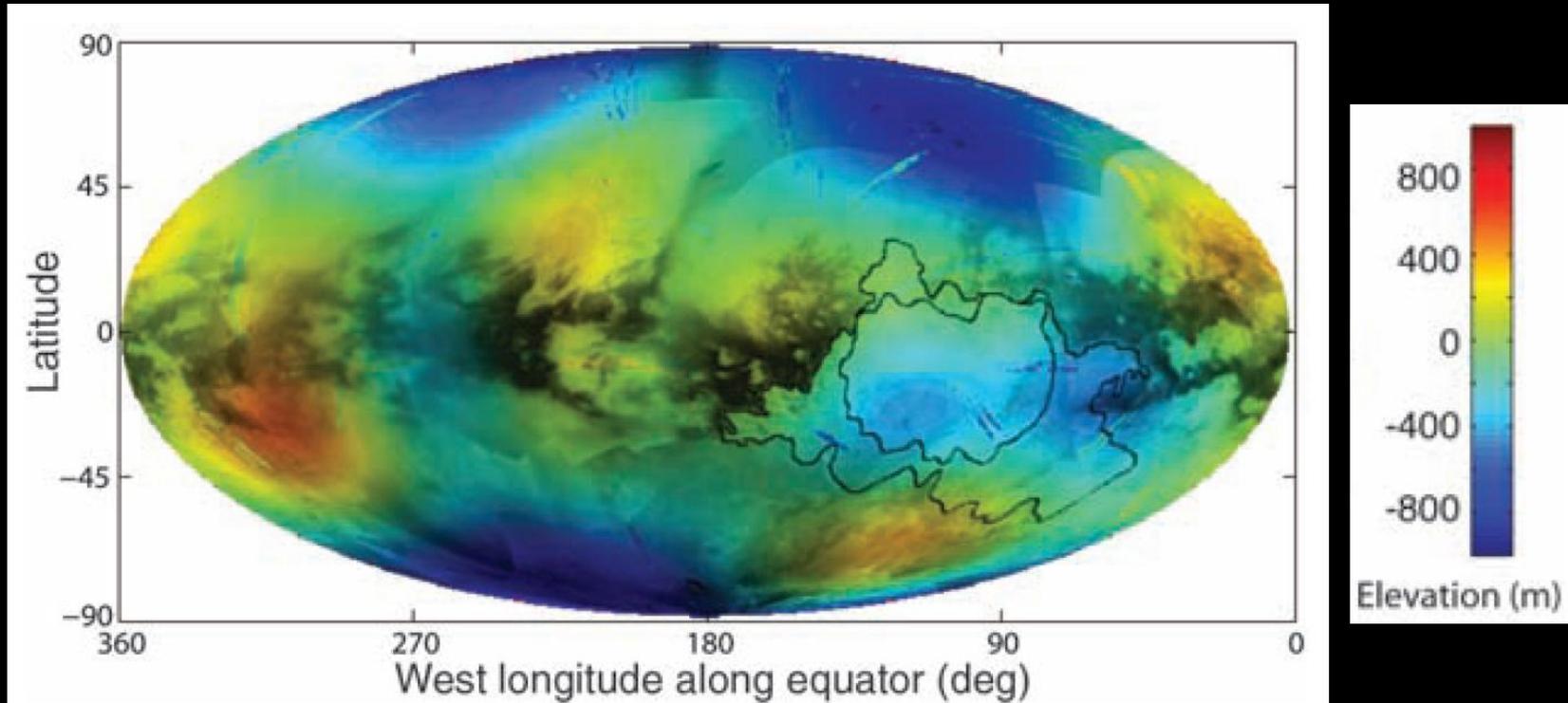
Distribution en longitudes – Latitudes tempérées sud



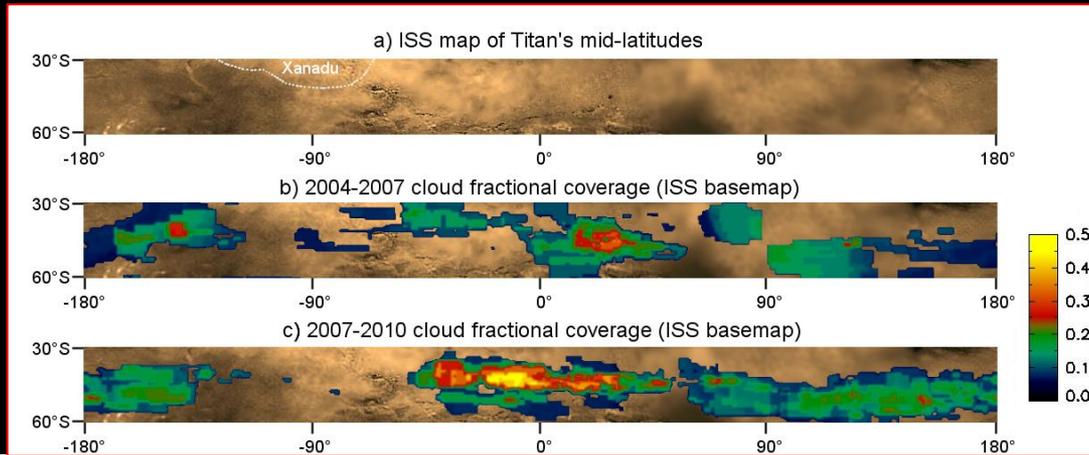
Distribution en longitudes – Latitudes tempérées sud



Zebker et al.
(2009)



Distribution en longitudes – Latitudes tempérées sud



Tokano (2008)

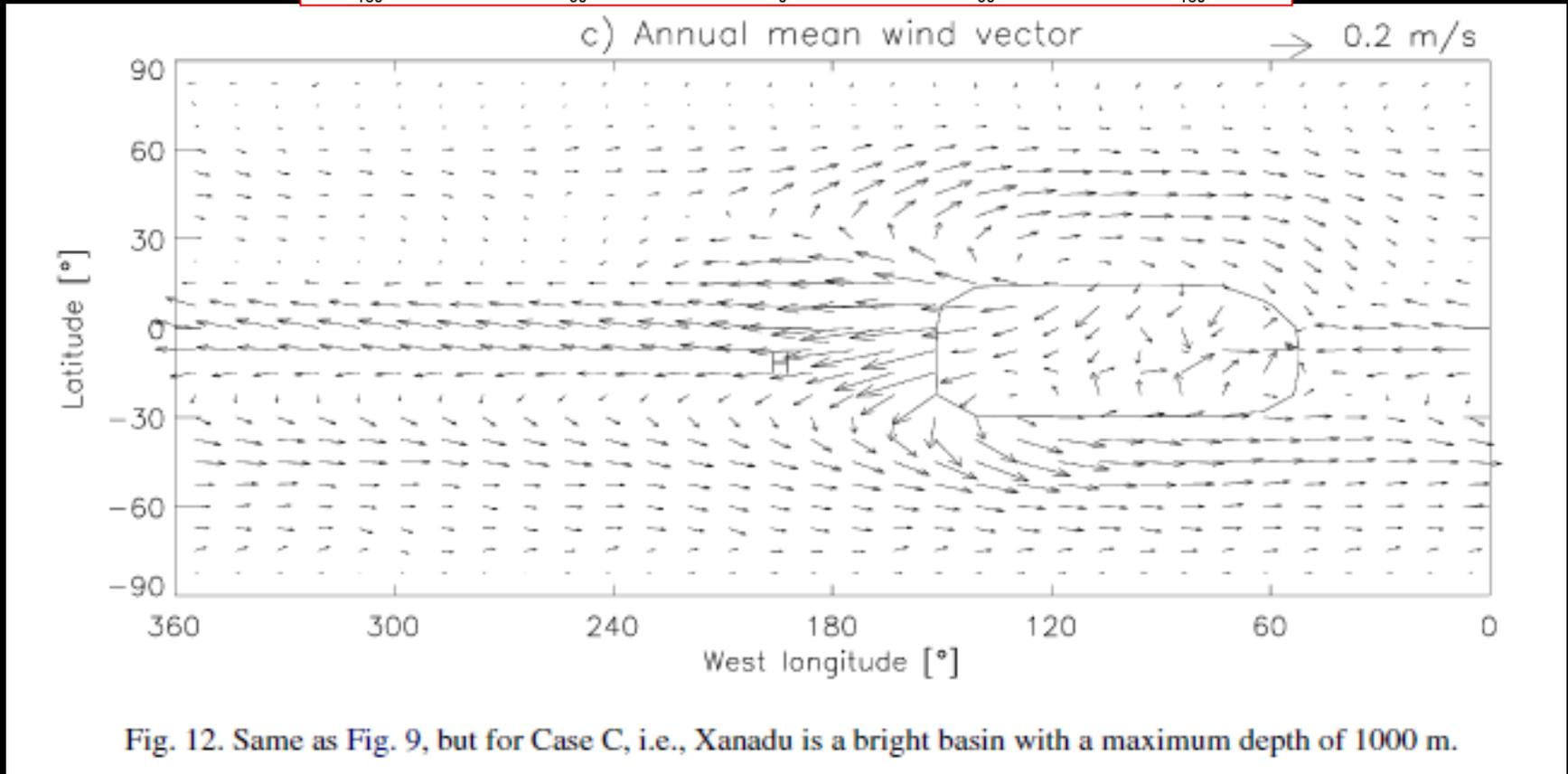


Fig. 12. Same as Fig. 9, but for Case C, i.e., Xanadu is a bright basin with a maximum depth of 1000 m.

Conclusions

1. Circulation générale :

La distribution en latitudes des nuages et son évolution dans le temps sont d'excellents traceurs de la circulation générale

6 ans d'observations VIMS (mi-hiver au début printemps nord) : baisse notable de l'activité nuageuse (**mais retardée vis à vis des prédictions GCM**)

A la fin de l'été sud et quelques mois après l'équinoxe (août 2009) :

- Latitudes tempérées sud : nuages toujours actifs et accrochés à $\sim 40^\circ\text{S}$
- 2 pôles : évidences nettes de l'arrêt de l'activité nuageuse (telle que connues lors de l'été sud)
- Tropiques : quelques rares orages (HS), plus fréquents à l'approche de l'équinoxe
- Latitudes tempérées nord : Premières détections !

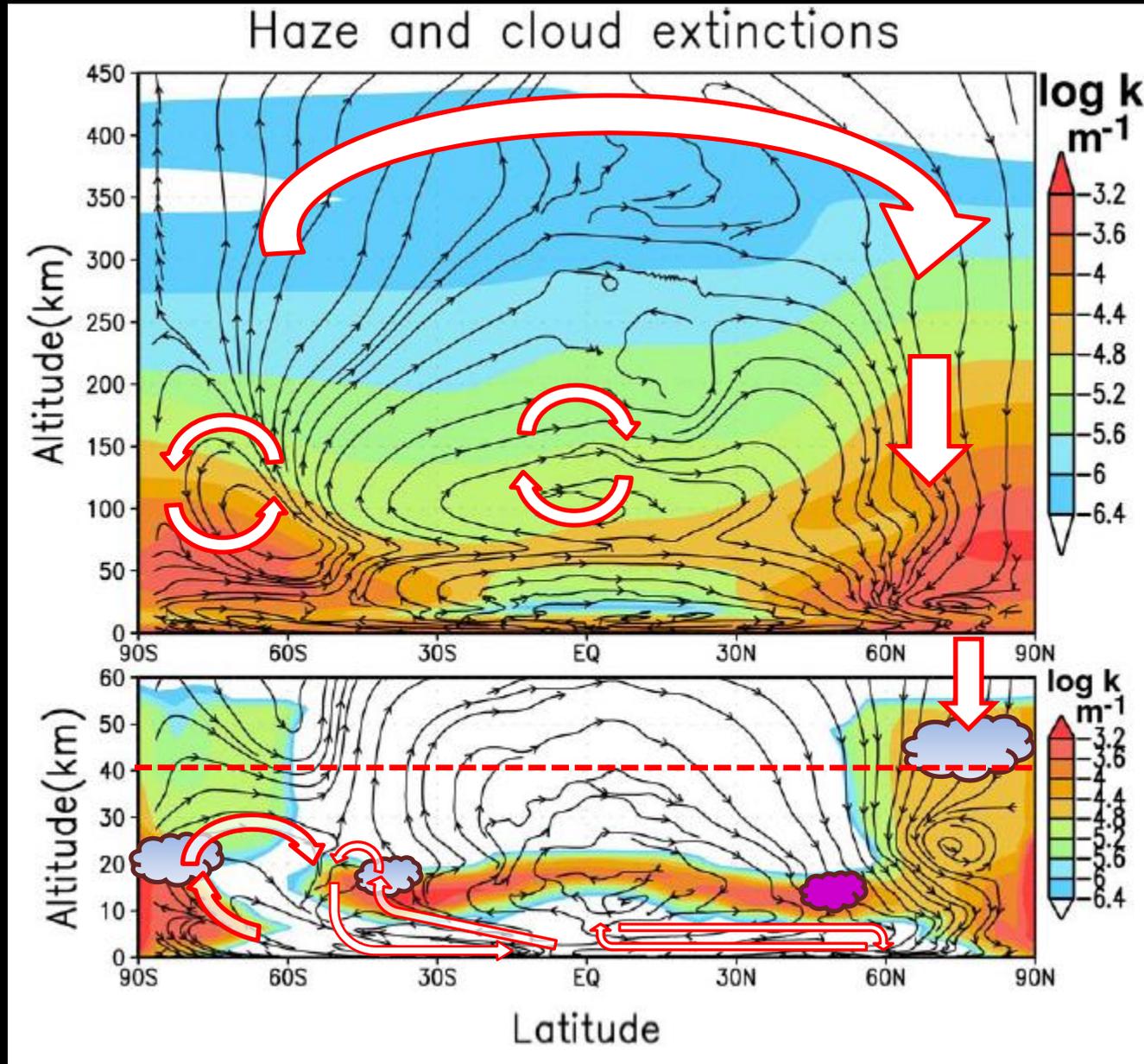
⇒ La circulation pôle-pôle est en train de s'arrêter et se prépare à s'inverser, avec apparemment un déplacement **subit** de l'activité nuageuse vers l'hémisphère nord (Cassini solstice mission – 2017)

2. Interactions surface/atmosphère et Saturne/atmosphère :

- rôle « catalyseur » du lac Ontario au pôle sud ?
- effet des forces de marée de Saturne sur la distribution en longitude des nuages ?
- perturbation à grande échelle de l'activité nuageuse par Xanadu ?

Les Modèles de Circulation Générale pour Titan

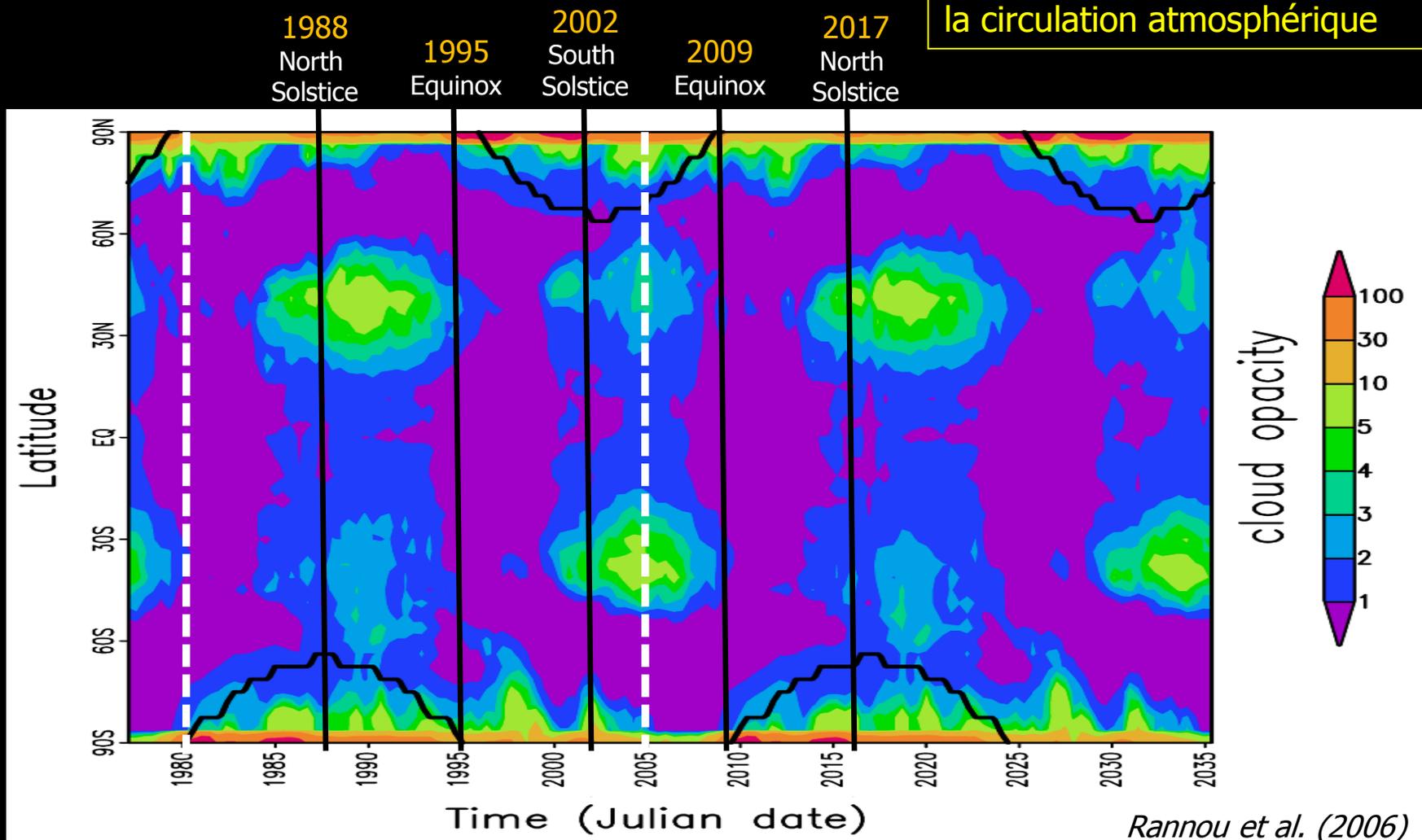
Circulation méridionale prédite ~2005 (Rannou et al., Science, 2006)

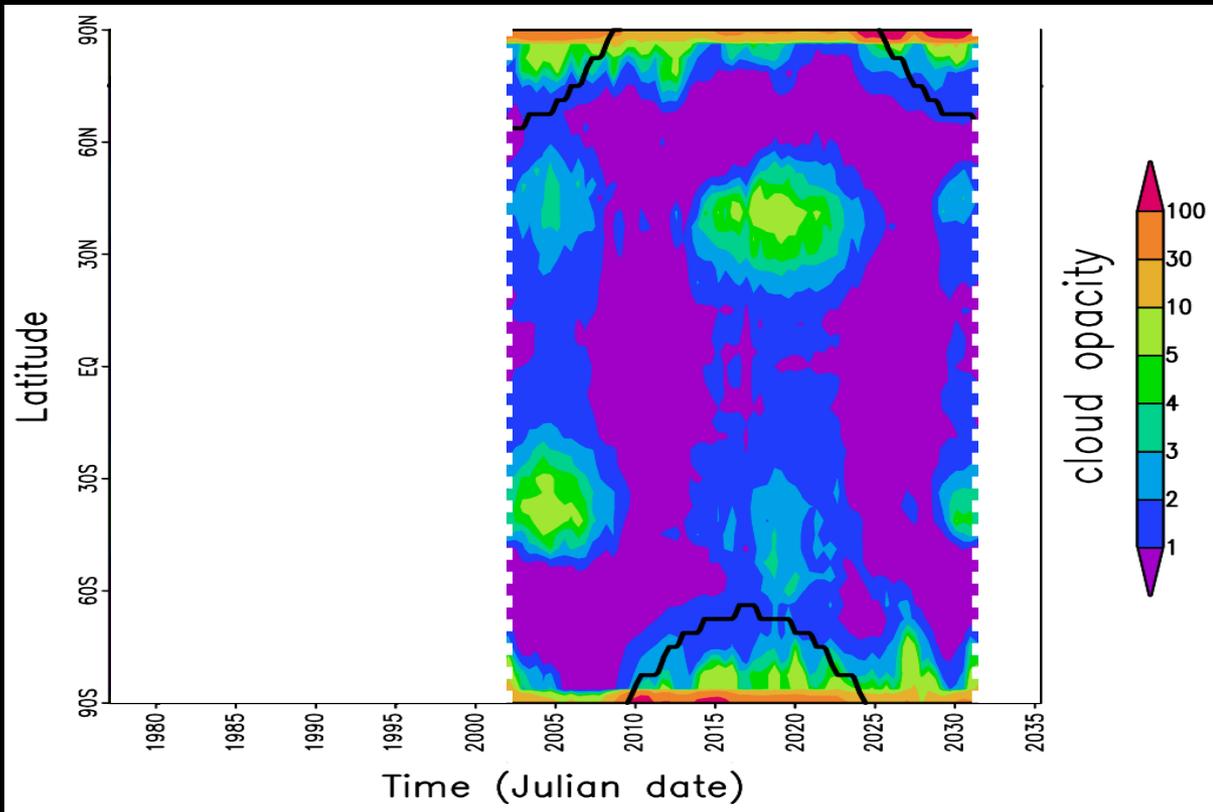


Cycles climatiques de Titan sur 60 ans

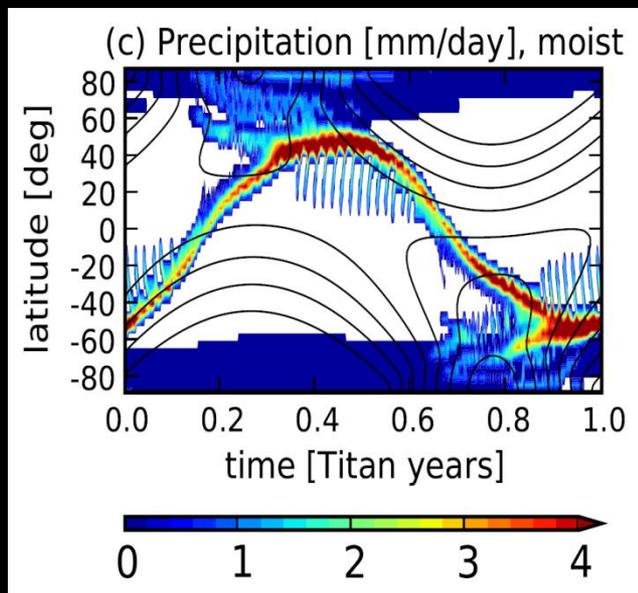
1 année sur Titan : ~ 29.5 années terrestres
1 saison sur Titan : ~ 7.4 années terrestres

Modèle de Circulation Générale :
Couverture nuageuse saisonnière
 \Rightarrow nuages : très bons traceurs de
la circulation atmosphérique





Rannou et al. (2006)



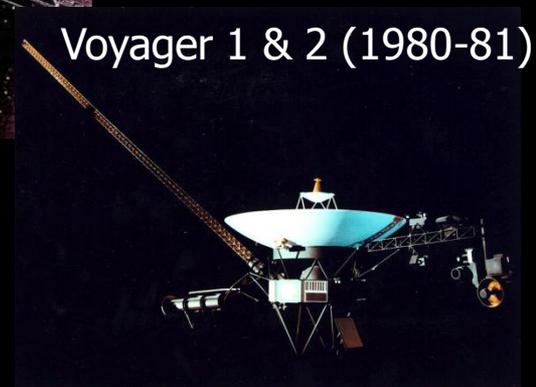
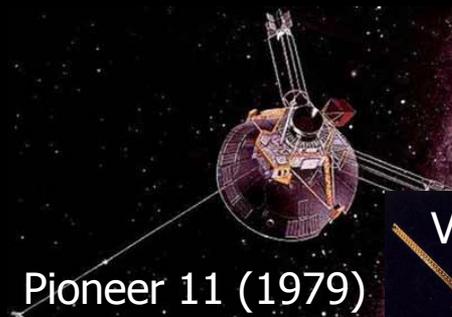
Mitchell et al. (2009)

Observation de Titan

Observations depuis l'espace



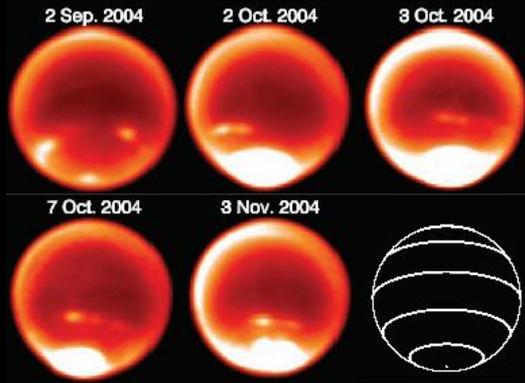
Observations depuis la Terre



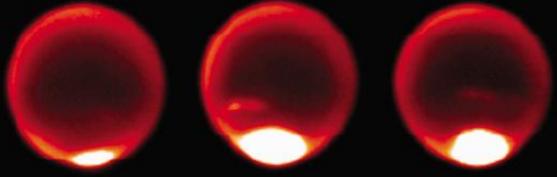
Cassini (2004-17)



Les nuages observés sur Titan



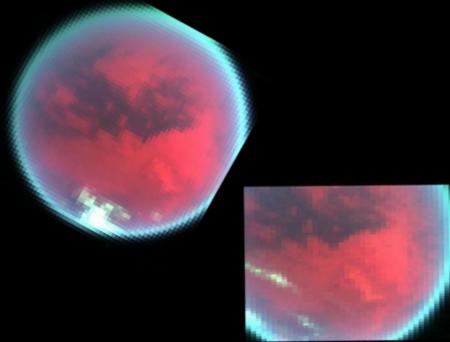
(Roe *et al.*, Science, 2005)



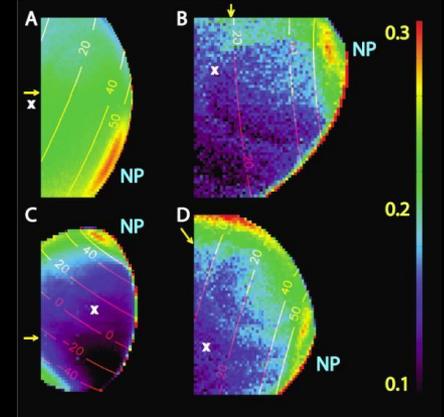
28-Sep 04 02-Oct 04 03-Oct 04

(Shaller *et al.*, Icarus, 2006)

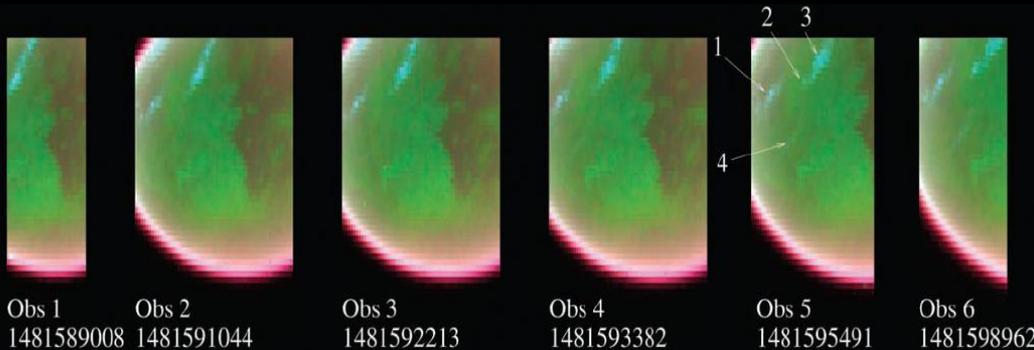
Observations : depuis 1995, au pôle sud, aux latitudes tempérées (40°S) de manière transitoire, et récemment au pôle nord de façon plus persistente



(Baines *et al.*, EM&P, 2005)



(Griffith *et al.*, Science, 2006)

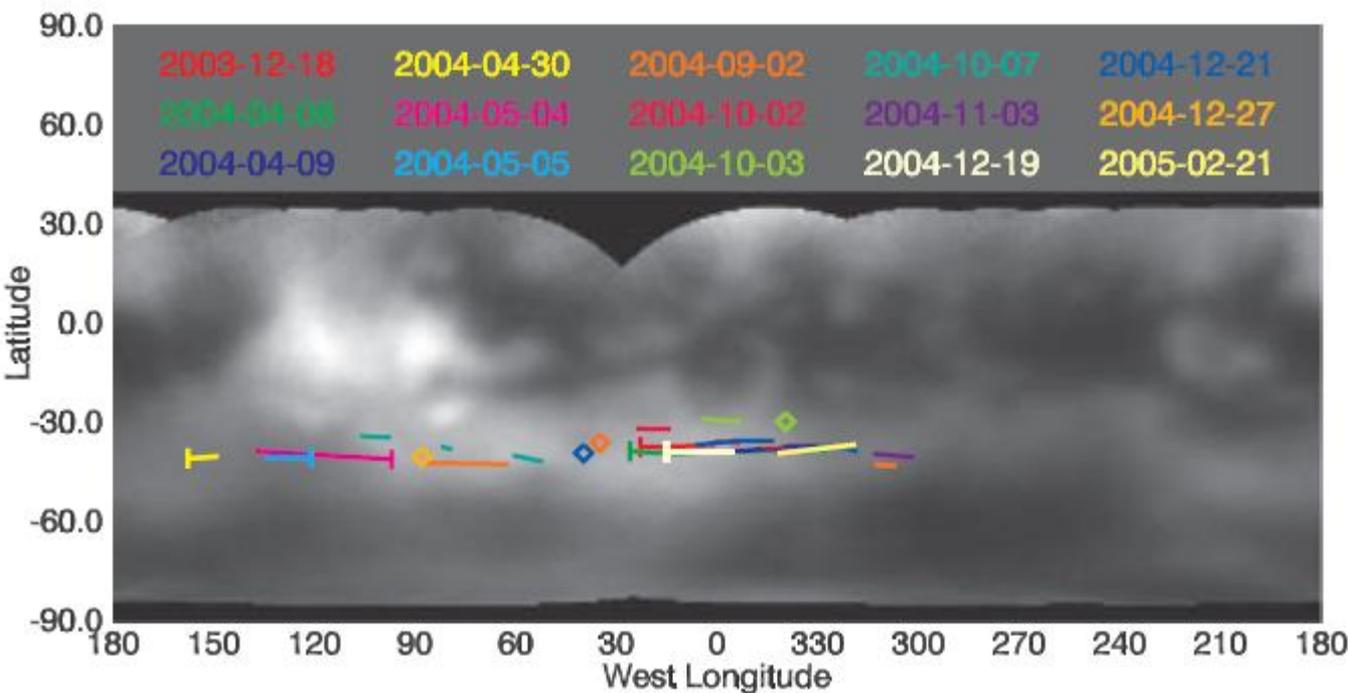


Obs 1 Obs 2 Obs 3 Obs 4 Obs 5 Obs 6
1481589008 1481591044 1481592213 1481593382 1481595491 1481598962

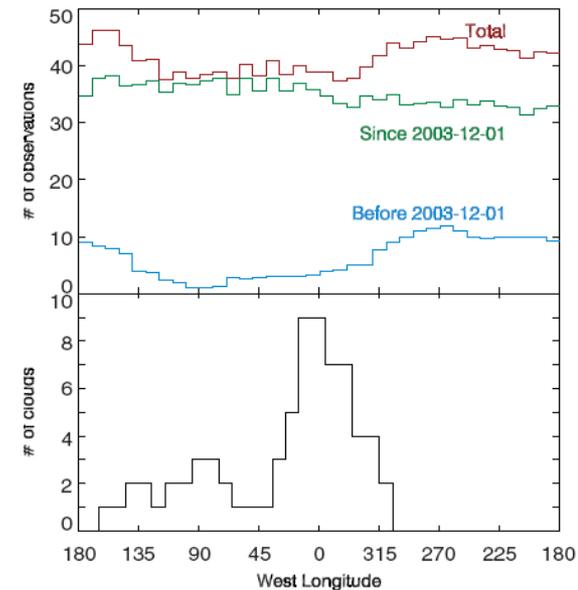
(Griffith *et al.*, Science, 2005)

(Le Mouélic *et al.*, LPSC, 2008)



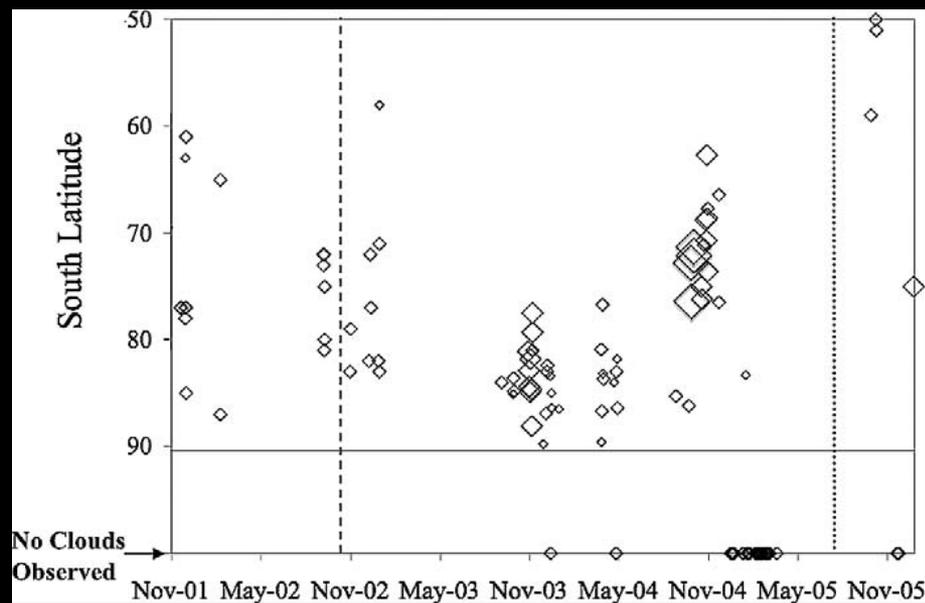


(Roe *et al.*, Science, 2005)

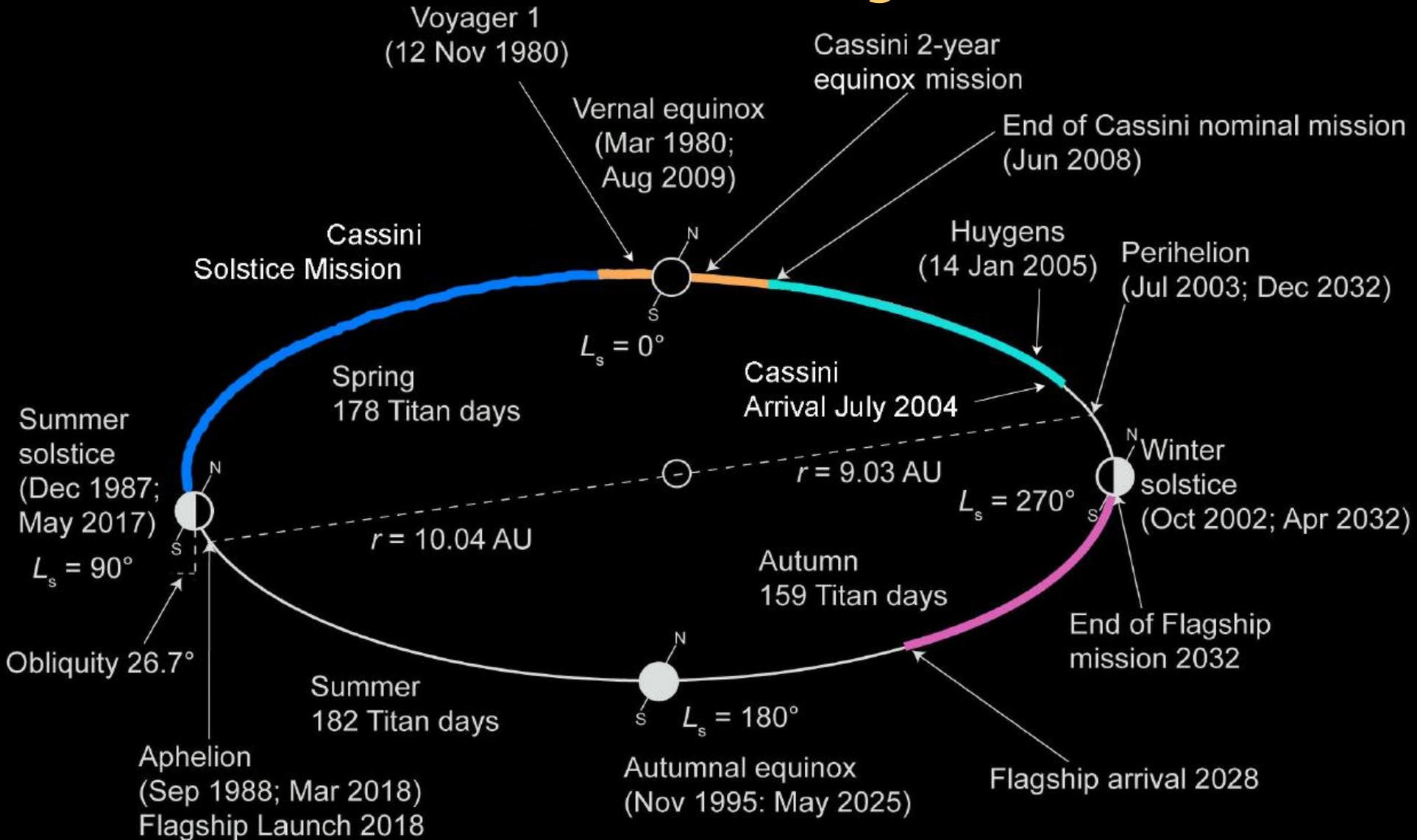


Observations depuis la Terre

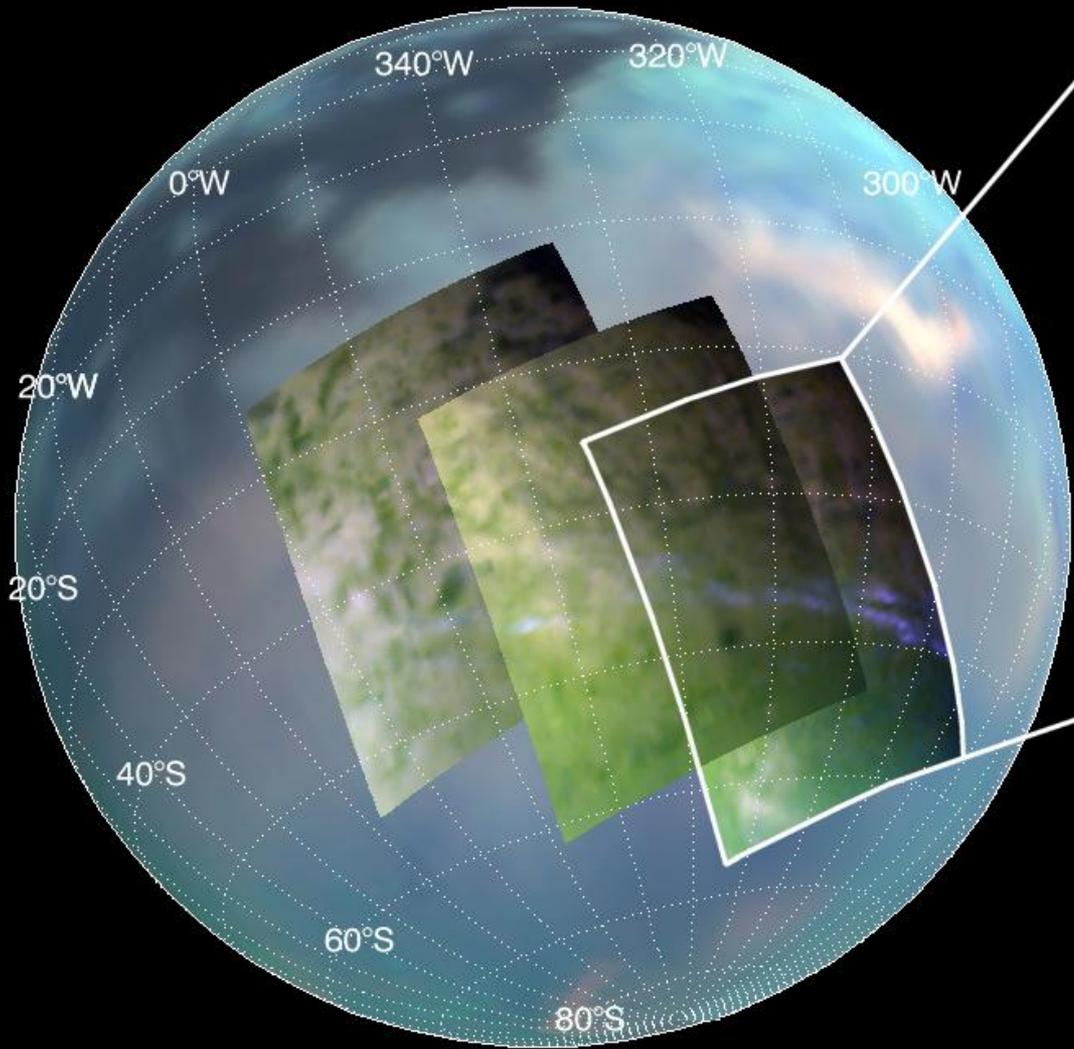
(Schaller *et al.*, Icarus, 2006)



La longévité de Cassini



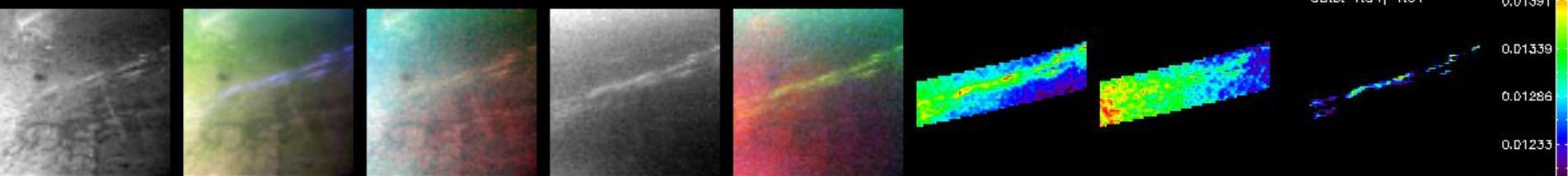
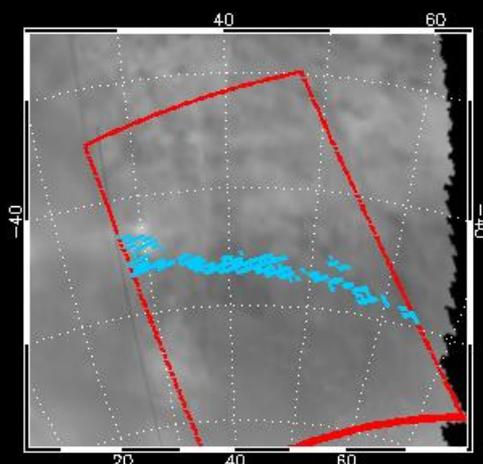
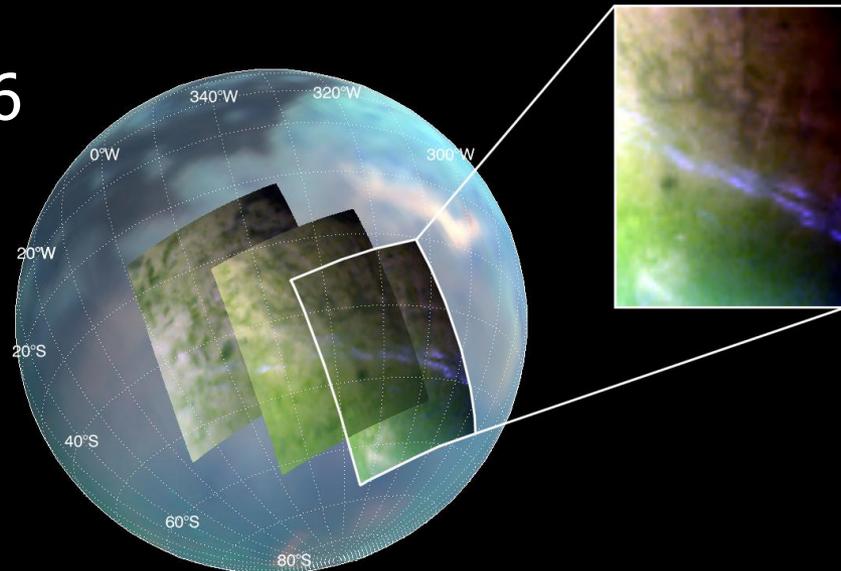
7 sept. 2006



red = 2- μm
green = 1.6- μm
blue = 2.7- μm

7 sept. 2006

red = 2- μ m
 green = 1.6- μ m
 blue = 2.7- μ m



2.03 μ m R=2 G=1.6 B=2.78 R=5 G=1.6 B=1.27 2.1 μ m clouds R(surf)-G(trop)-B(strat) 3 μ m window area 5 μ m window area Clouds map
 S23 T17 64x64 S23\cubes\HIGHRESNA001\1536358270_1.nav dist= 30353 to 27304 km. 80 ms. phase= 57 to 59 $^\circ$

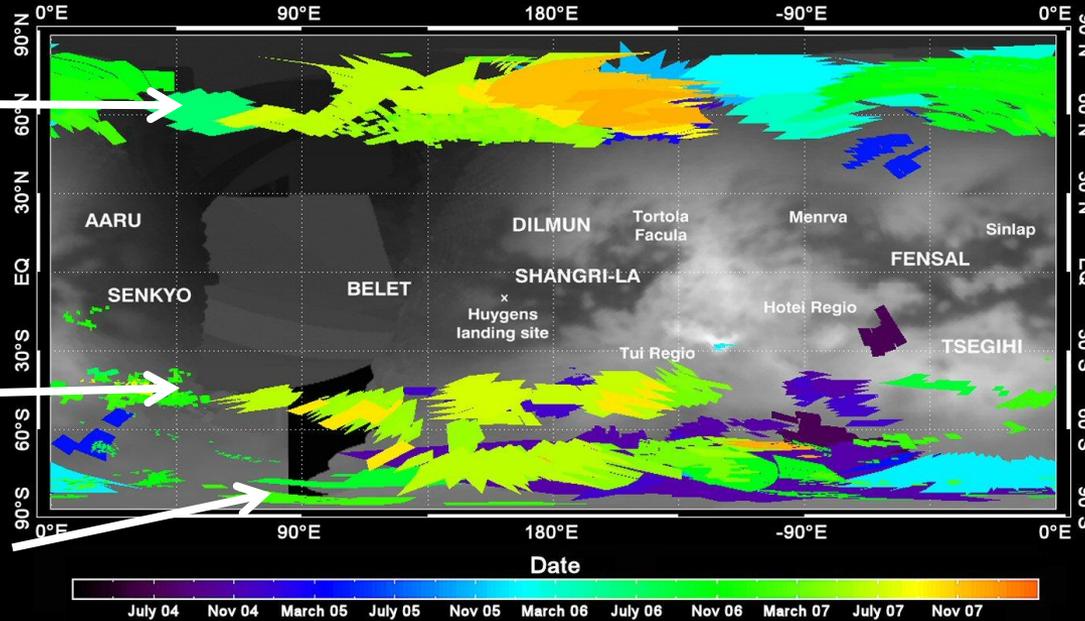
Cuts: 1.34, 1.91

Détecter et cartographier les nuages de Titan avec VIMS de juillet 2004 à décembre 2007 (Rodriguez *et al.*, Nature, 2009) – ~150 clouds

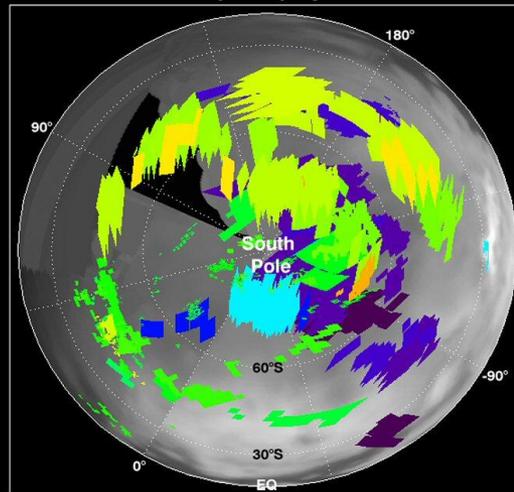
Nuages polaires nord

Ceinture à 40°S

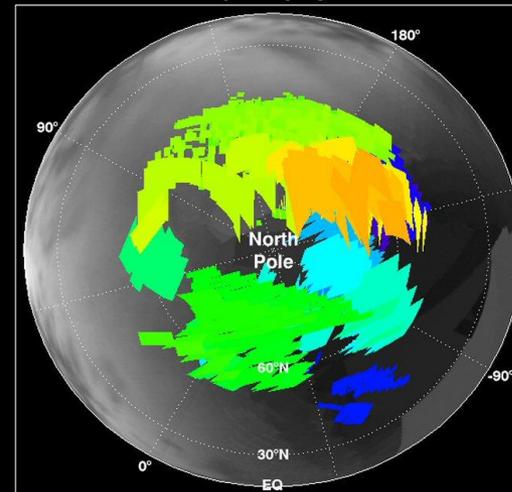
Nuages polaires sud



South polar projection

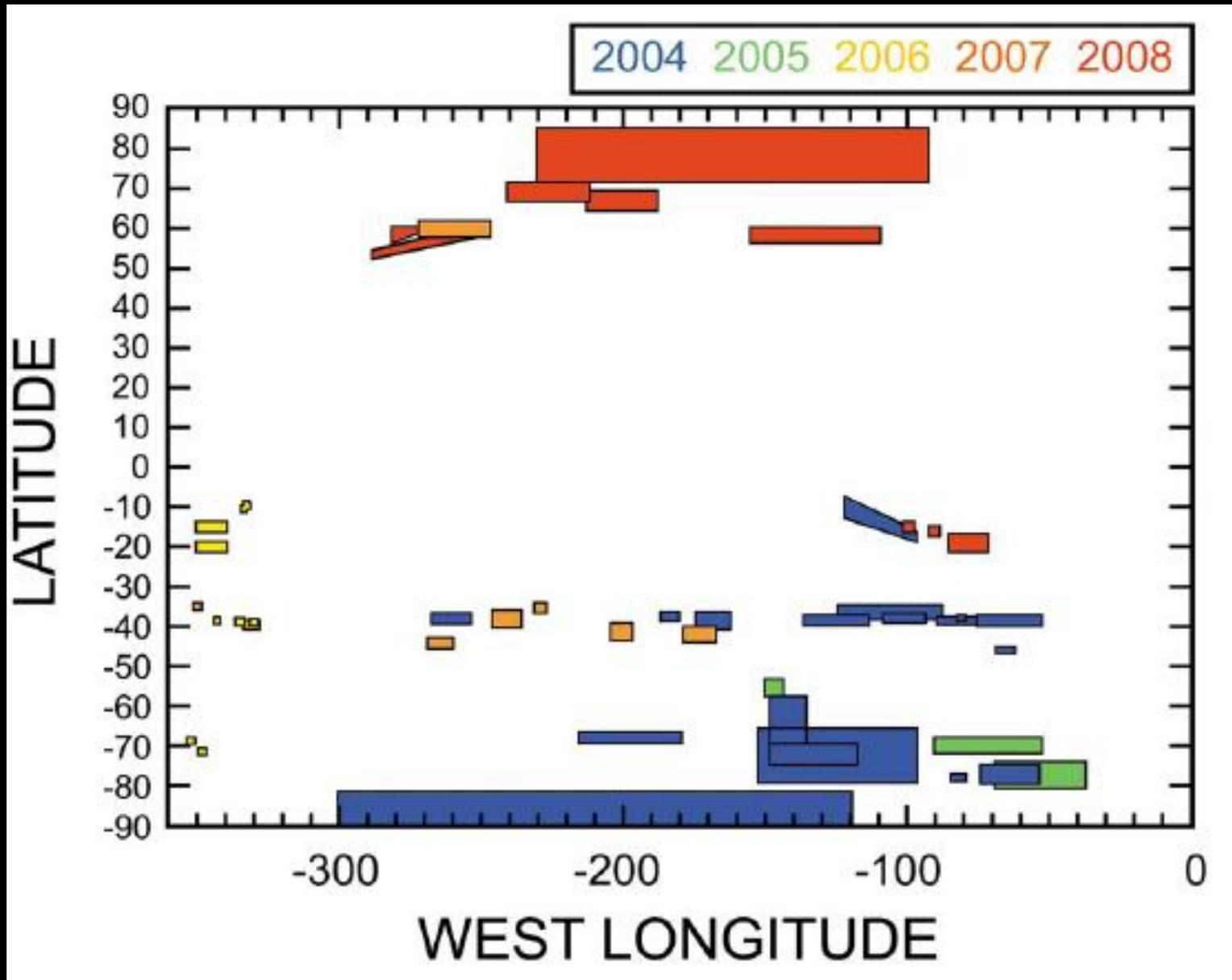


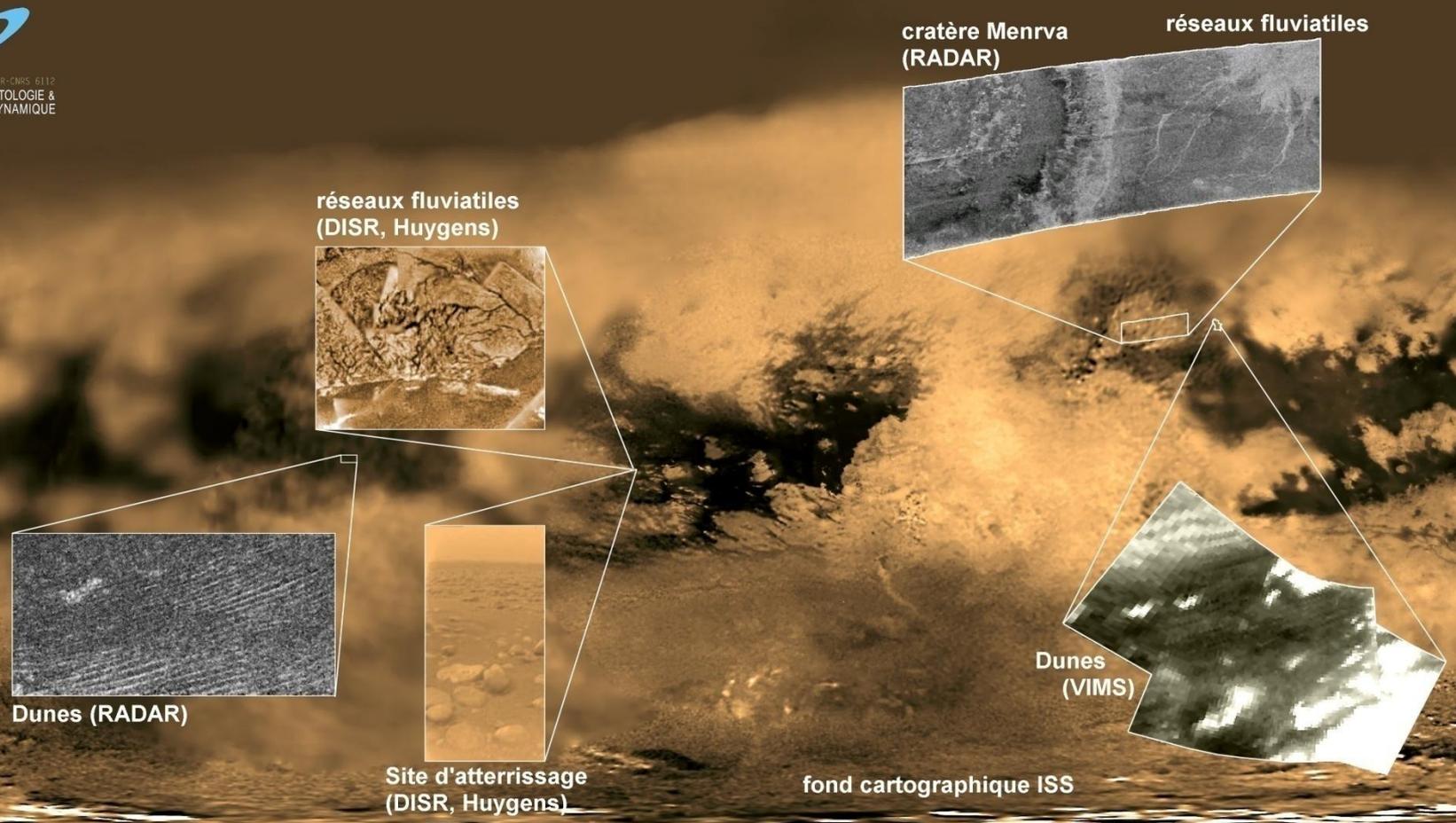
North polar projection

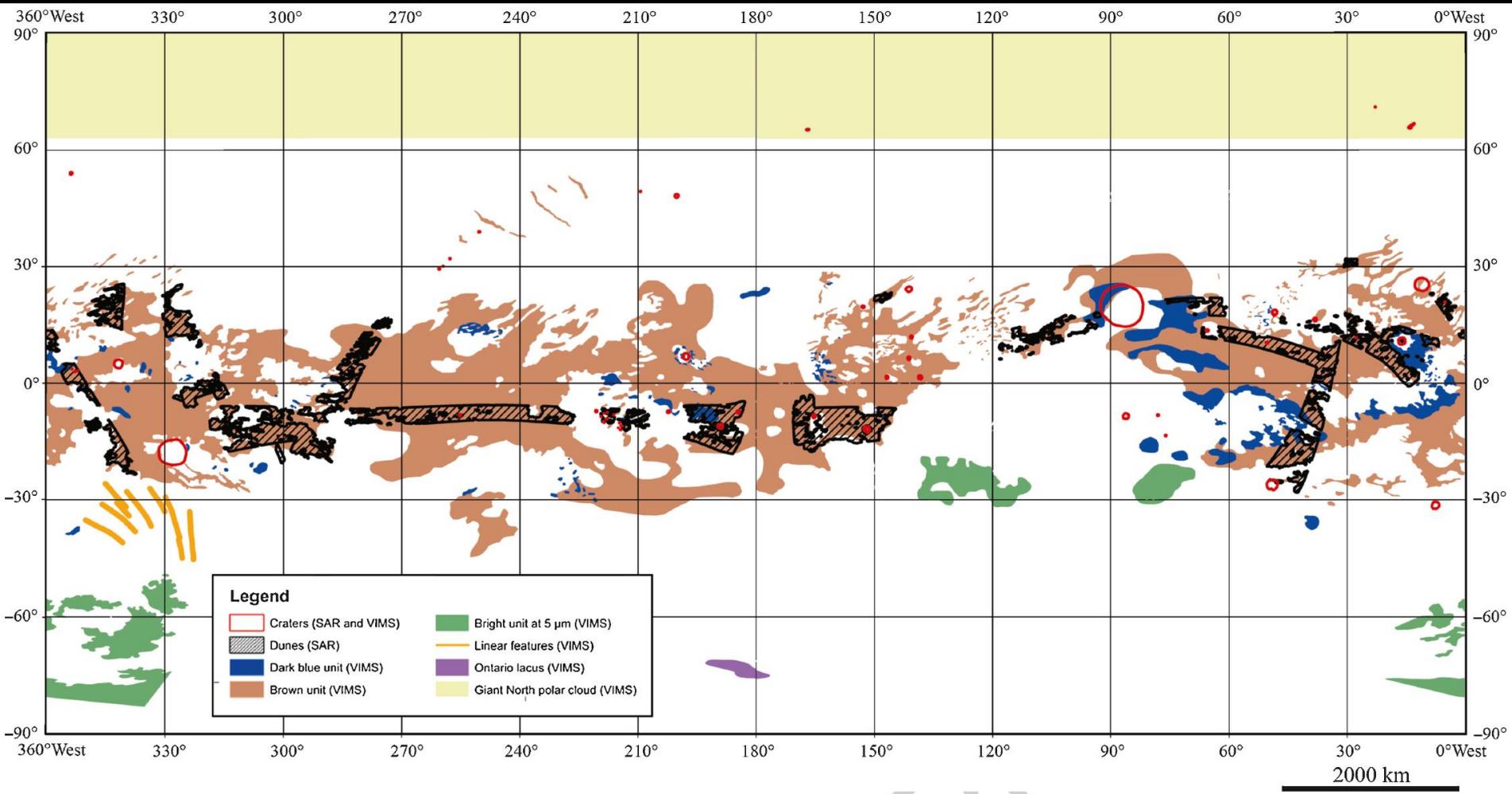


Observations Cassini/ISS

(Turtle *et al.*, GRL, 2009)







Detailed comparison between the 2 studies

M. Brown et al., 2010:

We have reexamined the full VIMS dataset and found that in each case of discrepancy the fault lies with the automated results of Rodriguez et al. (2009).

General summary:

- Good to very good match in **28/45** flybys
- Most of the differences are found between T21 and T29 in regions of poor viewing geometries
- Our method is more conservative (lack of sensitivity) ; we miss **≈20** confirmed clouds: **6 obvious**, **9 very faint** and **5 extremely faint**
- and **5/160** of our detections are **uncertain**
- M. Brown's method is more sensitive, but too sensitive ? **17** Brown's detections are **uncertain** (with one artifact particularly obvious) and **more than 11** detected cloud systems have obvious **shape problems** (systematically wider than the real events)
- and M. Brown miss **8** confirmed clouds that we detect

M. Brown *et al.* method:

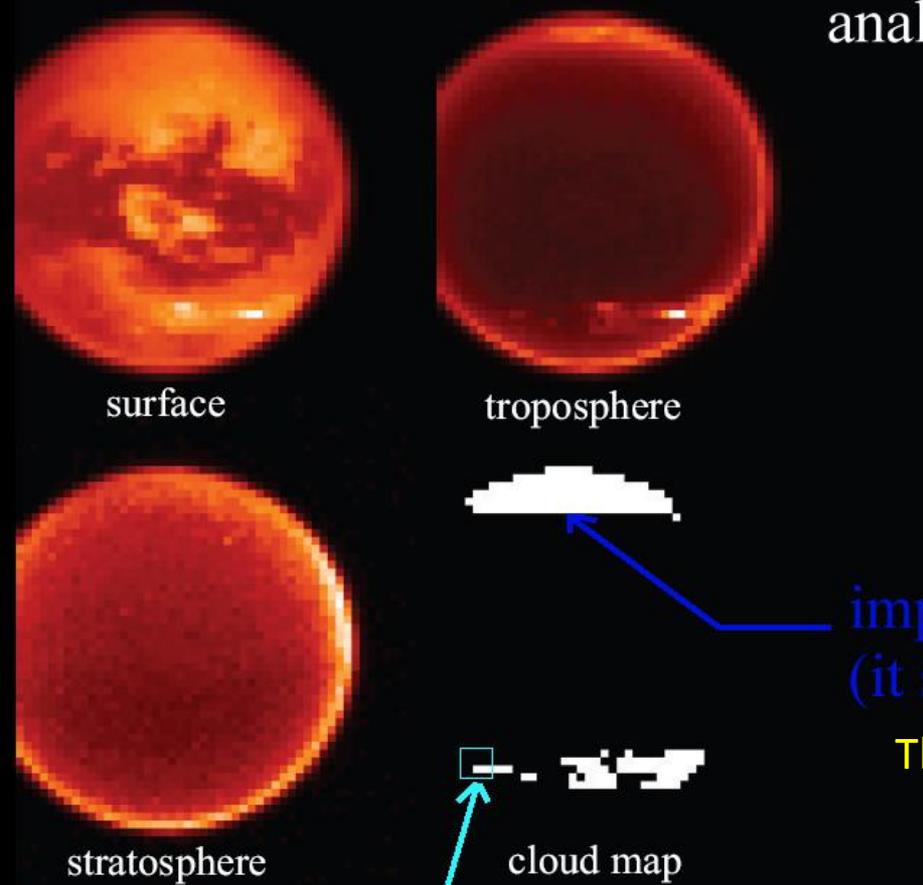
- Construct for each datacube a triplet of image (surface, troposphere and stratosphere channels)
- Inspect visually each of the 9000 triplets to search for clouds and manual drawing of detections on a map

S. Rodriguez *et al.* method:

- Selection of 2000 datacubes relevant for clouds monitoring
- **Semi**-automated detection of cloudy pixels with conservative spectral criterions
- Final supervision of detections

Mike Brown's method : can we trust it ?

analysis of Figure 2 of his Icarus Paper



impossible limit for a cloud
(it should follow a parallel in real world).

This detection has no physical meaning

false detection (same level for the 2 most left pixels
as the limb pixels in the 3 bands)

Example: Brown et al. (2010) T23 cloud map

Very strange shape (borders of image ?)

Artifacts ?

Cloud signature not seen in the data

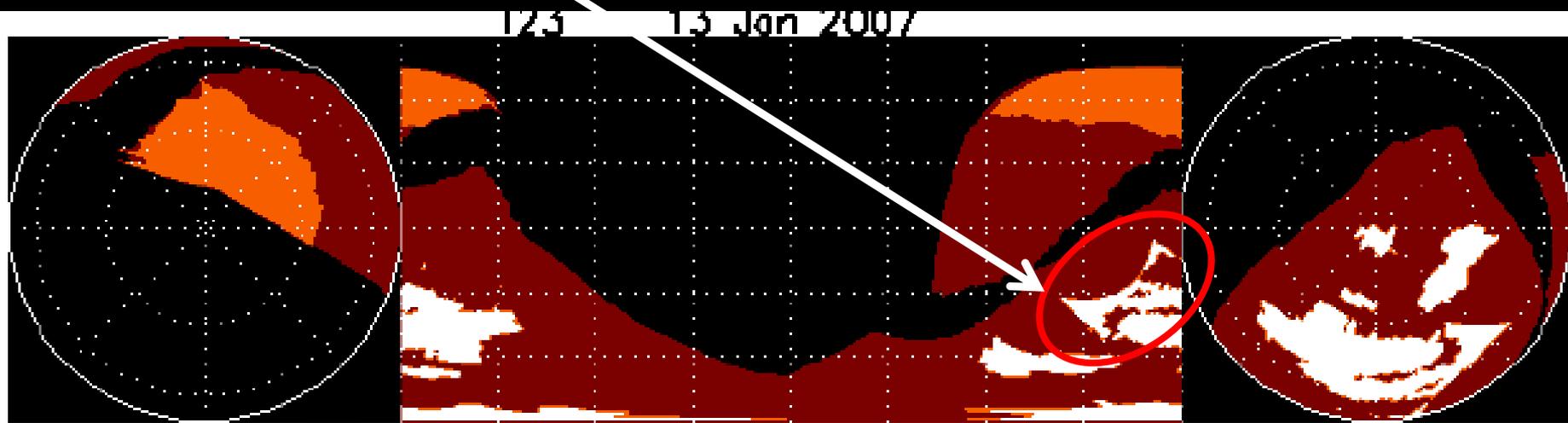
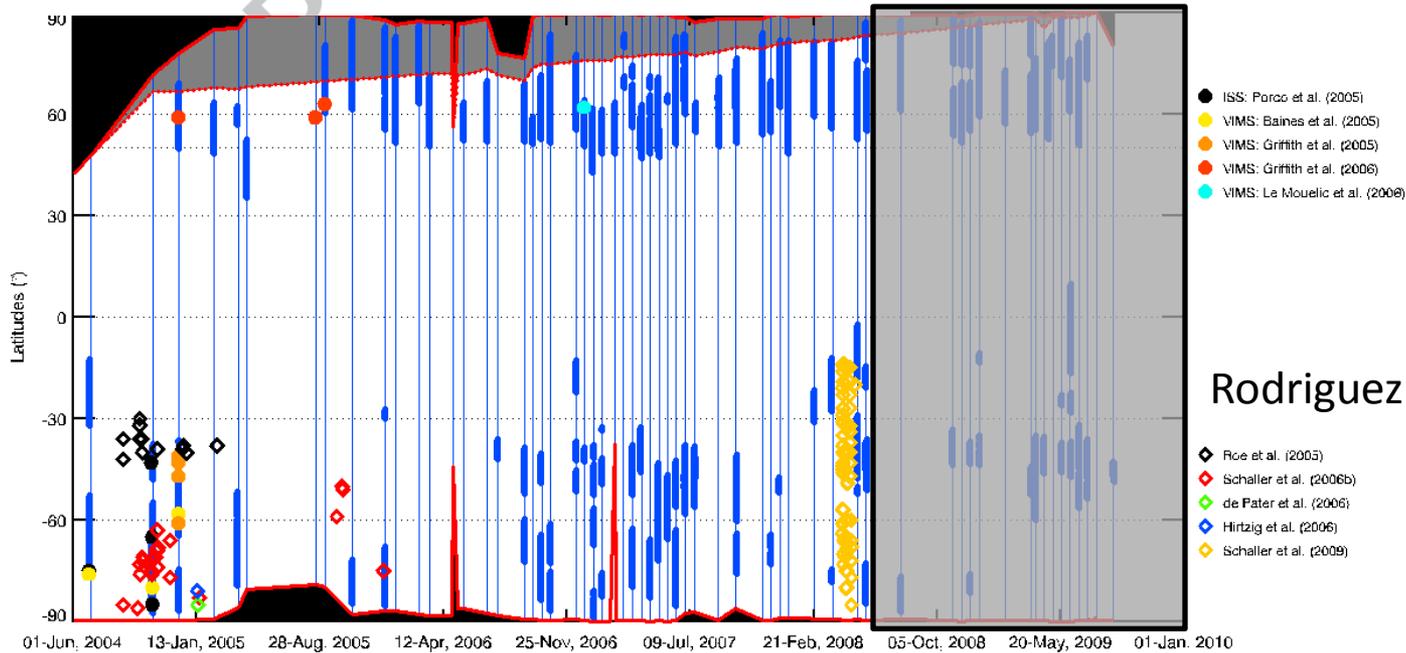
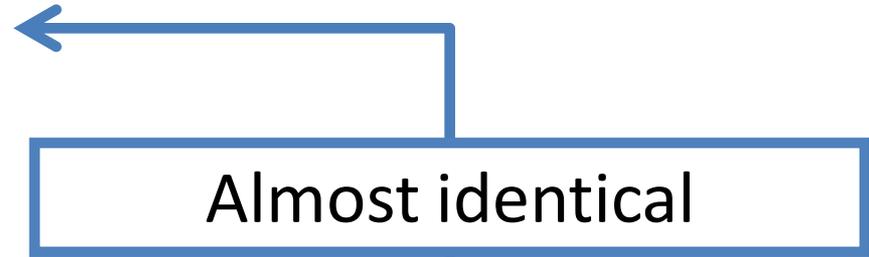
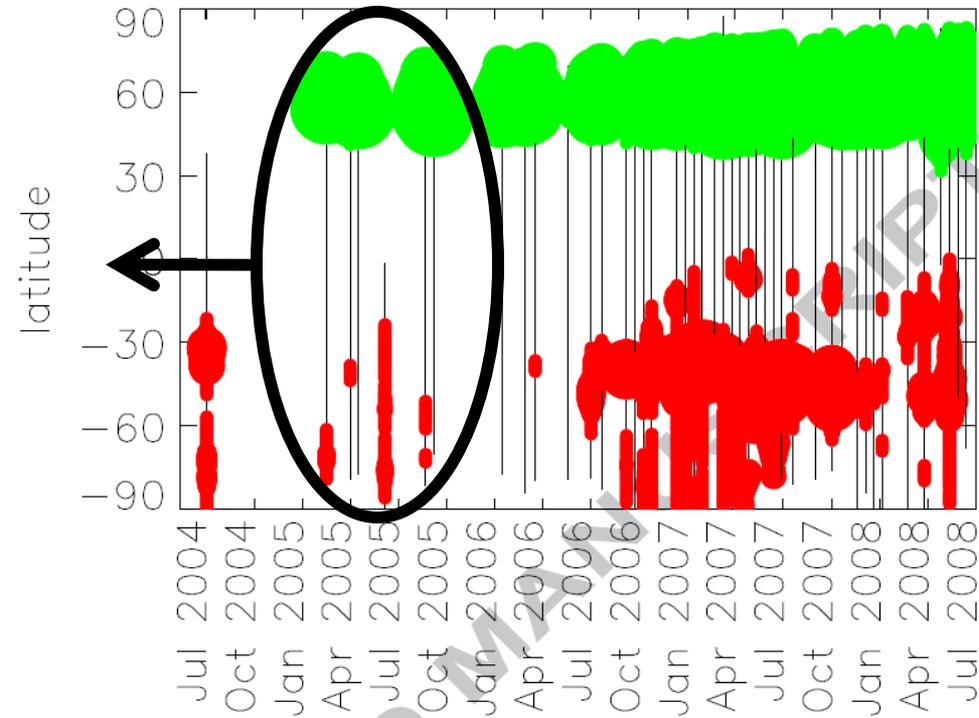


Figure 6 (Brown et al., Icarus, 2010)



Rodriguez et al., 2009 -> T44

Conclusion

The 2 methods, considering their respective limits and the volume of data to handle, finally produce both very close and very good clouds maps, useful to monitor Titan's seasonal meteorology