

***Changements saisonniers dans la
moyenne atmosphère de Titan : résultats
de la mission Cassini***

Sandrine Vinatier

LESIA, Observatoire de Paris-Meudon

La mission Cassini/Huygens

- Mission nominale : 2004 - 2008
→ Mission prolongée jusqu'en 2017

Juillet 2015 = 112 survols de Titan

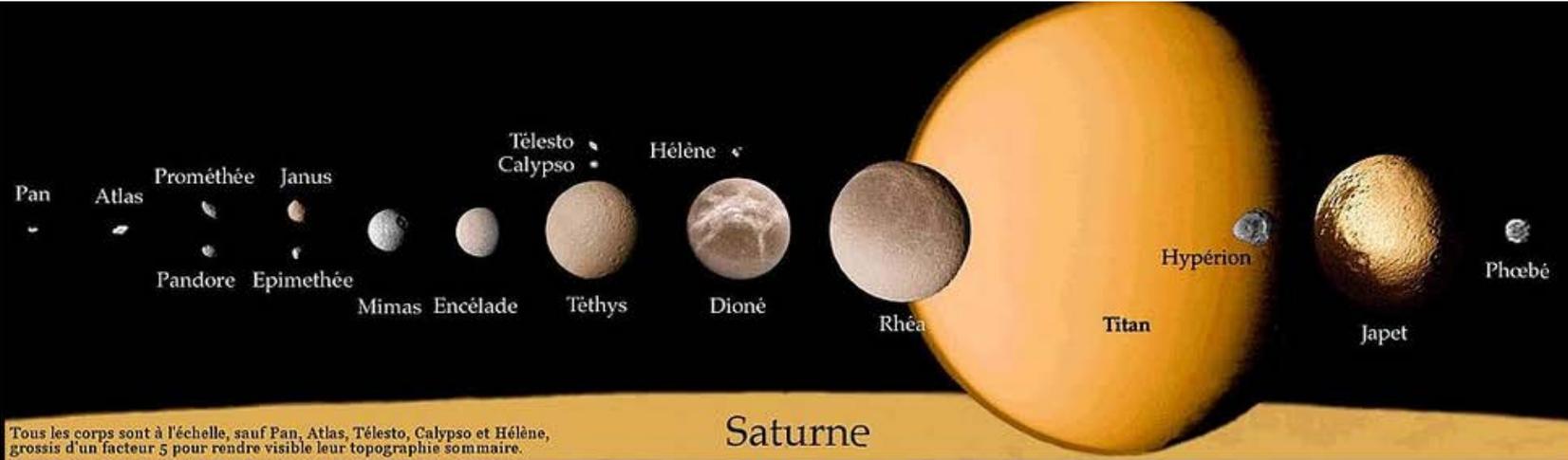


Parmi les 12 instruments de Cassini :

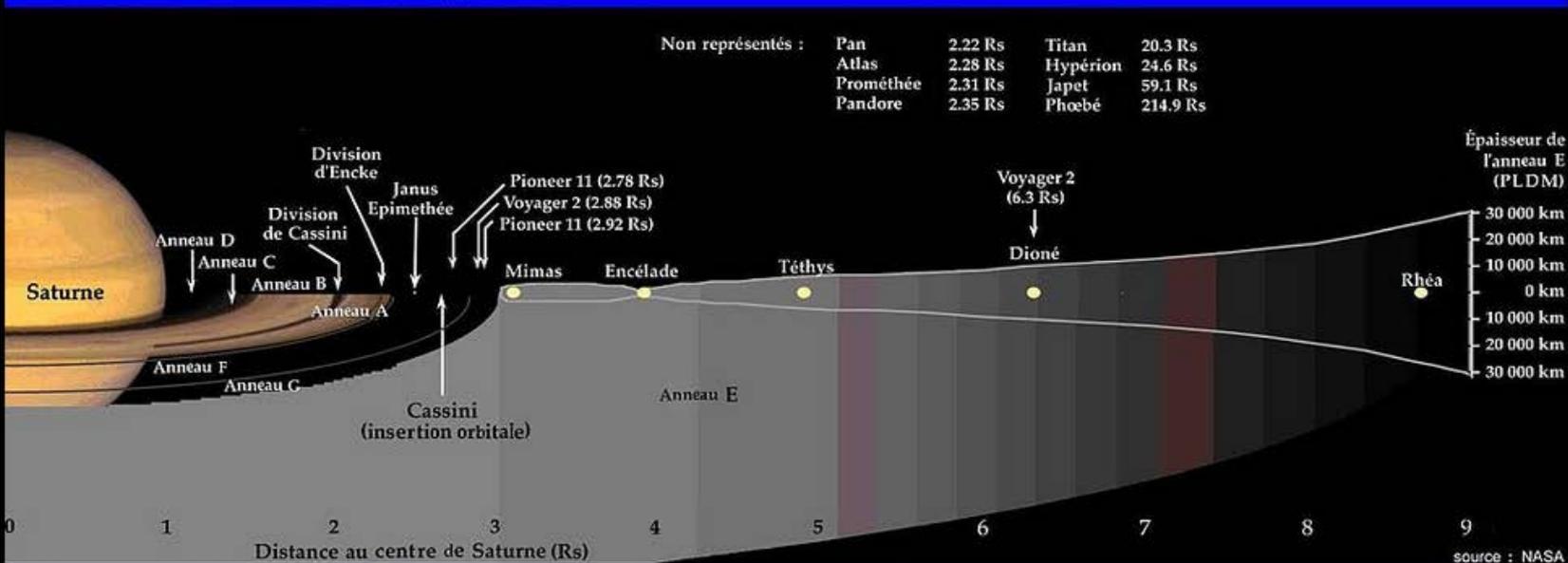
- 1 spectro-imageur en IR proche : **VIMS (0.3 – 5.1 μm)**
- 1 spectromètre en IR moyen : **CIRS (7 μm – 1 mm)**

Introduction: Titan dans le système de Saturne

■ Rayon de Titan = 2575 km

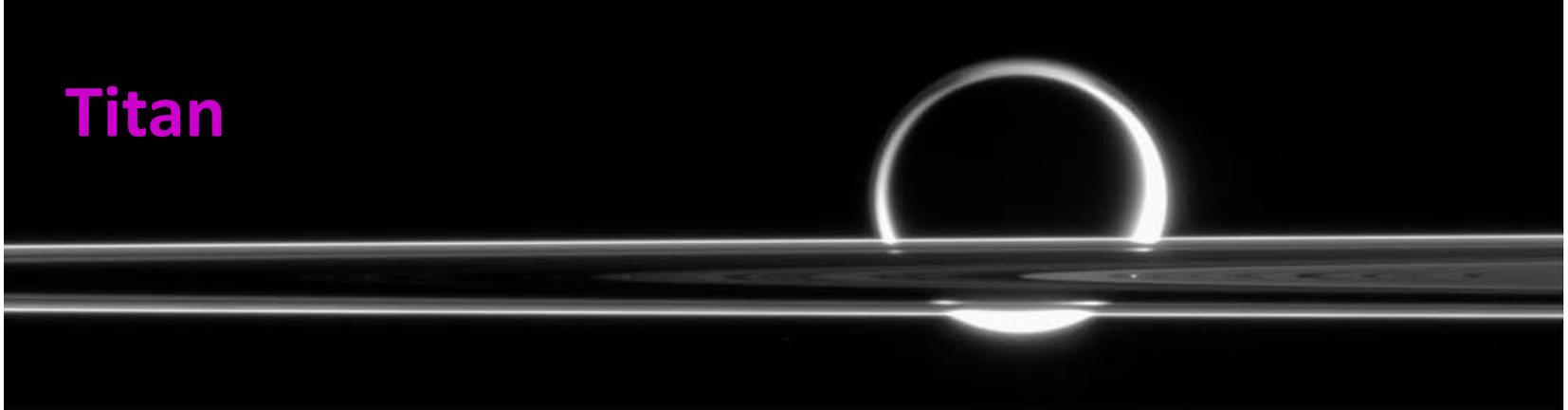


Tous les corps sont à l'échelle, sauf Pan, Atlas, Télesto, Calypso et Hélène, grossis d'un facteur 5 pour rendre visible leur topographie sommaire.



source : NASA

Titan



<http://ciclops.org>

Caractéristiques générales

- Existence d'une atmosphère dense : $\sim 95\%$ N_2 , $\sim 5\%$ CH_4 (troposphère)
- Pression au sol = 1.5 bar
- Température au sol = 93.4 K
- Obliquité = 26.7° => saisons très marquées

Introduction: l'atmosphère de Titan

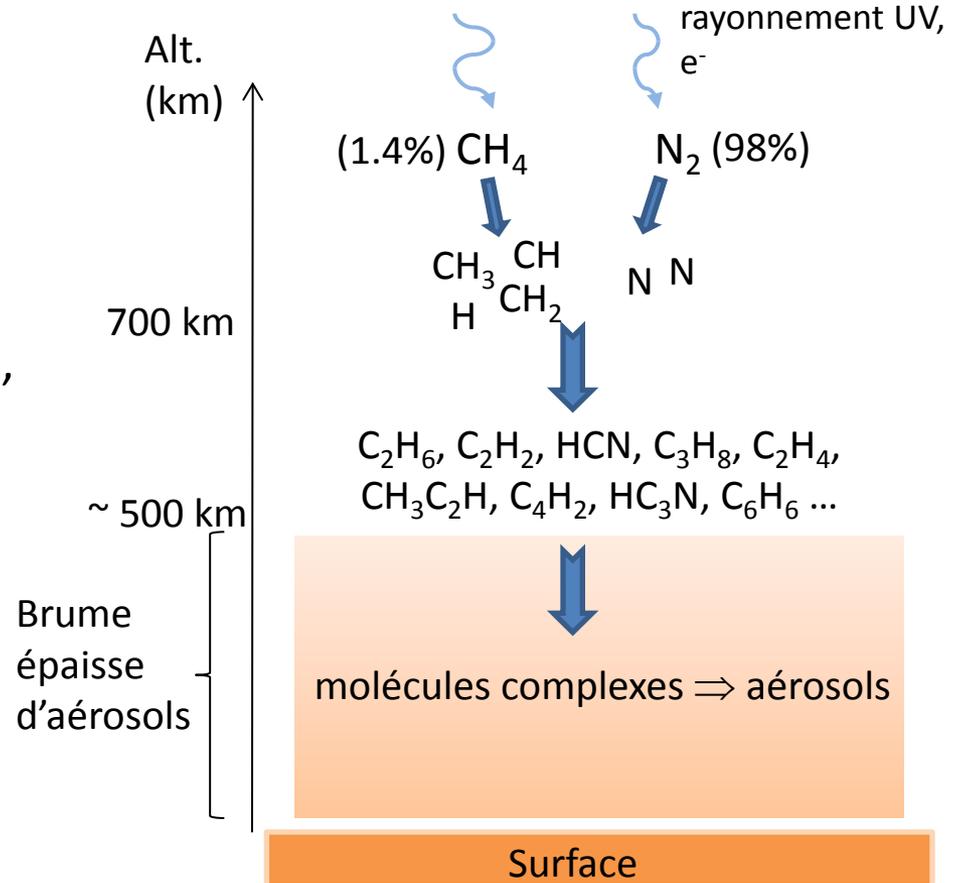
■ Chimie atmosphérique complexe

Molécules détectées dans la moyenne atmosphère :

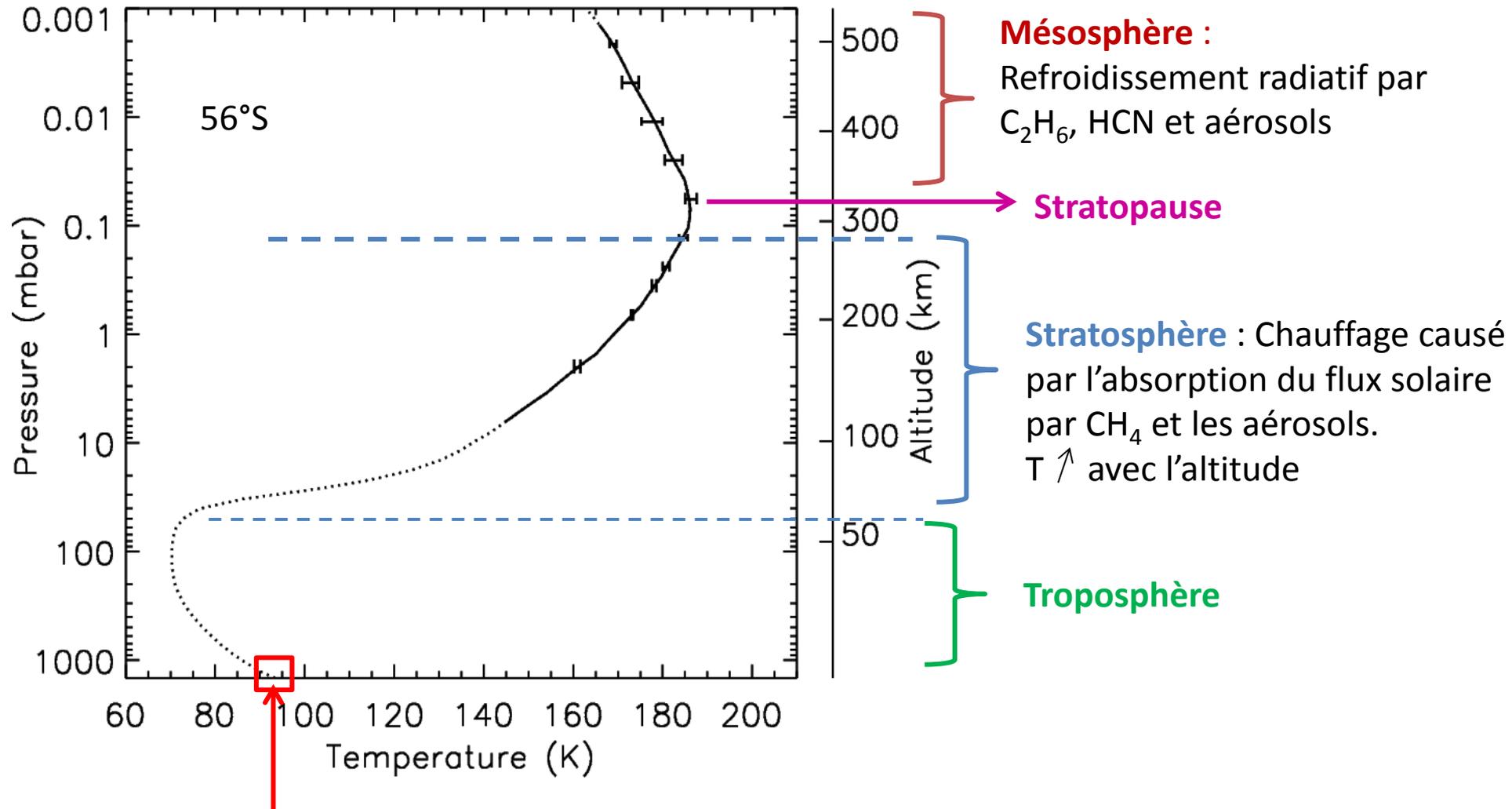
- **hydrocarbures** : C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_3H_6 , CH_3C_2H , C_4H_2 , C_6H_6

- **nitriles** : HCN , HNC , HC_3N , CH_3CN , C_2N_2 , C_4N_2

- **composés oxygénés** : CO , CO_2 , H_2O



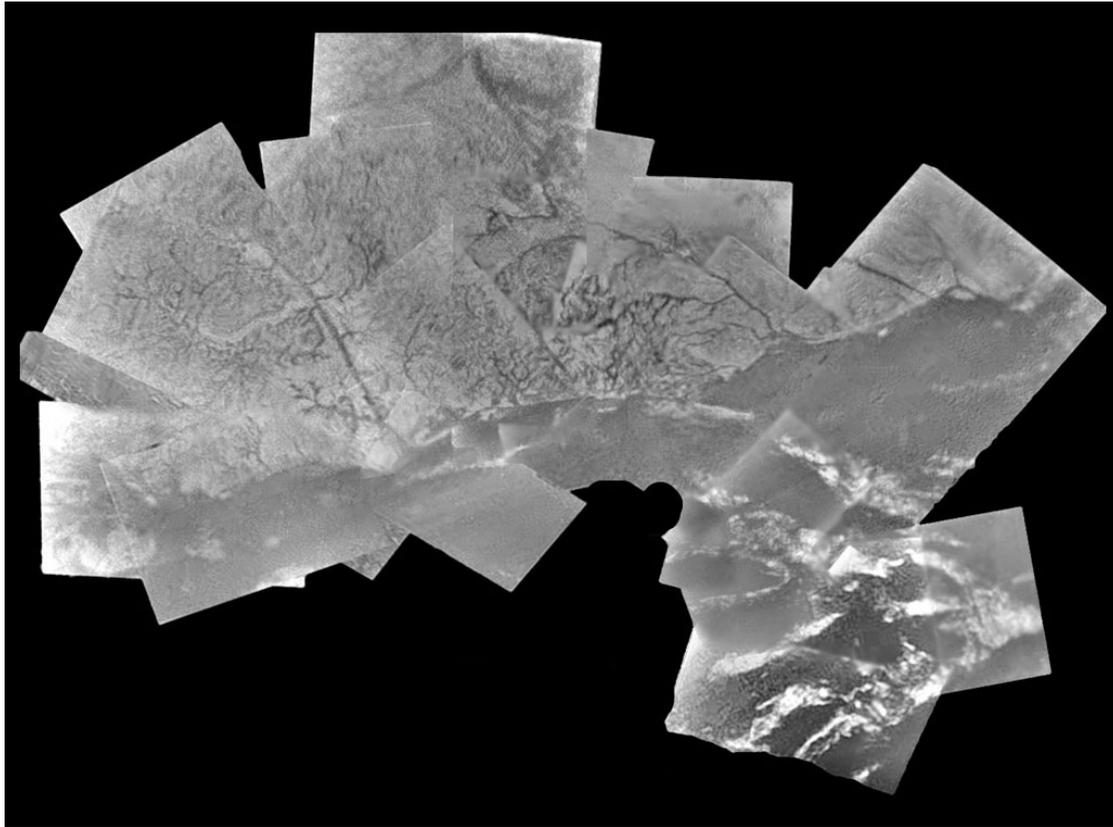
Profil vertical de température



Température de surface ~ 93 K, varie peu : C_2H_6 et CH_4 à l'état liquide

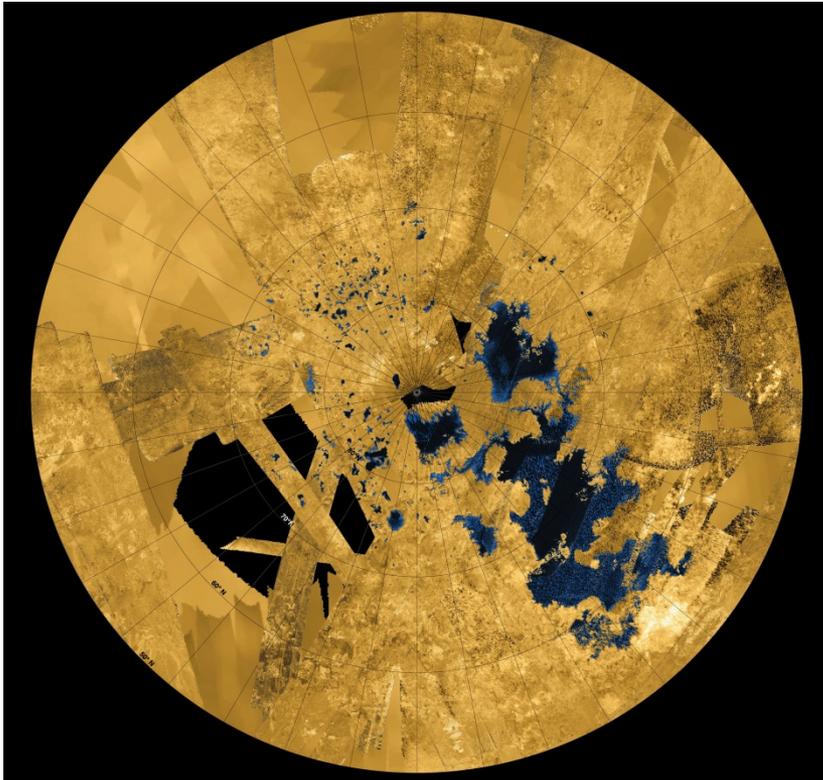
Réseaux fluviatiles

Réseaux fluviatiles observés près de l'équateur lors de la descente de Huygens

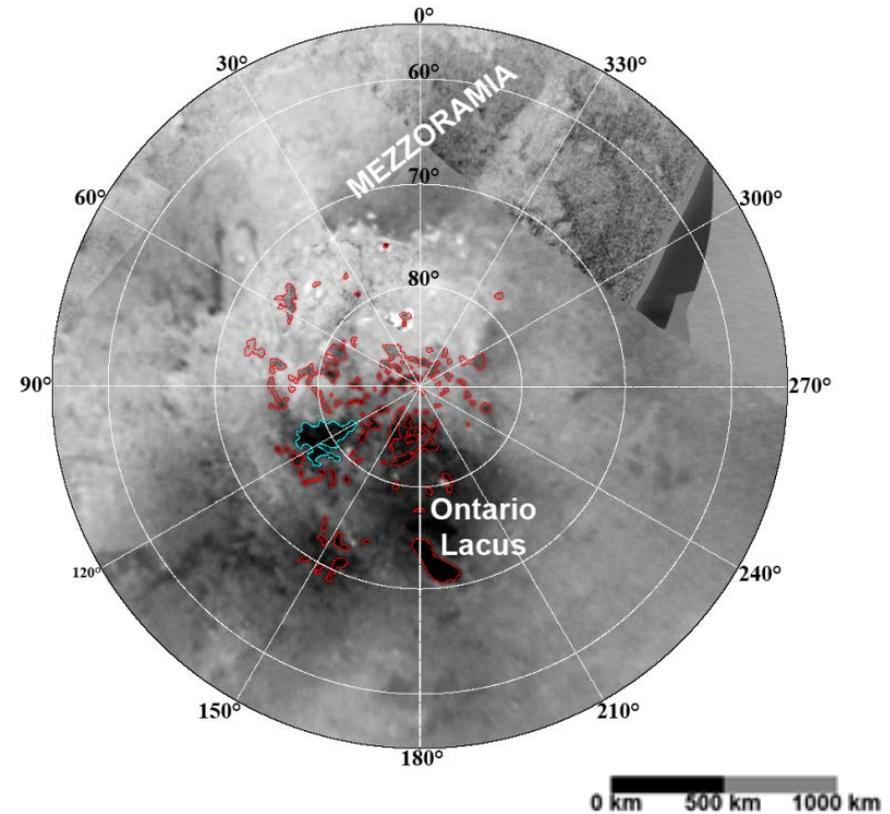


Mers et lacs à haute latitude nord et sud

Observations du radar de Cassini
Hémisphère Nord



Observations avec ISS de Cassini
Hémisphère Sud



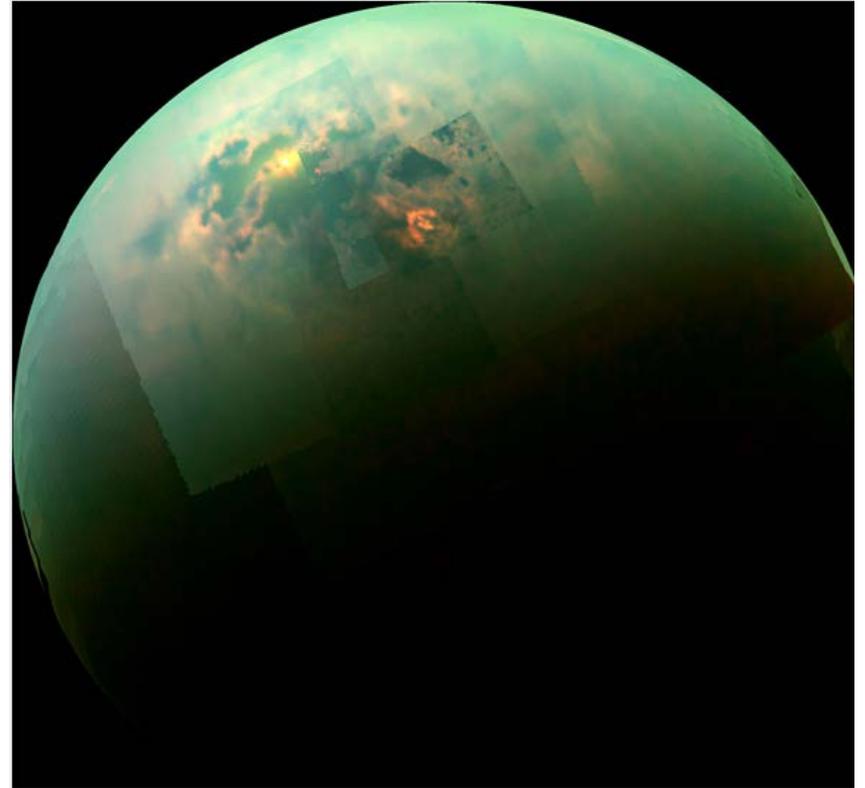
Plus de lacs à haute latitudes nord car l'été nord (précipitations plus abondantes) dure plus longtemps que l'été sud, du fait de l'excentricité de Saturne.

Preuve de la présence de liquide dans les mers du nord

Réflexions spéculaires observées sur des images Cassini/VIMS



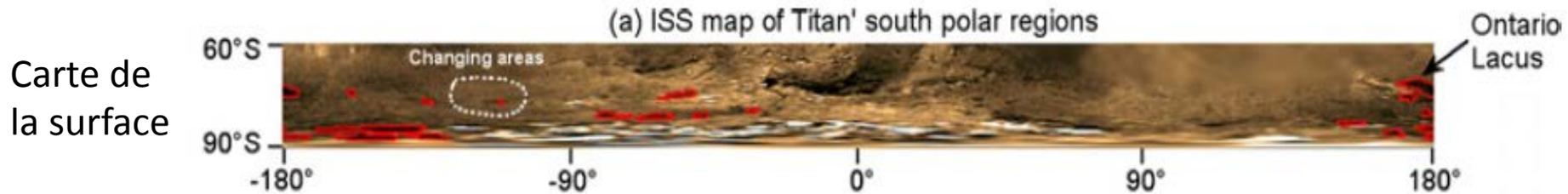
Kivu Lacus (Barnes et al., 2013)



Kraken Mare (Lorenz et al., 2014)

Été sud : nuages convectifs près du pôle sud

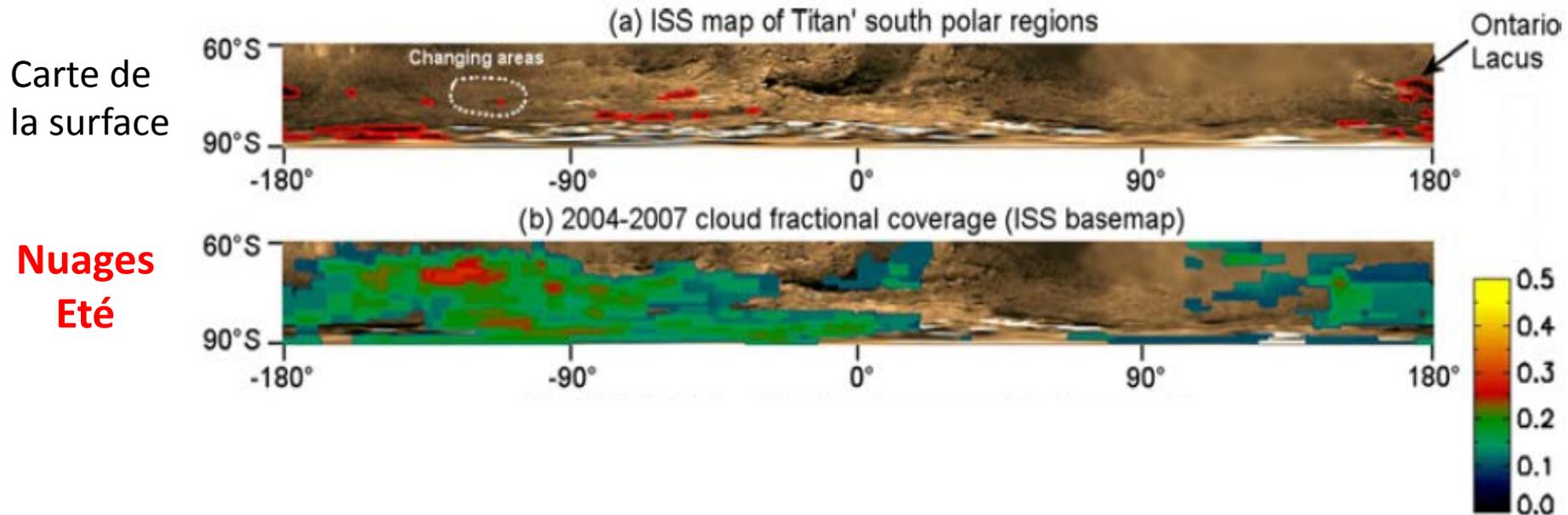
Fraction de couverture nuageuse observée avec Cassini/VIMS entre 60°S et 90°S



- Pendant l'été sud : observation de nuages convectifs (principalement formés de CH_4) entre -180°E à 0°E .
- Maximum localisé à 60° à l'est du lac Ontario.
-> évaporation du lac Ontario pendant l'été + vents dominants vers l'Est de ~ 1 m/s transportent les nuages sur 50 à 300 km.

Eté sud : nuages convectifs près du pôle sud

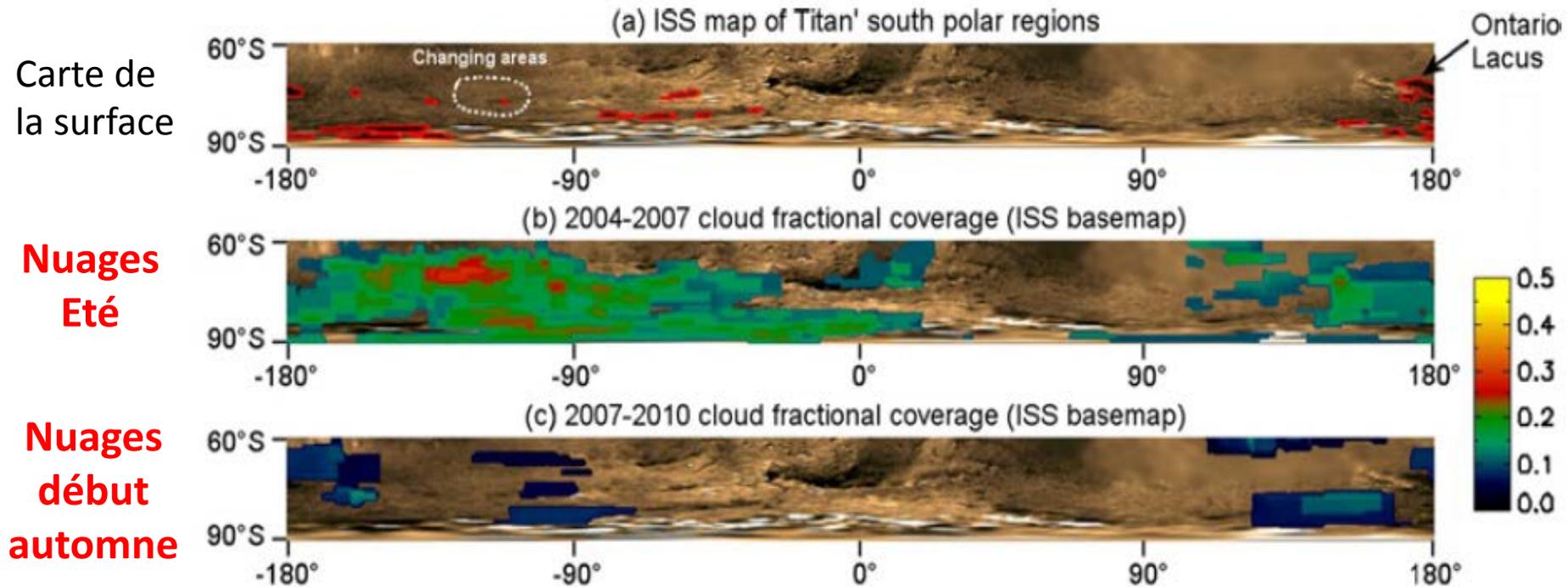
Fraction de couverture nuageuse observée avec Cassini/VIMS entre 60°S et 90°S



- Pendant l'été sud : observation de nuages convectifs (principalement formés de CH_4) entre -180°E à 0°E .
- Maximum localisé à 60° à l'est du lac Ontario.
-> évaporation du lac Ontario pendant l'été + vents dominants vers l'Est de ~ 1 m/s transportent les nuages sur 50 à 300 km.

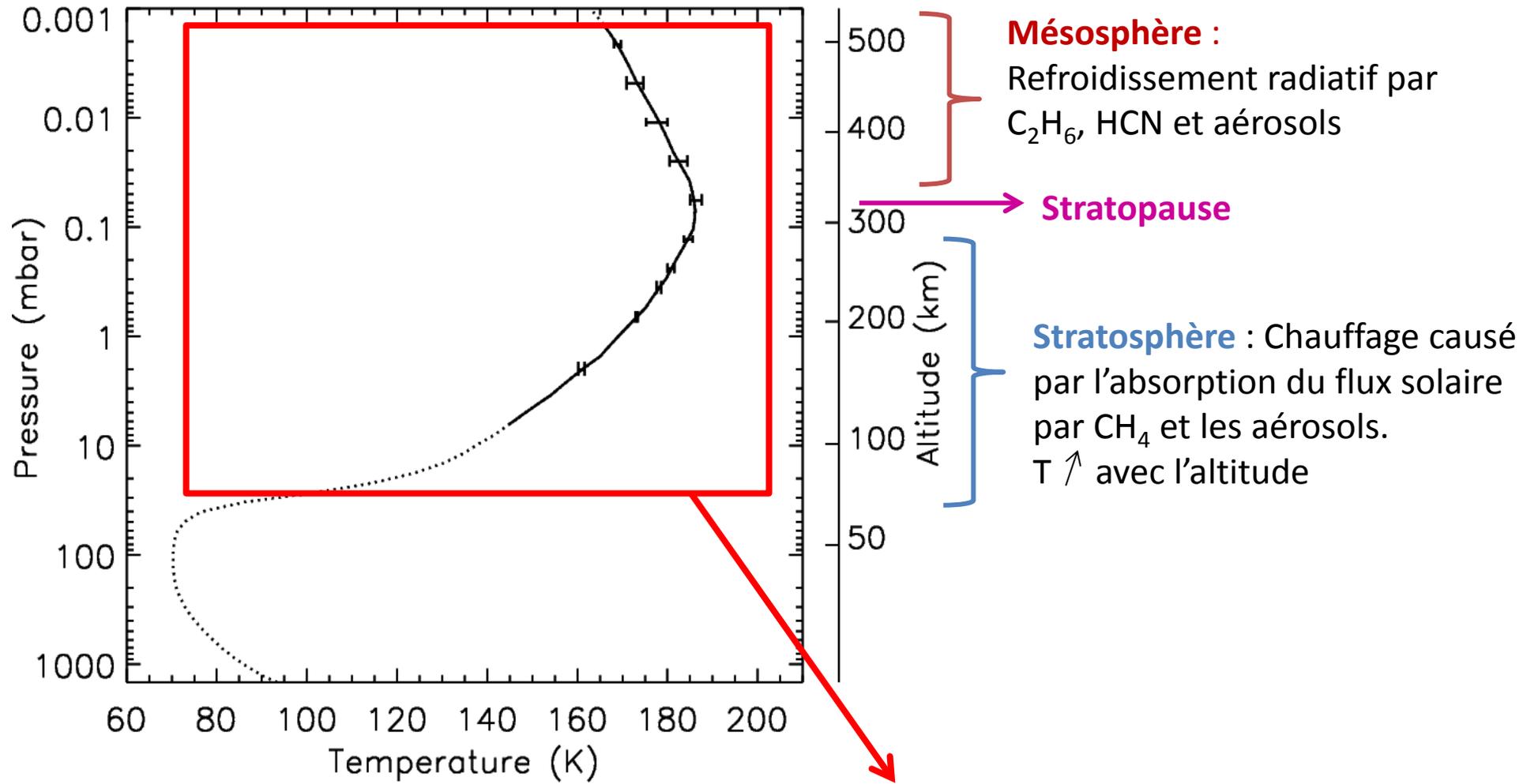
Eté sud : nuages convectifs près du pôle sud

Fraction de couverture nuageuse observée avec Cassini/VIMS entre 60°S et 90°S



- Pendant l'été sud : observation de nuages convectifs (principalement formés de CH_4) entre -180°E à 0°E .
- Maximum localisé à 60° à l'est du lac Ontario.
-> évaporation du lac Ontario pendant l'été + vents dominants vers l'Est de ~ 1 m/s transportent les nuages sur 50 à 300 km.
- Nuages moins présents à l'approche de l'automne.

Profil vertical de température



Mésosphère :
Refroidissement radiatif par C_2H_6 , HCN et aérosols

Stratopause

Stratosphère : Chauffage causé par l'absorption du flux solaire par CH_4 et les aérosols.
 $T \uparrow$ avec l'altitude

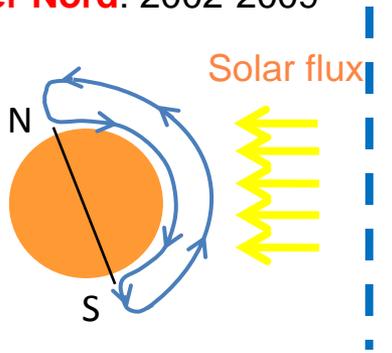
Variations saisonnières dans la moyenne atmosphère

Evolution saisonnière de la dynamique stratosphérique

■ Variations saisonnières de la dynamique de la moyenne atmosphère

Modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique :

Hiver Nord: 2002-2009



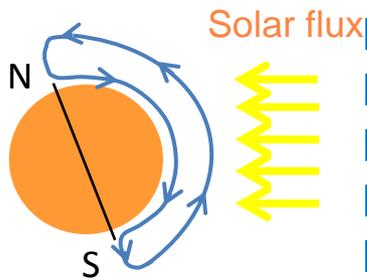
↑
**Equinoxe de
printemps Nord :**
11 Août 2009

Evolution saisonnière de la dynamique stratosphérique

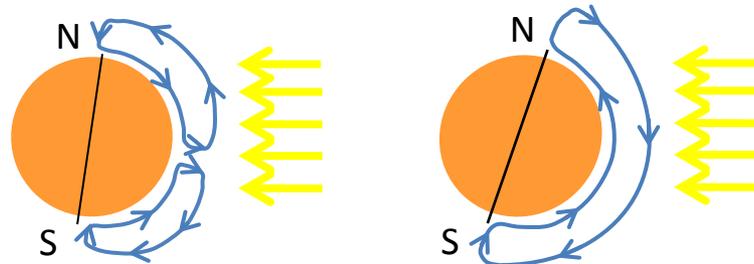
■ Variations saisonnières de la dynamique de la moyenne atmosphère

Modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique :

Hiver Nord: 2002-2009



Printemps Nord: 2009-2017



Transition en ~2ans années

Equinoxe de
printemps Nord :
11 Août 2009

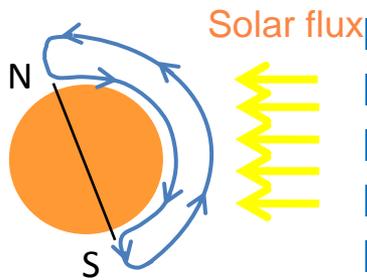
Solstice d'été
Nord :
25 Mai 2017

Evolution saisonnière de la dynamique stratosphérique

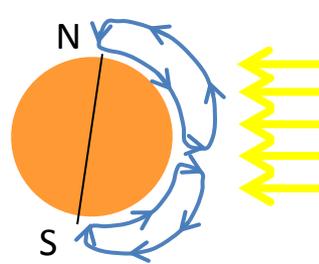
■ Variations saisonnières de la dynamique de la moyenne atmosphère

Modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique :

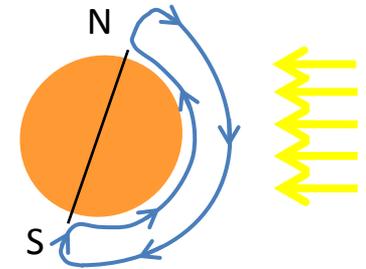
Hiver Nord: 2002-2009



Printemps Nord: 2009-2017



Été Nord: 2017-2025



Transition en ~2ans années

Equinoxe de
printemps Nord :
11 Août 2009

Solstice d'été
Nord :
25 Mai 2017

Evolution saisonnière de la dynamique stratosphérique

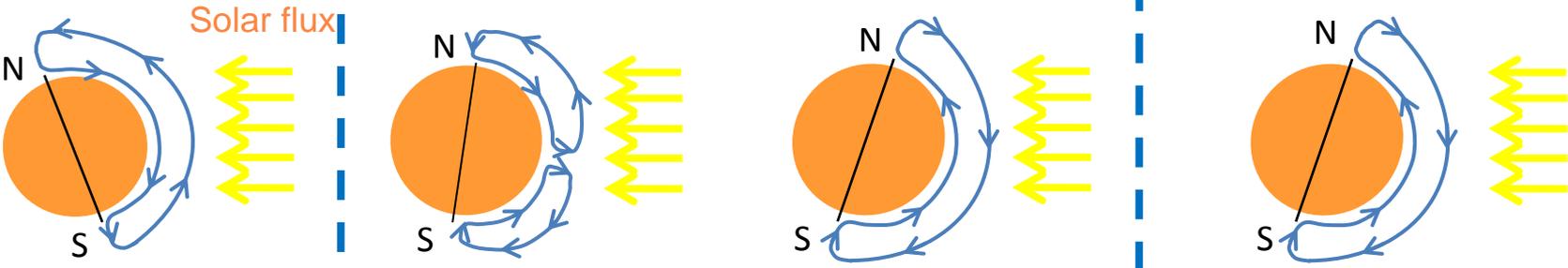
Variations saisonnières de la dynamique de la moyenne atmosphère

Modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique :

Hiver Nord: 2002-2009

Printemps Nord: 2009-2017

Été Nord: 2017-2025



Transition en ~2ans années

Equinoxe de printemps Nord :
11 Août 2009

Solstice d'été Nord :
25 Mai 2017

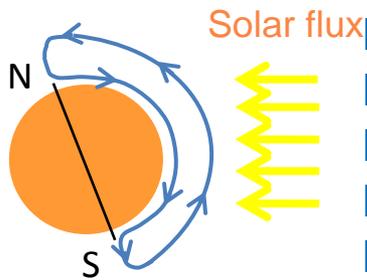


Evolution saisonnière de la dynamique stratosphérique

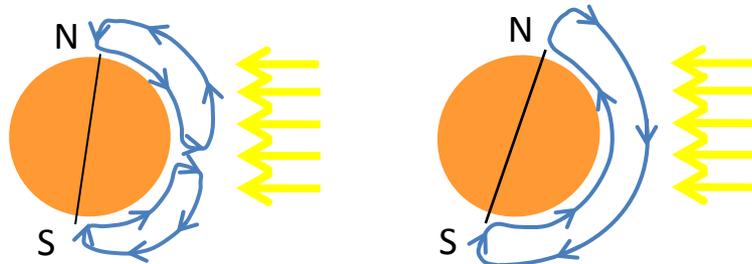
Variations saisonnières de la dynamique de la moyenne atmosphère

Modèle de circulation générale du Laboratoire de Météorologie Dynamique :

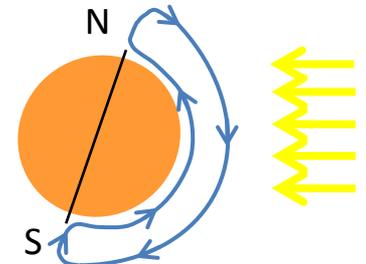
Hiver Nord: 2002-2009



Printemps Nord: 2009-2017

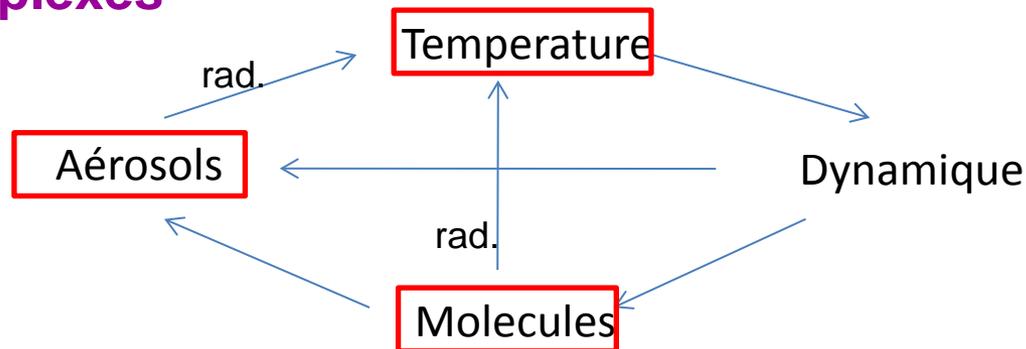


Été Nord: 2017-2025



Transition en ~2ans années

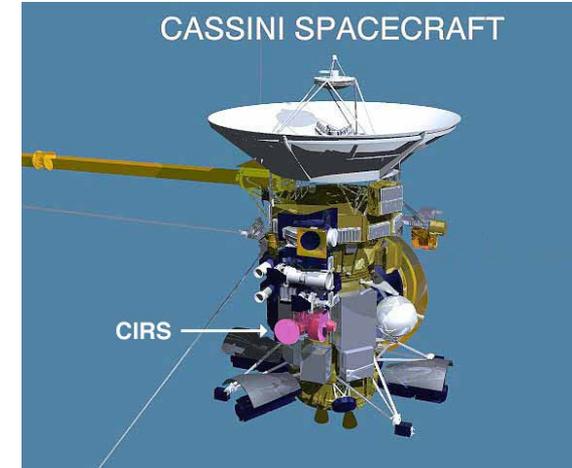
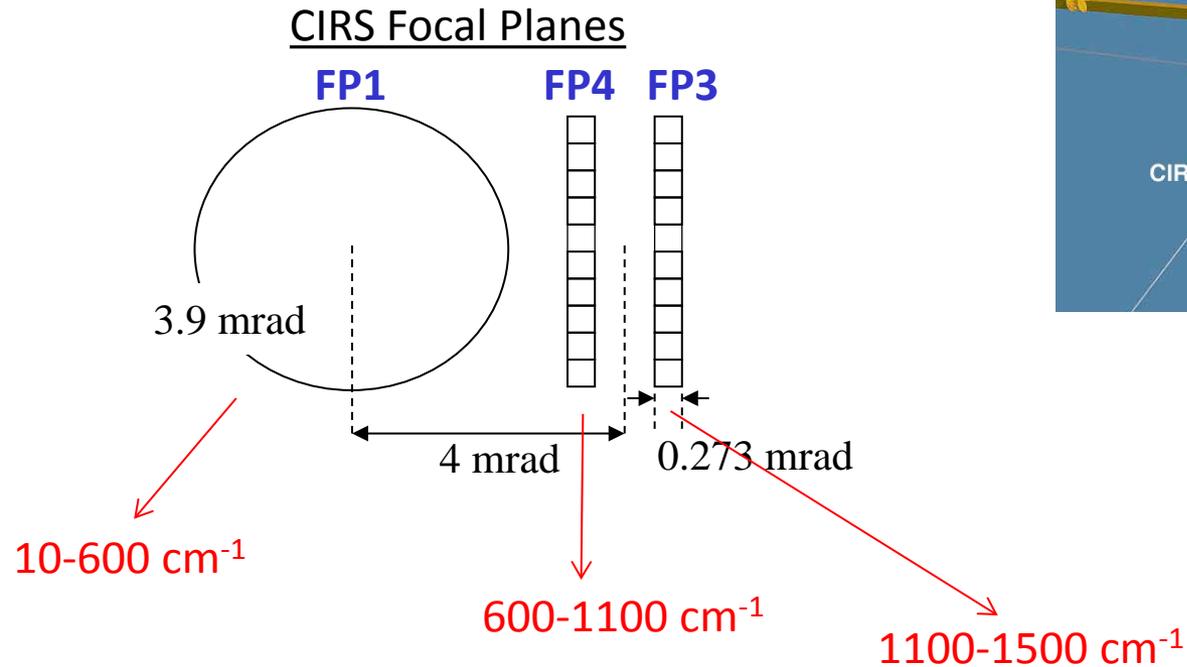
Couplages complexes



Cartographie de la température et les abondances moléculaires avec Cassini/CIRS.

Etude de la stratosphère avec l'instrument CIRS

■ Composite InfraRed Spectrometer:

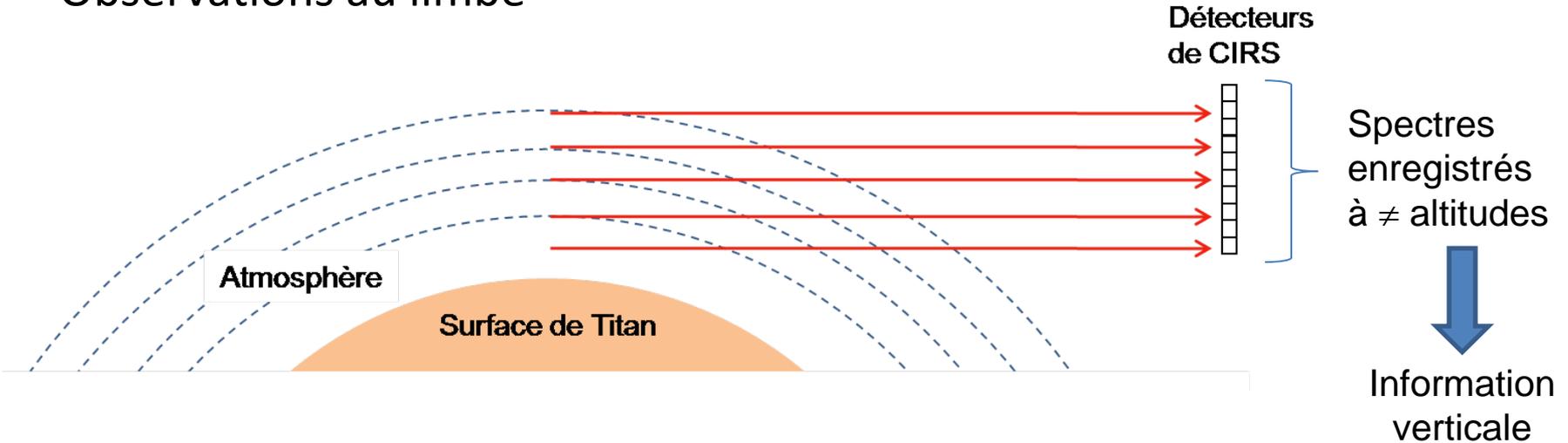


Résolution spectrale: 0.5 -15.5 cm⁻¹
Observation à visée nadir et au limbe.

Observation de l'émission thermique

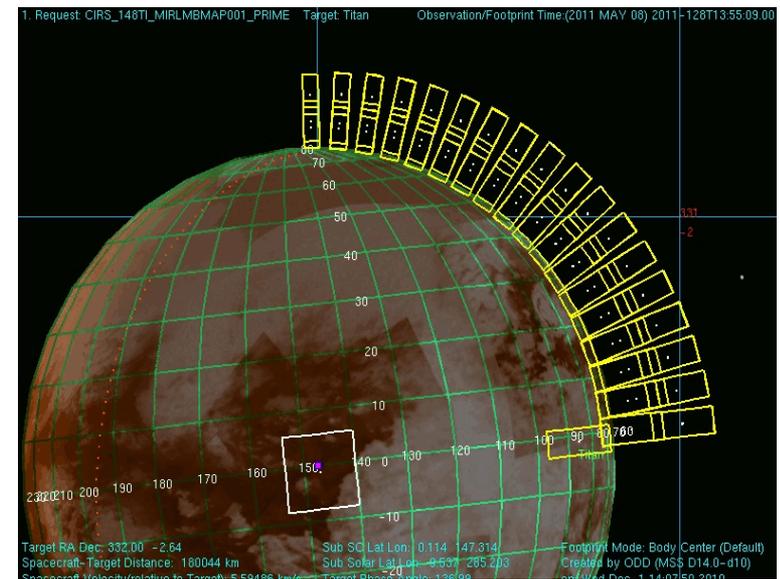
Etude de la stratosphère avec l'instrument CIRS

Observations au limbe



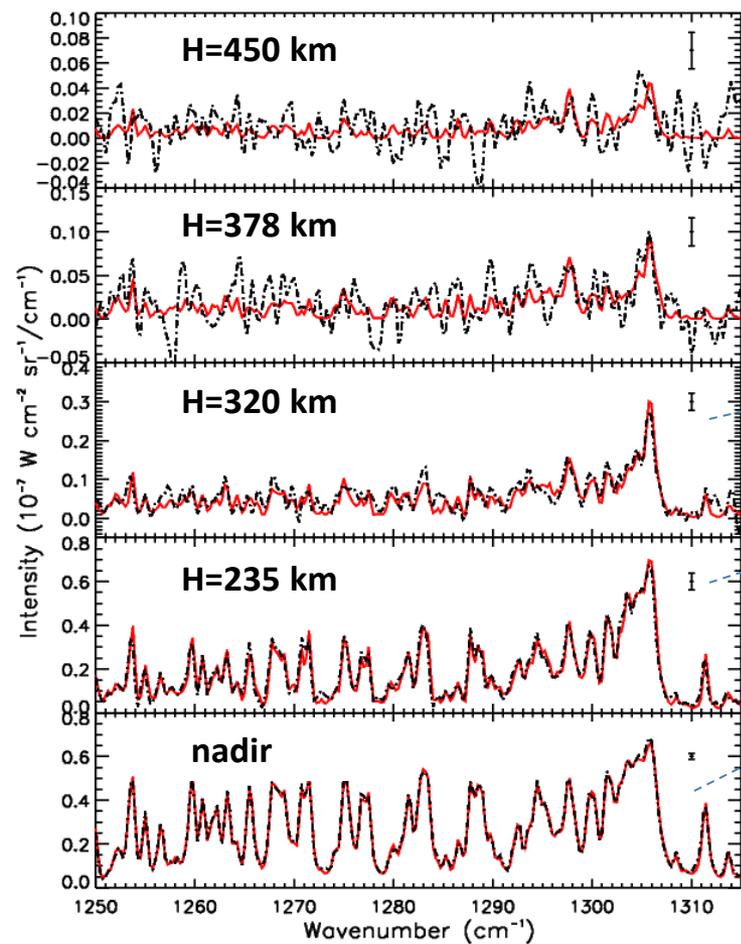
- Résolution verticale : ~ 30 km
- Région sondée : 150 - 500 km

Scans au limbe sur un hémisphère :
=> Cartographie globale à une date donnée.

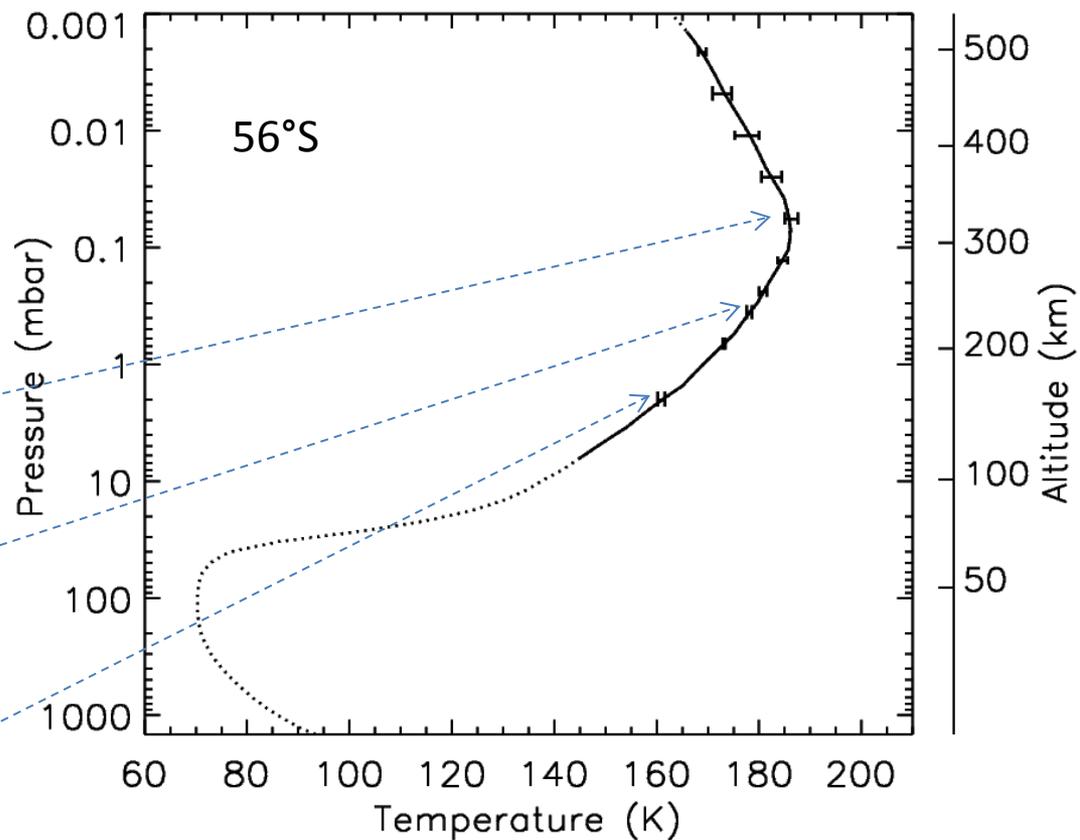


Inversion du profil de température

Exemple à 56°S

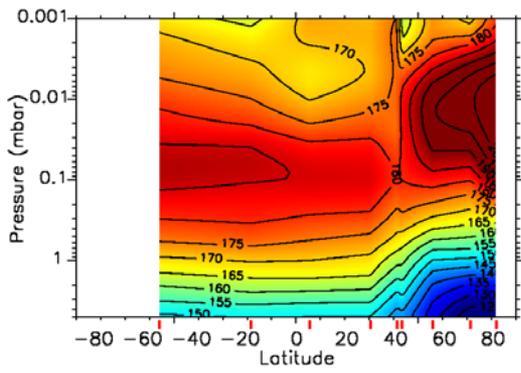


— spectres calculés
- - - spectres observés



Variations saisonnières : température et abondance de HCN

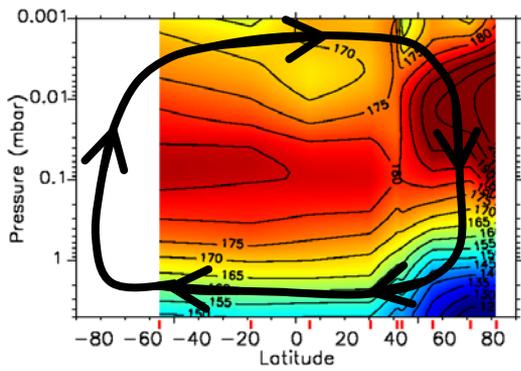
(Vinatier et al., 2015)



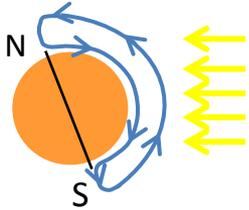
Hiver nord

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)

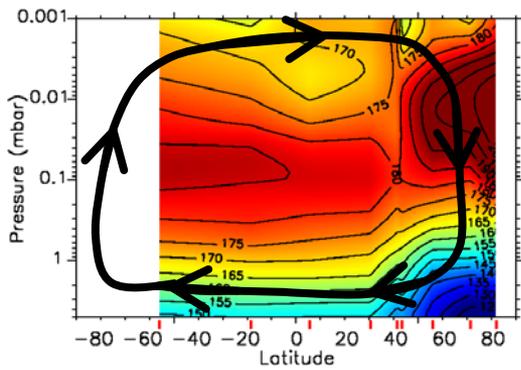


Hiver nord

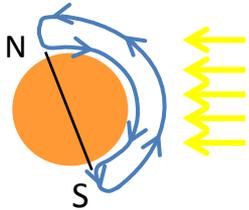


Variations saisonnières : température et abondance de HCN

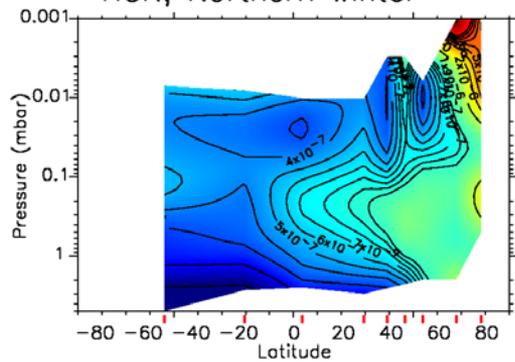
(Vinatier et al., 2015)



Hiver nord



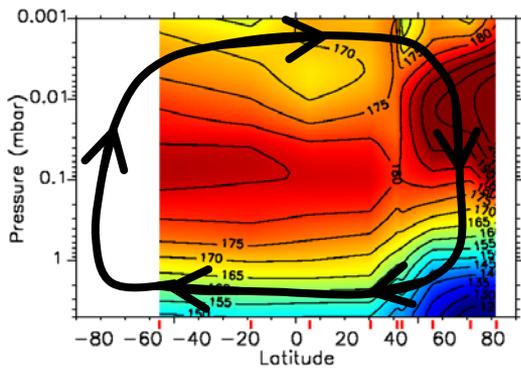
HCN, Northern winter



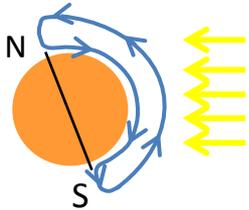
Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

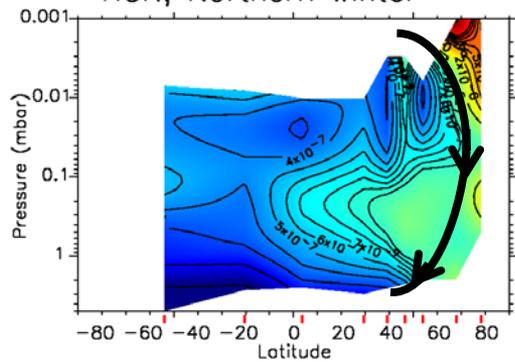
(Vinatier et al., 2015)



Hiver nord



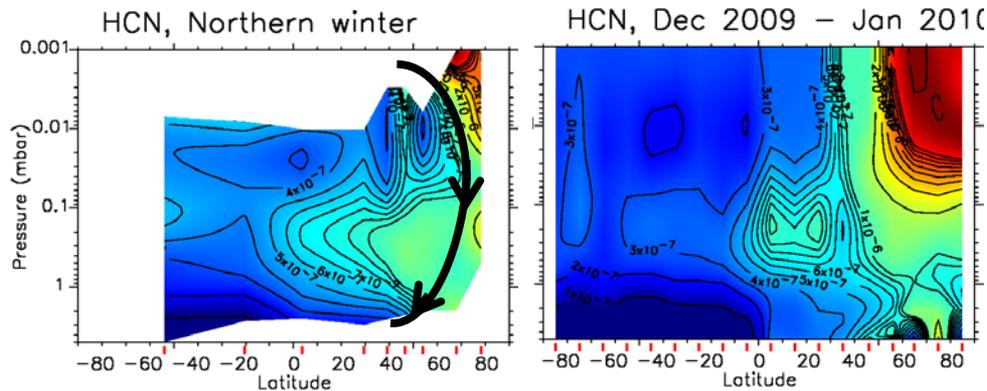
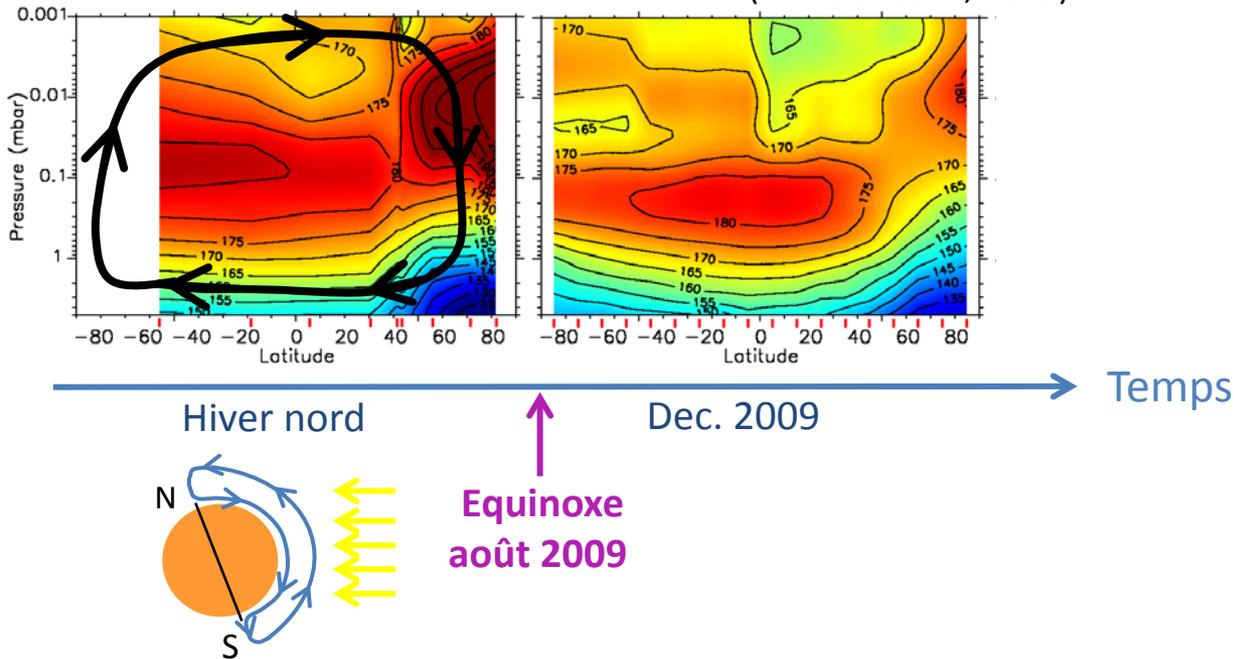
HCN, Northern winter



Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

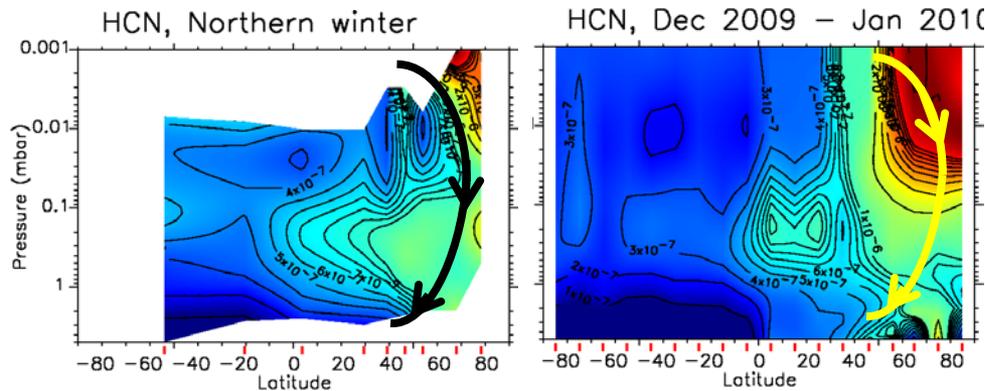
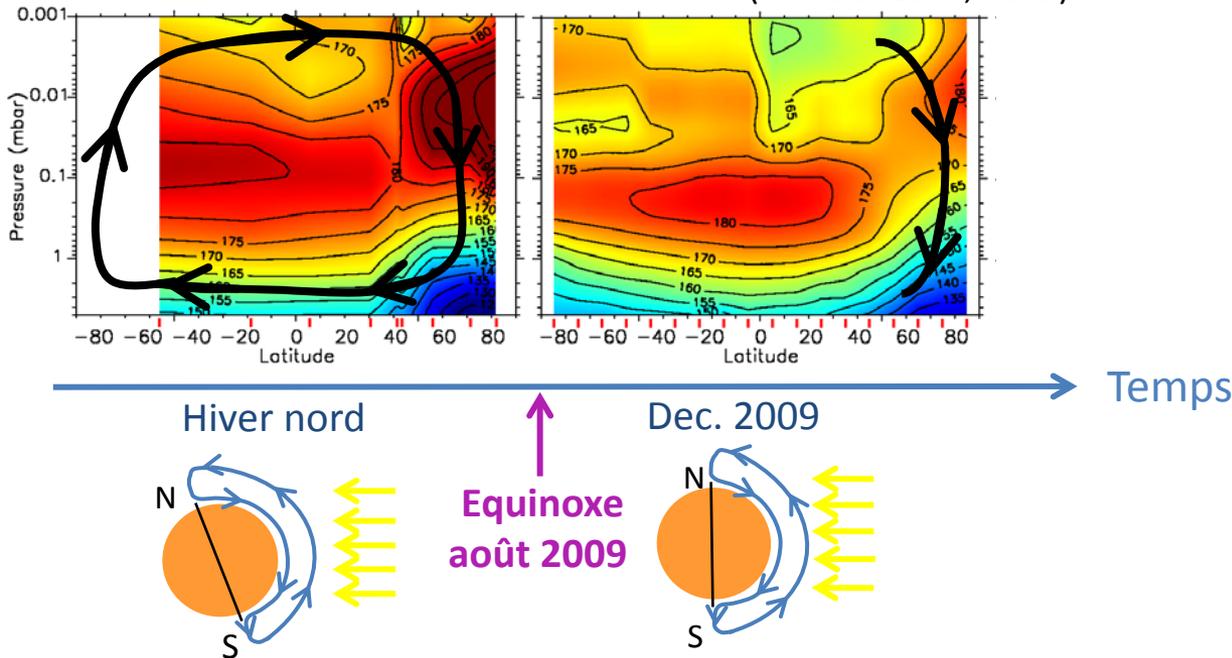
(Vinatier et al., 2015)



Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)

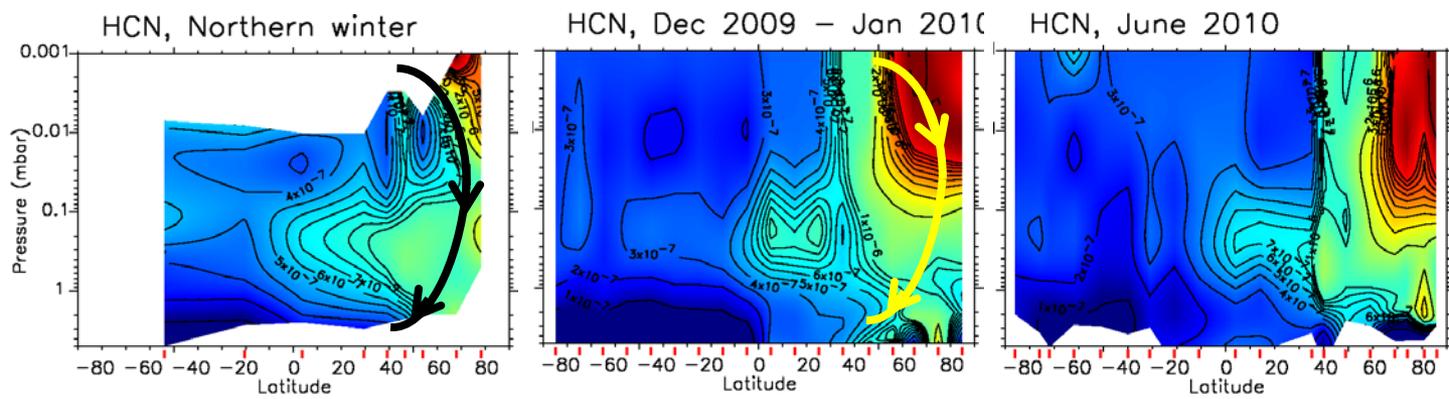
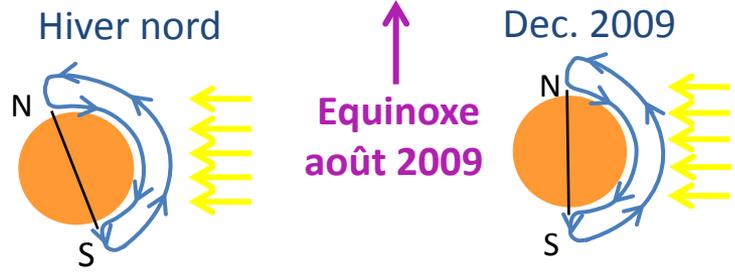
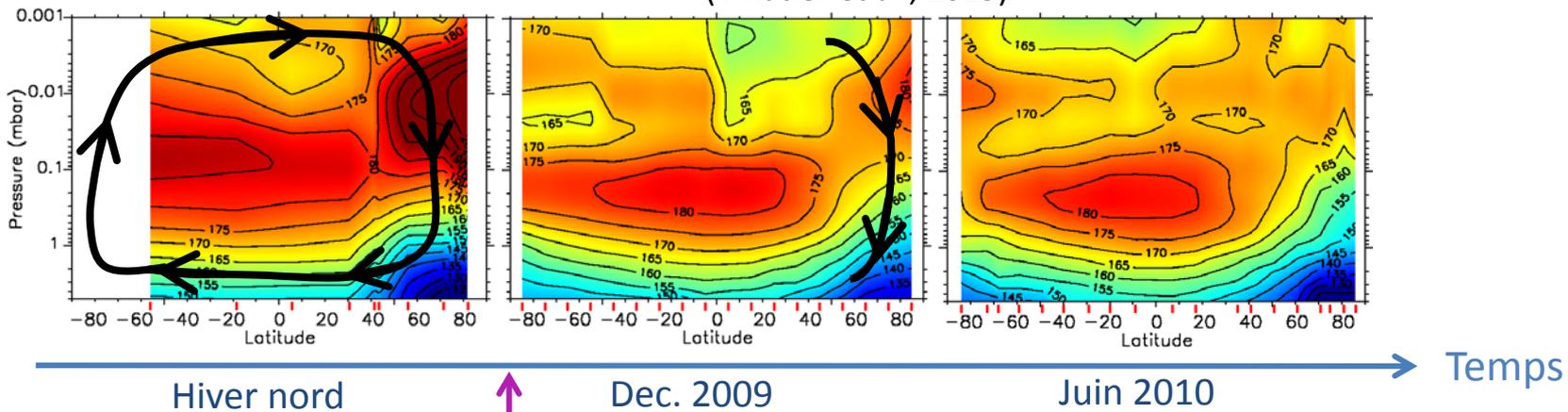


Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Branche descendante au pôle N toujours active

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)

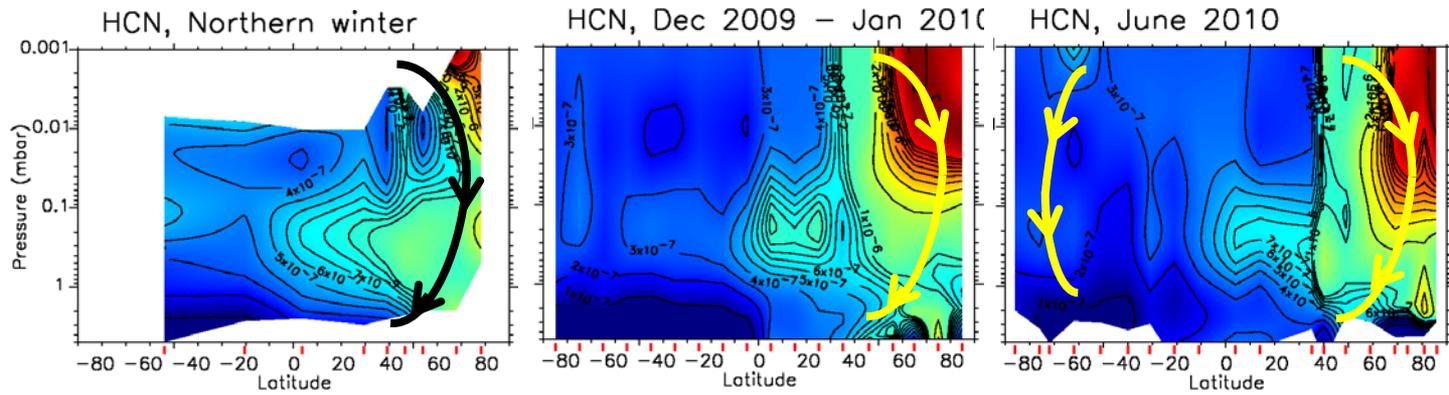
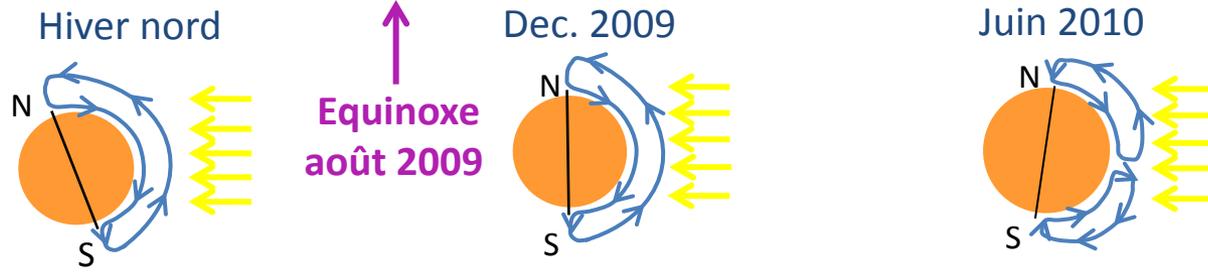
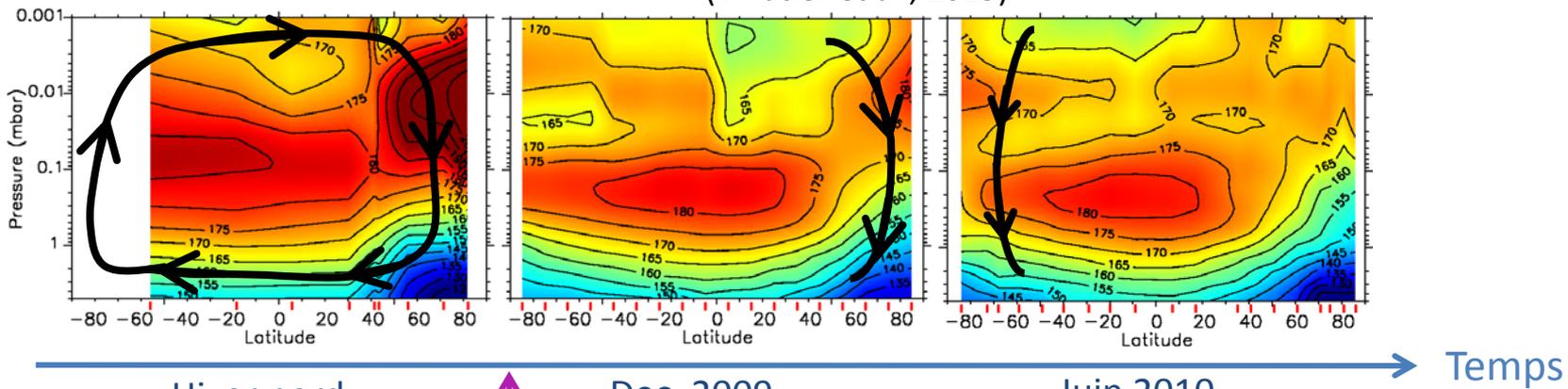


Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Branche descendante au pôle N toujours active

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)



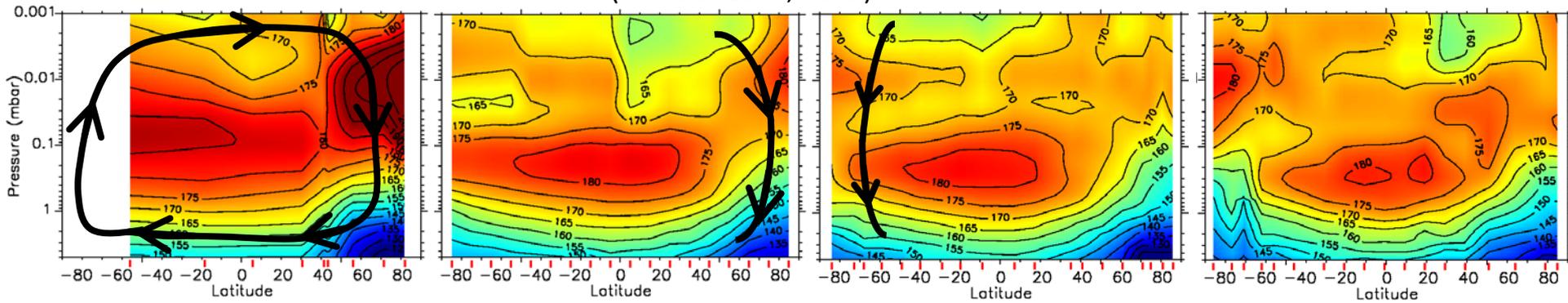
Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Branche descendante au pôle N toujours active

Chauffage adiabatique au pôle S + enrichissement au pôle N => **2 cellules de circulation**

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)

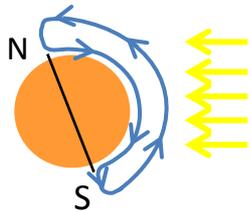


Hiver nord

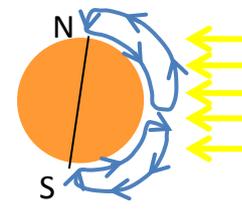
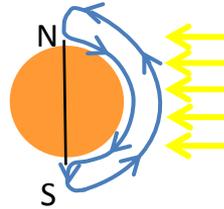
Dec. 2009

Juin 2010

Juin 2011



Equinoxe août 2009

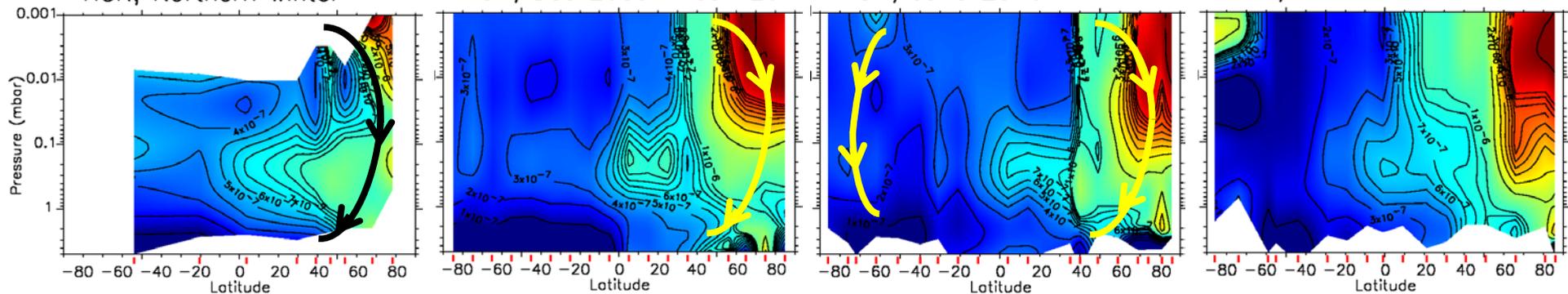


HCN, Northern winter

HCN, Dec 2009 – Jan 2010

HCN, June 2010

HCN, June 2011



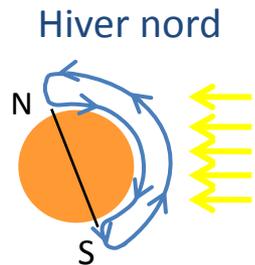
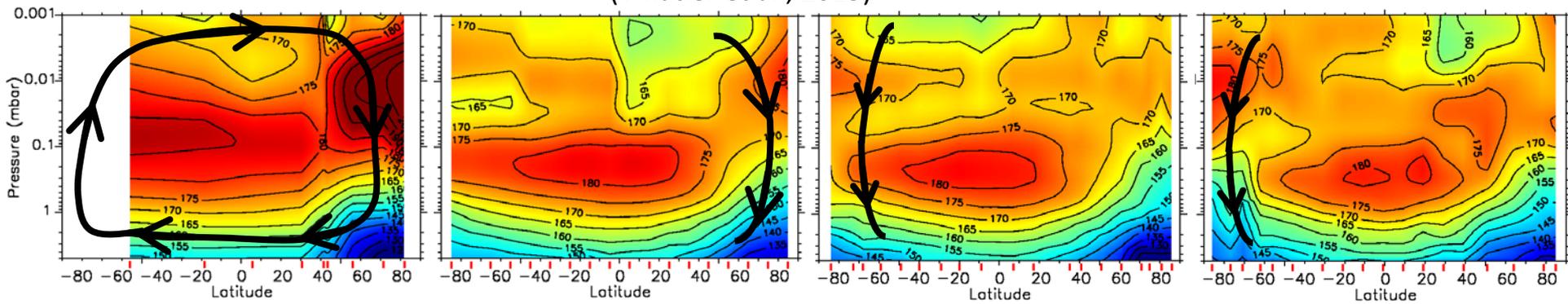
Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

Branche descendante au pôle N toujours active

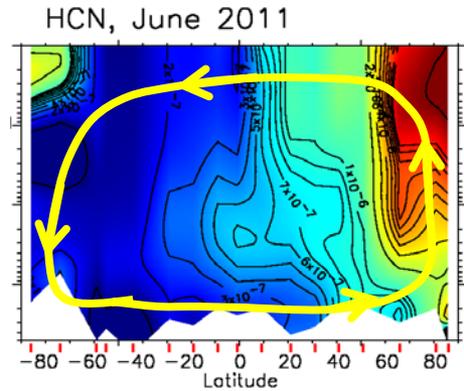
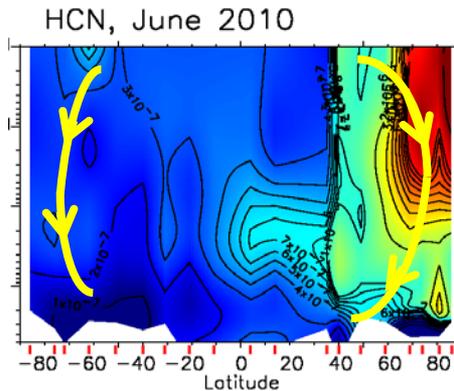
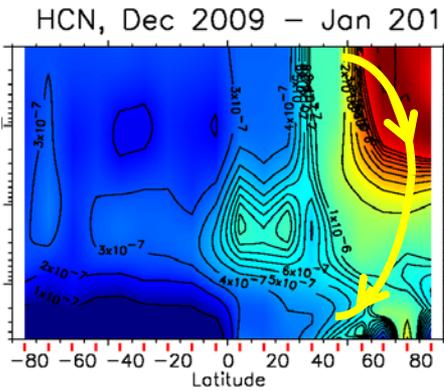
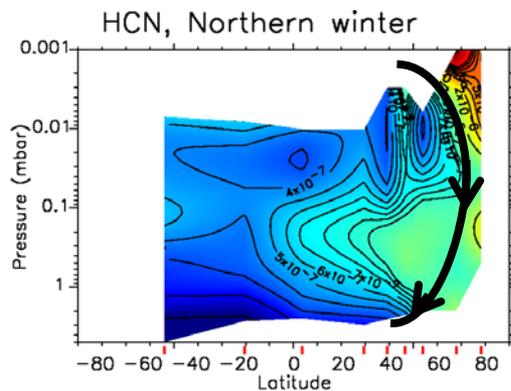
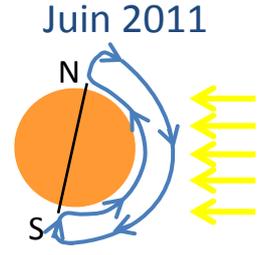
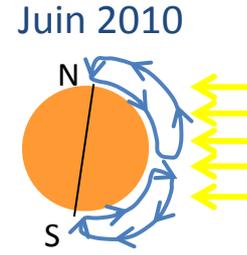
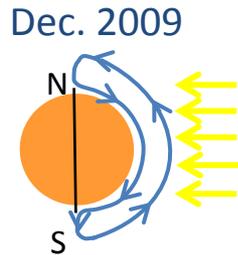
Chauffage adiabatique au pôle S + enrichissement au pôle N => **2 cellules de circulation**

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)



Equinoxe
août 2009



Branche descendante au pôle N => chauffage adiabatique et enrichissement de HCN

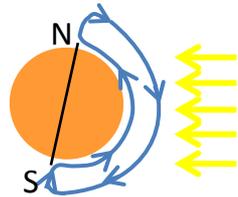
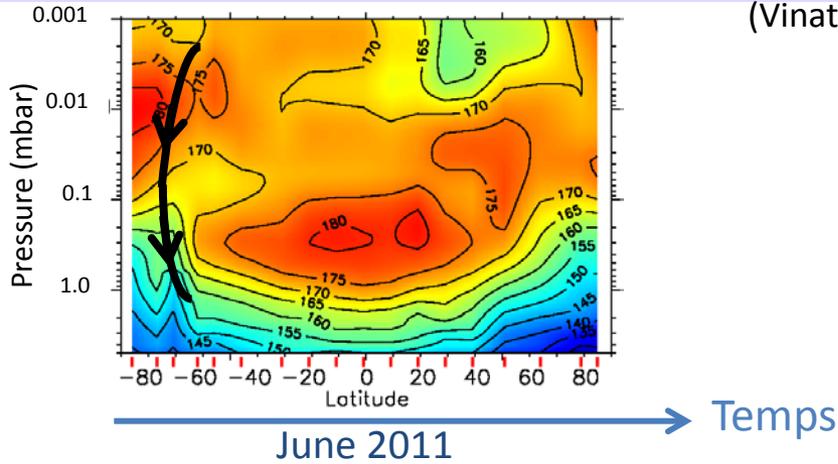
Branche descendante au pôle N toujours active

Chauffage adiabatique au pôle S + enrichissement au pôle N => **2 cellules de circulation**

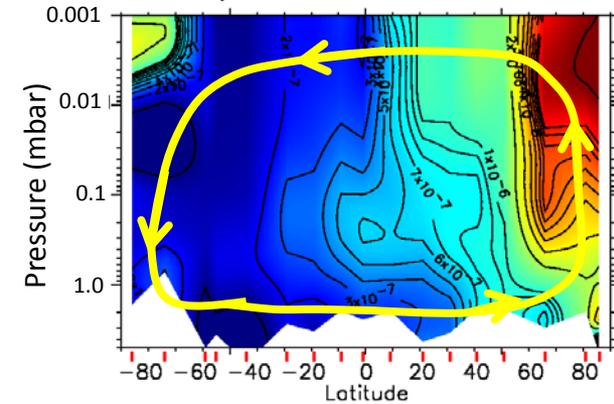
Enrichissement au pôle S et à haute altitude dans hémisphère N => **1 cellule de circulation inversée**

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)



HCN, June 2011

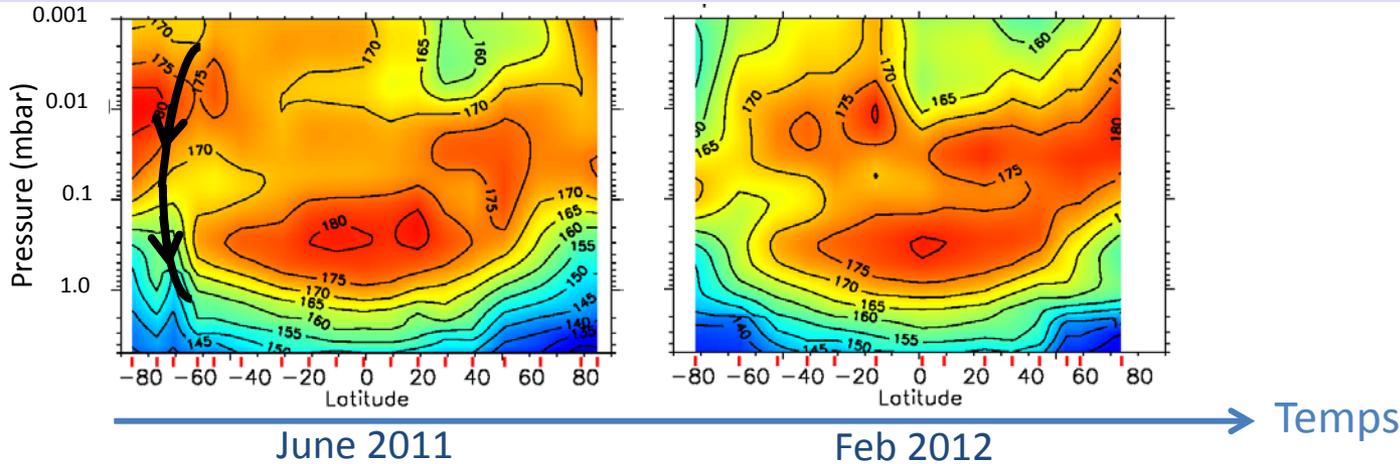


Enrichissement au pôle S et à haute altitude dans hémis. N

=> **1 cellule de circulation inversée**

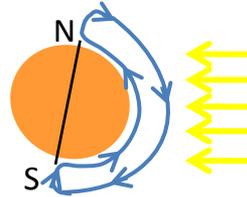
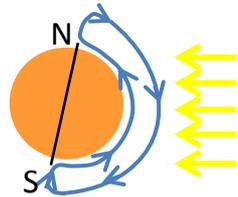
Variations saisonnières : température et abondance de HCN

(Vinatier et al., 2015)



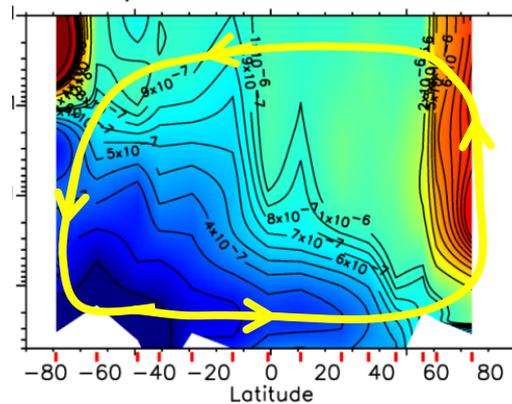
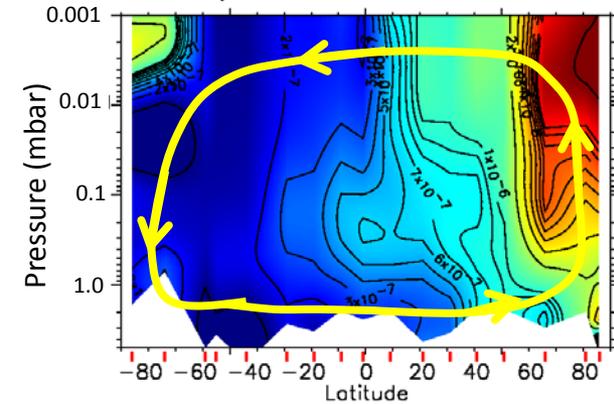
June 2011

Feb 2012



HCN, June 2011

HCN, Jan.-Feb. 2012

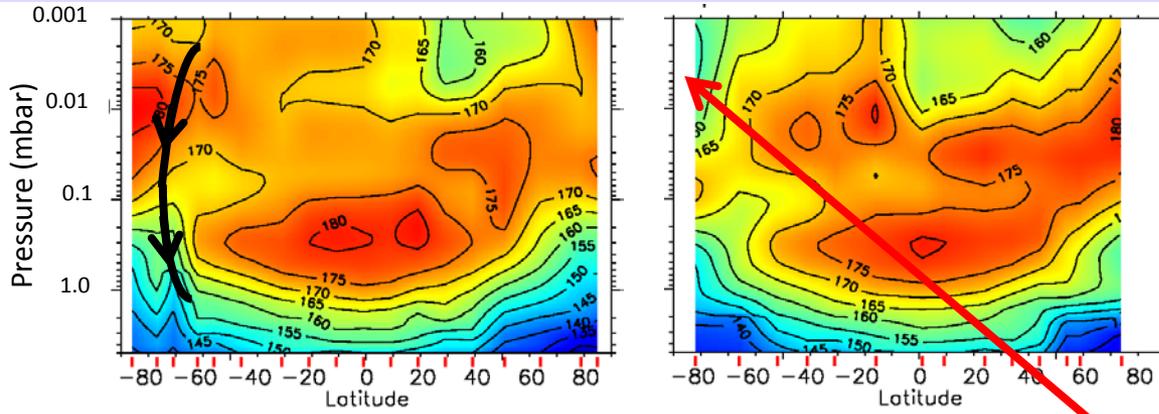


Enrichissement au pôle S et à haute altitude dans hémis. N
=> **1 cellule de circulation inversée**

Enrichissement à haute alt et moyenne latitude provenant du pôle N + enrichissement renforcé au pôle S.

Variations saisonnières : température et abondance de HCN

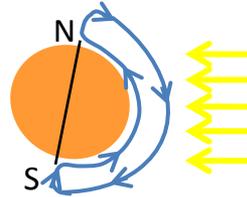
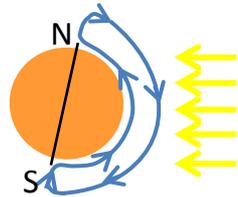
(Vinatier et al., 2015)



June 2011

Feb 2012

→ Temps

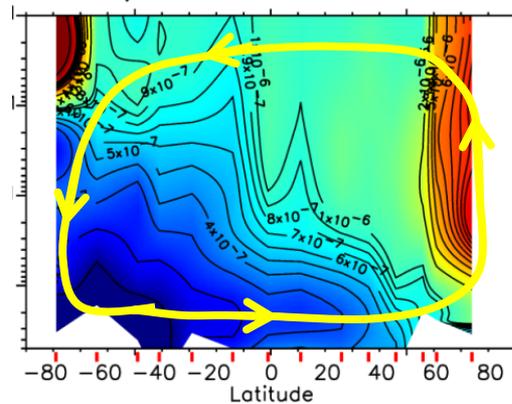
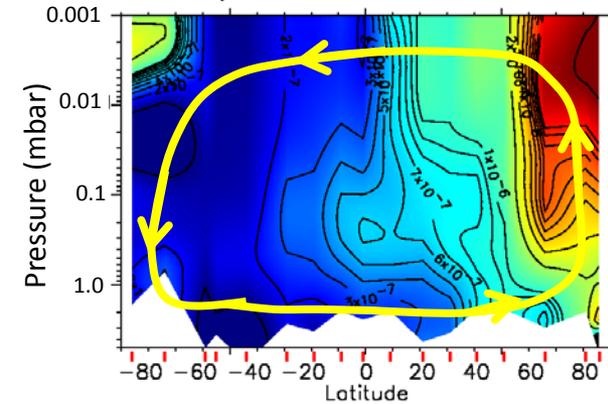


- Refroidissement inattendu au pôle S

→ refroidissement radiatif par les molécules et les aérosols ?

HCN, June 2011

HCN, Jan.-Feb. 2012

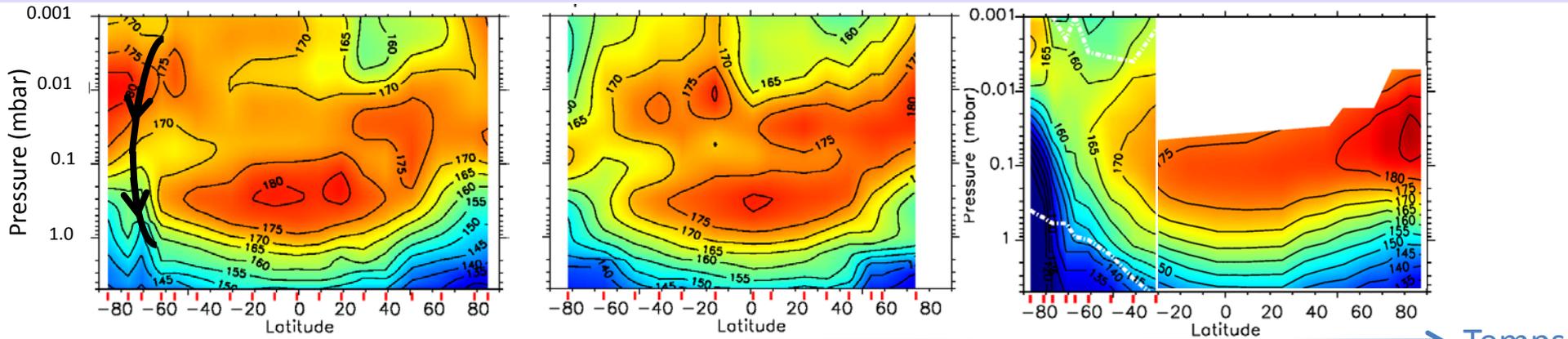


Enrichissement au pôle S et à haute altitude dans hémis. N

=> **1 cellule de circulation inversée**

Enrichissement à haute alt et moyenne latitude provenant du pôle N + enrichissement renforcé au pôle S.

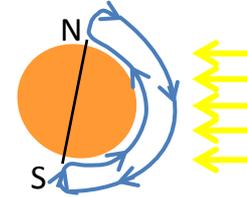
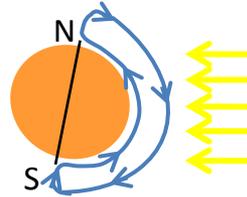
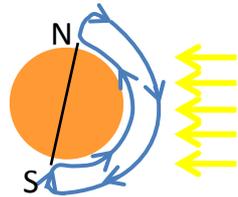
Variations saisonnières : température et abondance de HCN



June 2011

Feb 2012

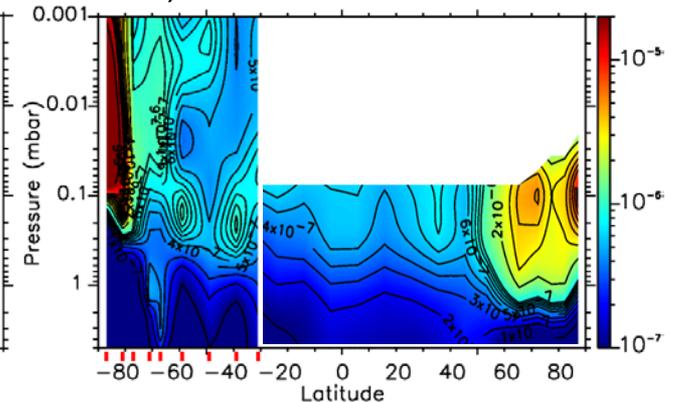
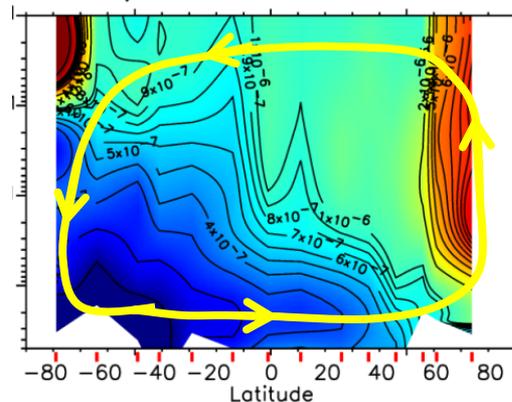
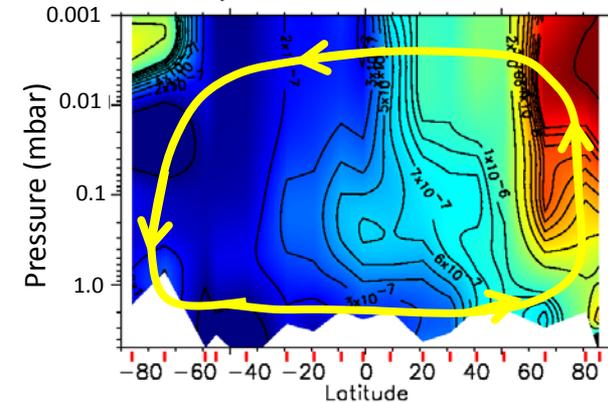
Mars 2015



HCN, June 2011

HCN, Jan.-Feb. 2012

HCN, Mars 2015

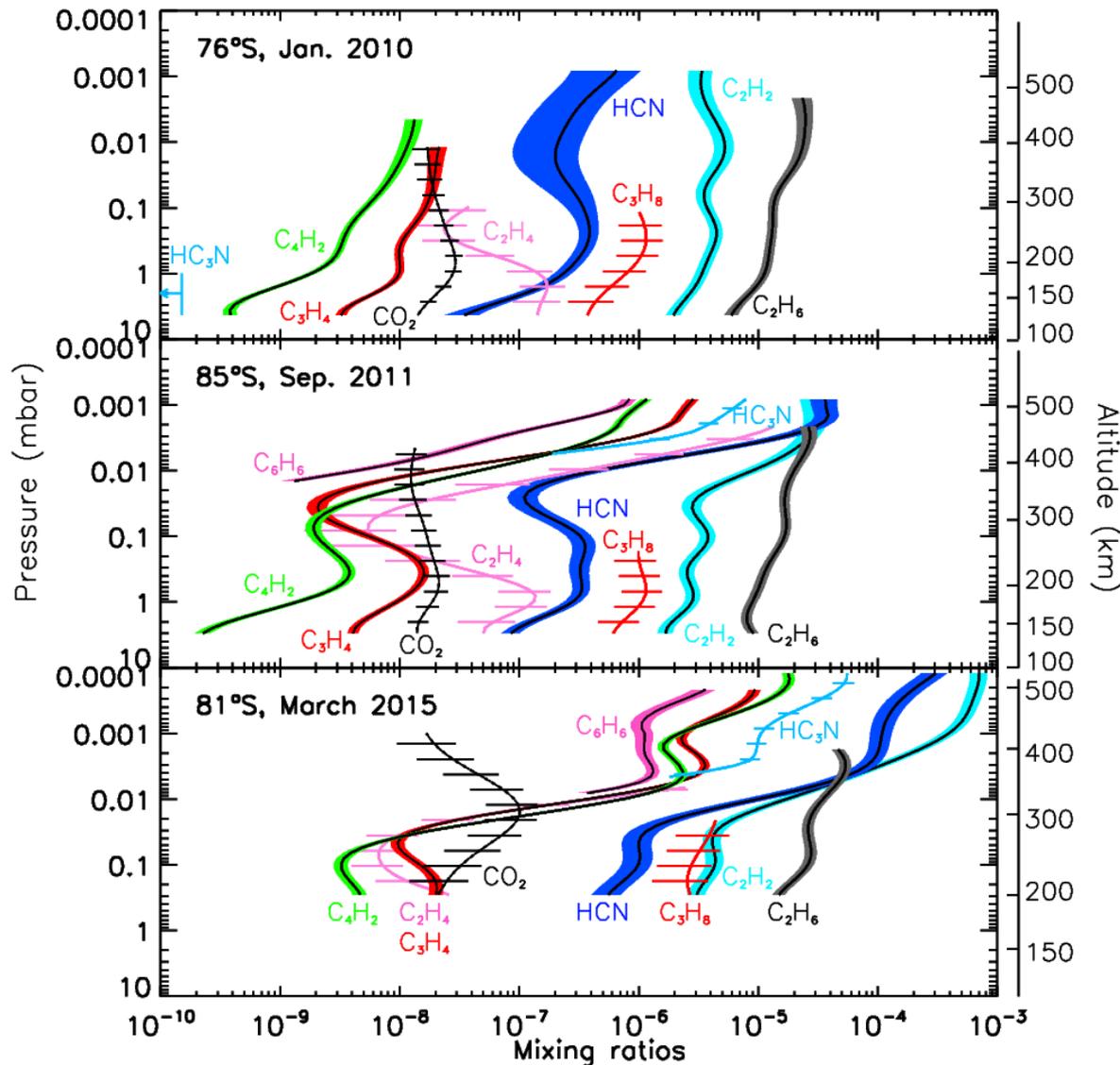


Enrichissement au pôle S et à haute altitude dans hémis. N
 => **1 cellule de circulation inversée**

Enrichissement à haute alt et moyenne latitude provenant du pôle N + enrichissement renforcé au pôle S.

- T du pôle N augmente.
- Pole Sud : $T < 120$ K sous 0.1 mbar (300 km) et enrichissement au-dessus de 300 km.

Très fort enrichissement au pôle sud après l'équinoxe



(Vinatier et al., 2015)

En 2015, at 500 km, les rapports de mélange des molécules sont similaires à leurs valeurs mesurées insitu à 1000 km par INMS.

Très fort enrichissement de nombreuses molécules au-dessus du pôle sud d'une intensité non prédite par les modèles.

Comparaison aux modèles de circulation générale

Observations CIRS => renversement total de la dynamique atmosphérique en moins de 2 ans.

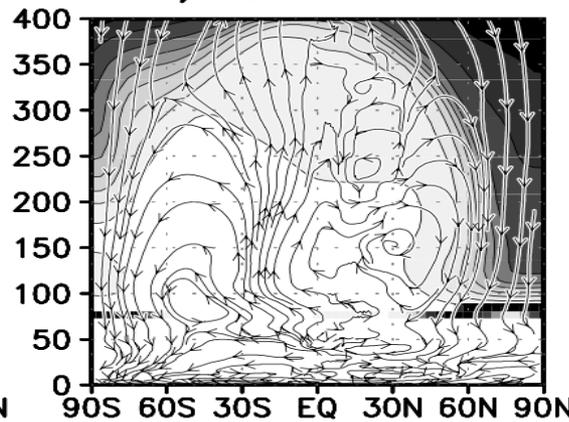
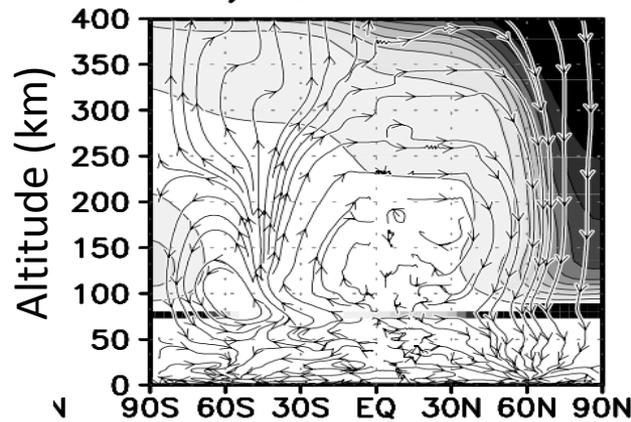
Abondance de HCN prédite par le GCM 2D de l'IPSL (Hourdin et al., 2004)

Hiver Nord

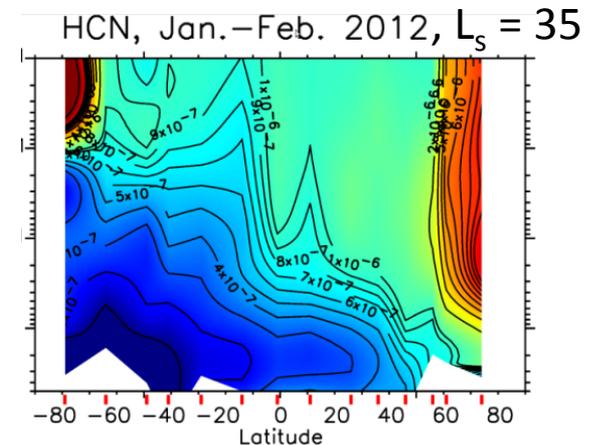
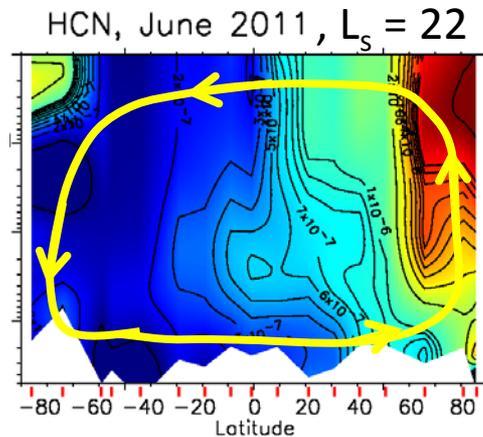
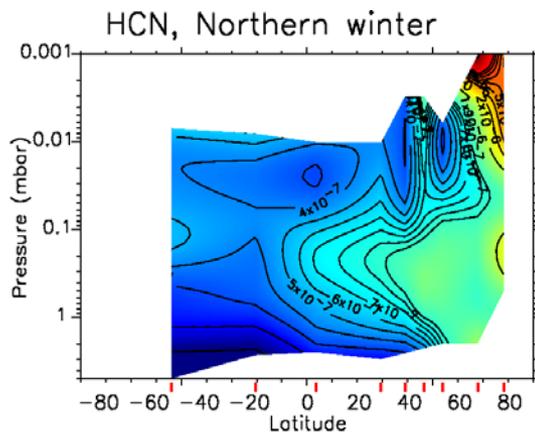
e) $L_s=315-350$

$L_s = 0 \Leftrightarrow$ Equinoxe, août 2009

f) $L_s=350-15$



Les observations sont aussi globalement en accord avec les prédictions des GCM 3D (Lebonnois et al. 2012, Newman et al., 2011)

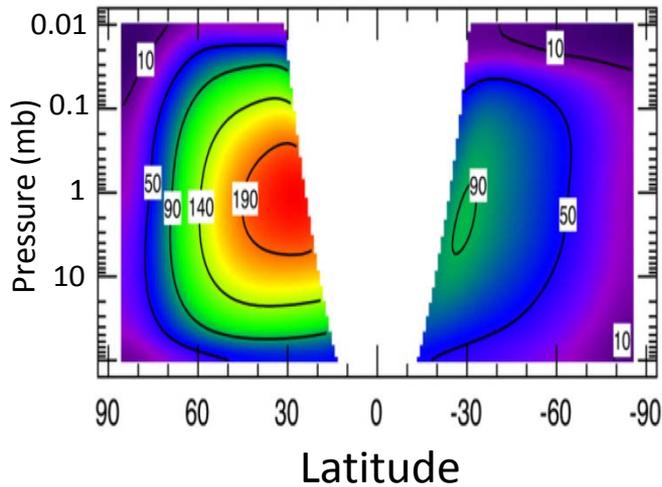


Variations saisonnières des vents stratosphériques

Calculés à partir des champs de température mesurés par CIRS (équation du vent thermique)

Hiver Nord

2005



(Achterberg et al., 2010)

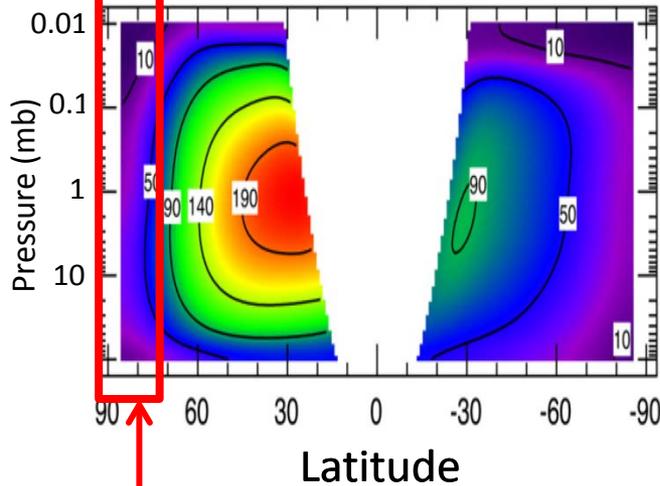
Jet stratosphérique dans
l'hémisphère nord
 $v = 190 \text{ m.s}^{-1}$

Variations saisonnières des vents stratosphériques

Calculés à partir des champs de température mesurés par CIRS (équation du vent thermique)

Hiver Nord

2005

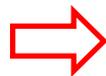


(Achterberg et al., 2010)

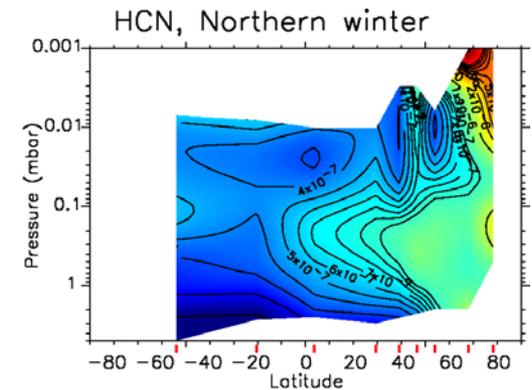
Jet stratosphérique dans l'hémisphère nord
 $v = 190 \text{ m.s}^{-1}$

Vortex polaire confiné

+ descente d'air



Confinement de l'enrichissement à très haute latitude nord

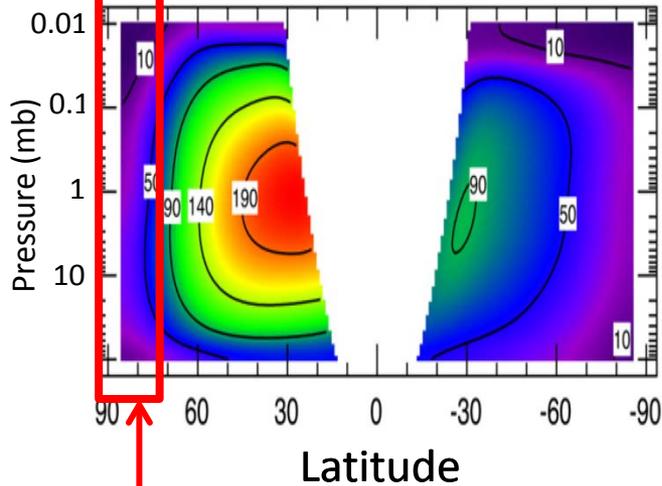


Variations saisonnières des vents stratosphériques

Calculés à partir des champs de température mesurés par CIRS (équation du vent thermique)

Hiver Nord

2005



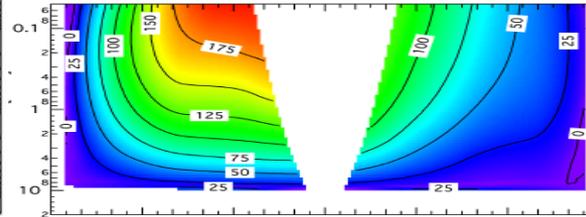
(Achterberg et al., 2010)

Vortex
polaire
confiné

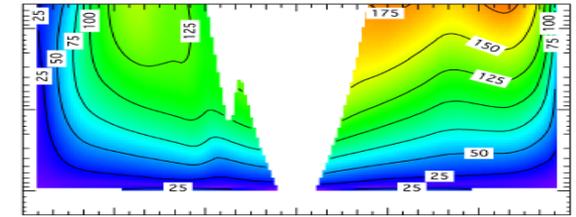
Printemps Nord

(Achterberg et al., 2015)

May 2009, $L_s = 357^\circ$



Fev 2013, $L_s = 42^\circ$

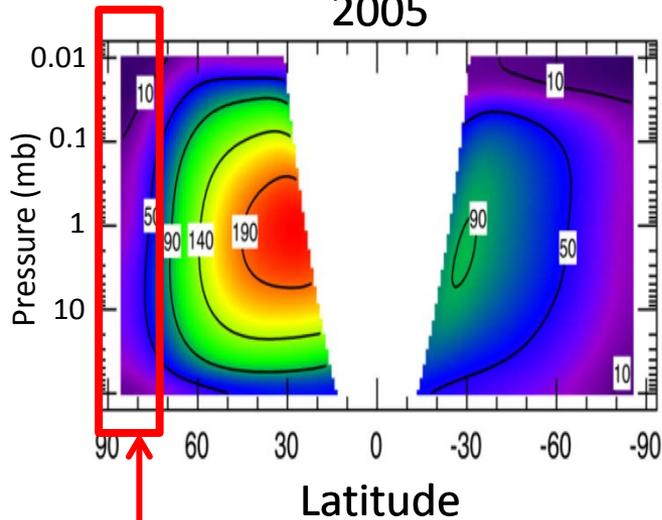


Variations saisonnières des vents stratosphériques

Calculés à partir des champs de température mesurés par CIRS (équation du vent thermique)

Hiver Nord

2005



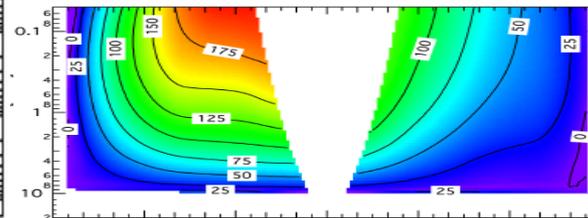
(Achterberg et al., 2010)

Vortex
polaire
confiné

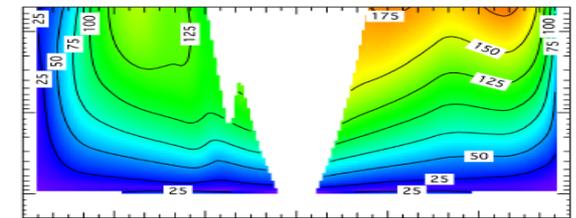
Printemps Nord

(Achterberg et al., 2015)

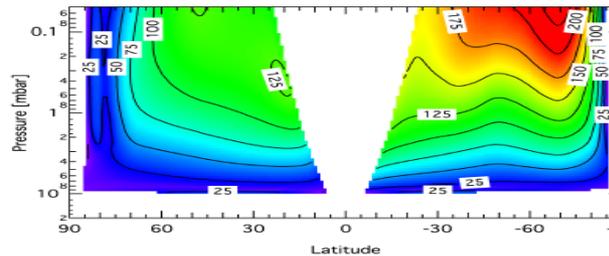
May 2009, $L_s = 357^\circ$



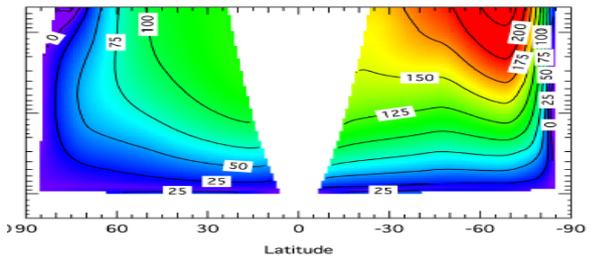
Fev 2013, $L_s = 42^\circ$



Fev 2014, $L_s = 53^\circ$



Dec 2014, $L_s = 63^\circ$



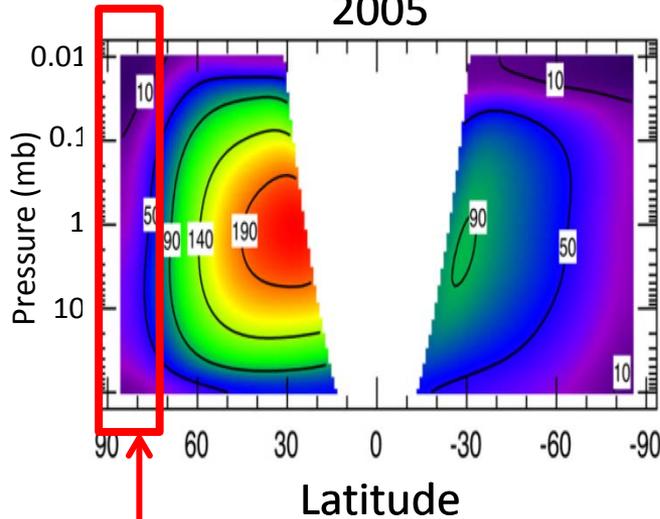
Décélération du jet Nord alors qu'un fort jet est apparu dans l'hémisphère sud.

Variations saisonnières des vents stratosphériques

Calculés à partir des champs de température mesurés par CIRS (équation du vent thermique)

Hiver Nord

2005



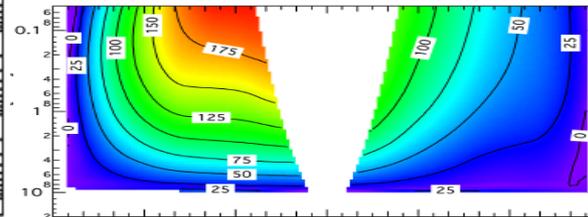
(Achterberg et al., 2010)

Vortex polaire confiné

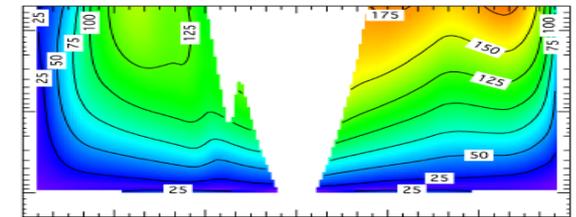
Printemps Nord

(Achterberg et al., 2015)

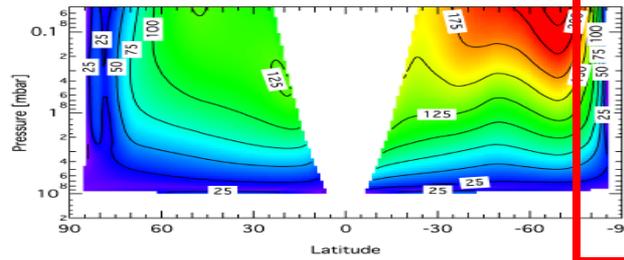
May 2009, $L_s = 357^\circ$



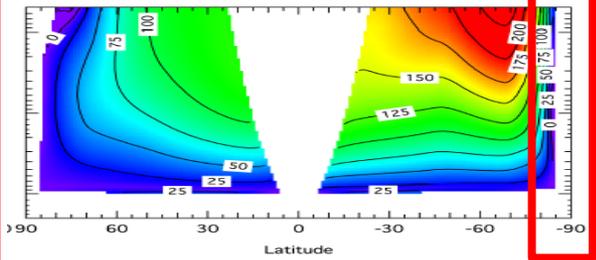
Fev 2013, $L_s = 42^\circ$



Fev 2014, $L_s = 53^\circ$



Dec 2014, $L_s = 63^\circ$

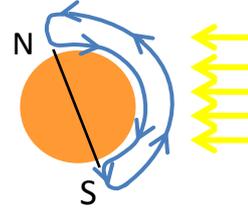


Décélération du jet Nord alors qu'un fort jet est apparu dans l'hémisphère sud -> **vortex polaire sud**.
Confinement des molécules au pôle sud.

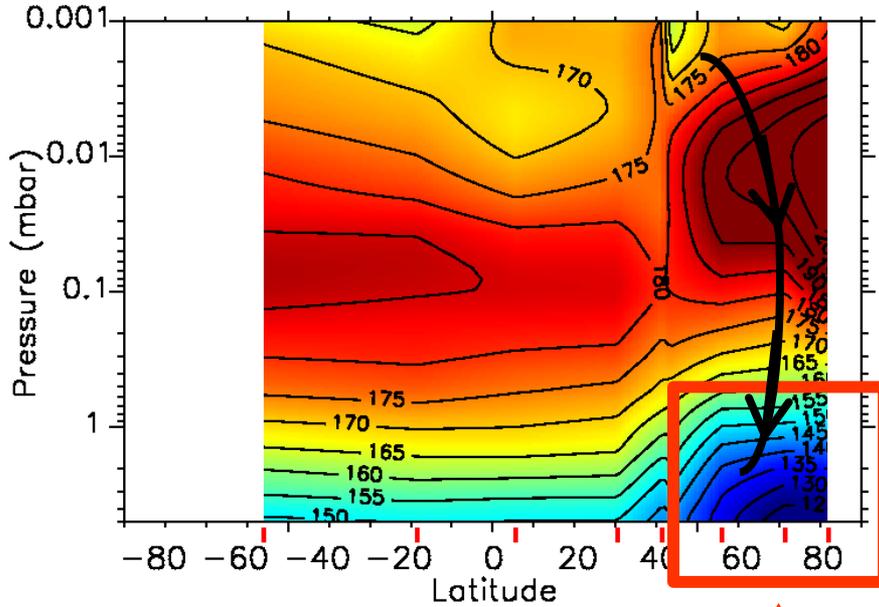
Variations saisonnières au pôle Nord

Variations saisonnières au pôle nord: hiver et printemps

Pendant l'hiver nord :

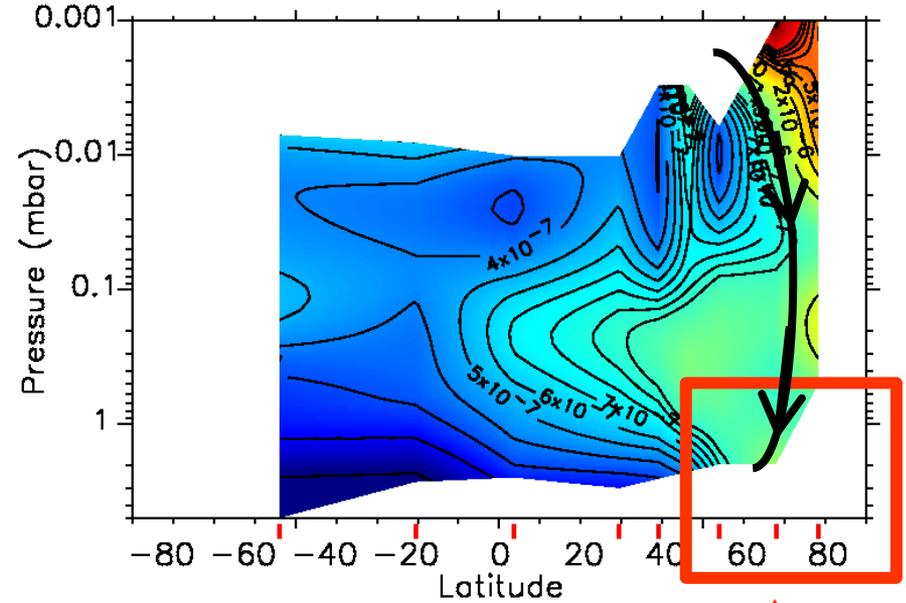


Température



Faibles températures

Abondance de HCN



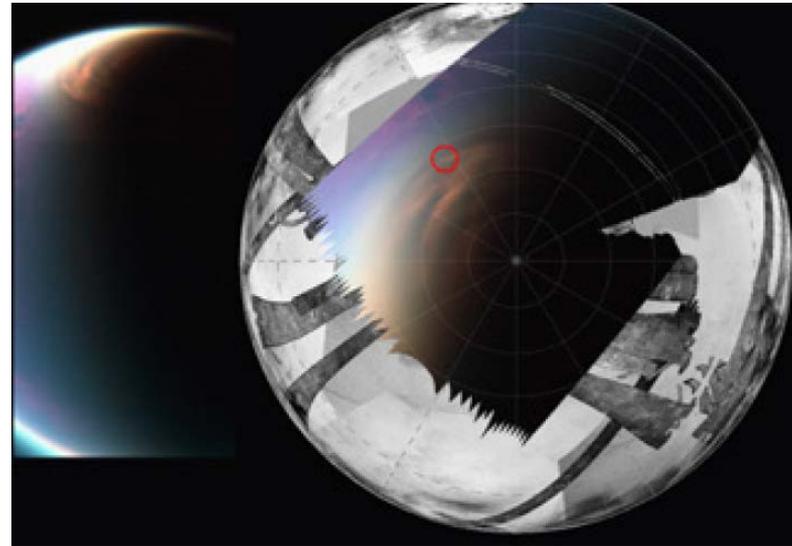
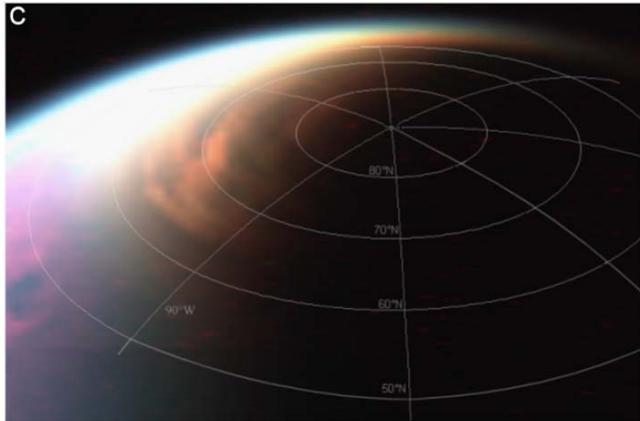
+
Descente d'air entrainant un fort enrichissement des molécules

➡ Formation d'un nuage persistant au dessus du pôle nord par condensation des molécules.

Nuage au pôle nord

Détection d'un nuage de C_2H_6 étendu sur les spectres VIMS en Décembre 2005 (Griffith et al. 2006)

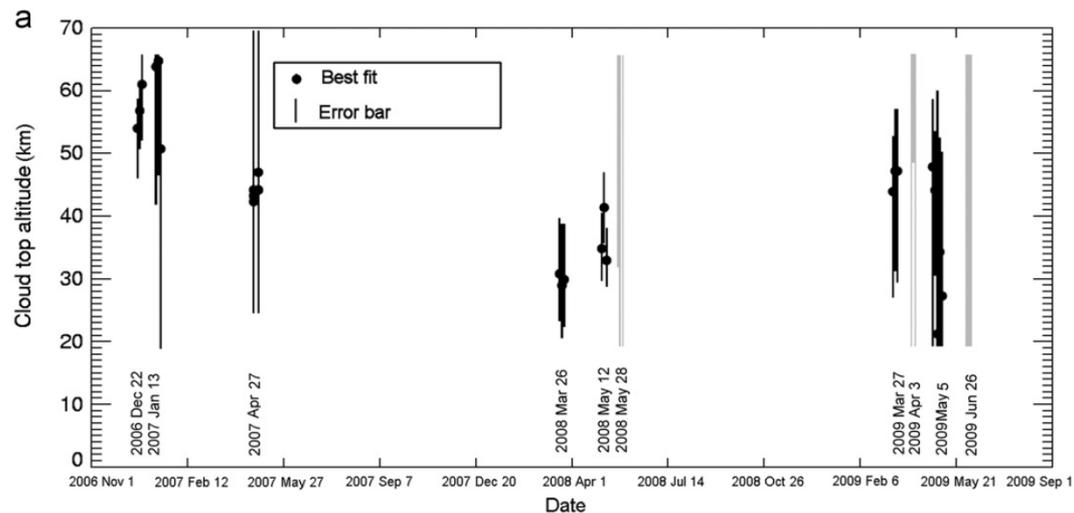
décembre 2006 (T22)



Latitude : **90°N – 65°N**

Utilisation d'un code de transfert radiatif => **altitude : 30 – 65 km**

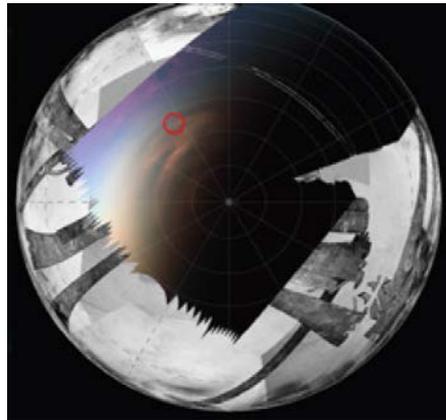
(Le Mouelic et al., 2012)



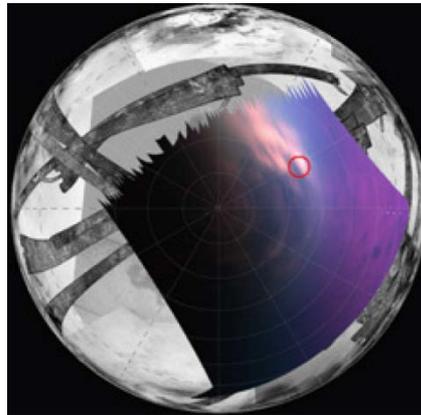
Nuage au pôle nord : évolution hiver -> printemps

Observations VIMS

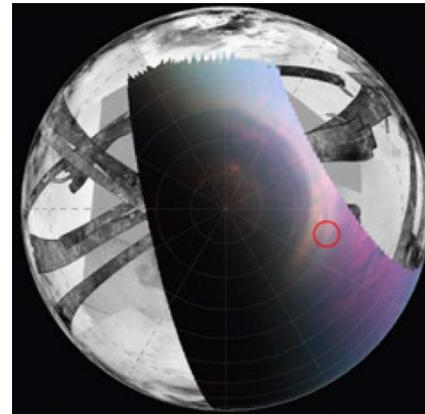
(Le Mouelic et al., 2012)



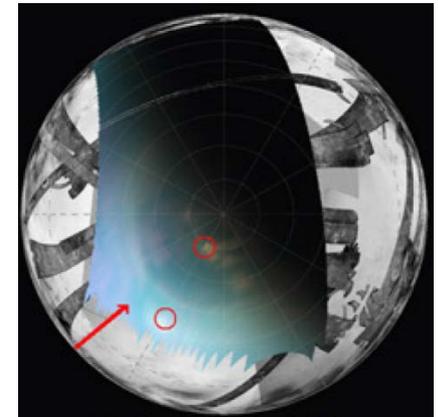
Décembre 2006



Mars 2008

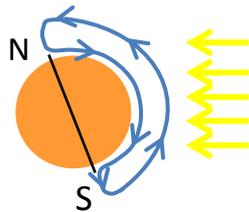


Mars 2009



Mai 2009

Hiver nord



Fin de l'hiver (équinoxe de printemps nord en août 2009)

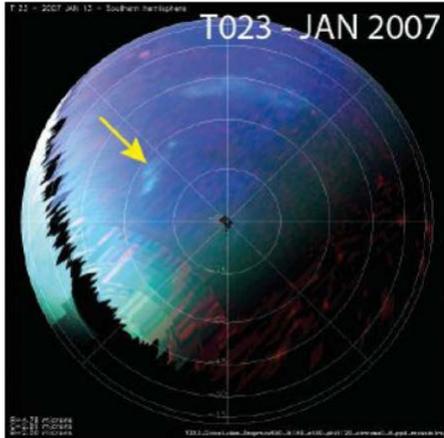
- Nuage de moins en moins visible au fur et à mesure de l'approche de l'équinoxe de printemps.

A la fin de l'hiver nord -> la descente d'air au pôle N est moins vigoureuse => les rapports de mélangent des molécules pouvant condenser ↘ => **disparition du nuage.**

Variations saisonnières au pôle Sud

Nuage au pôle sud : évolution été -> automne

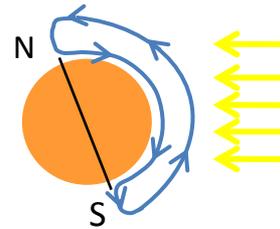
Observations VIMS



Été Sud

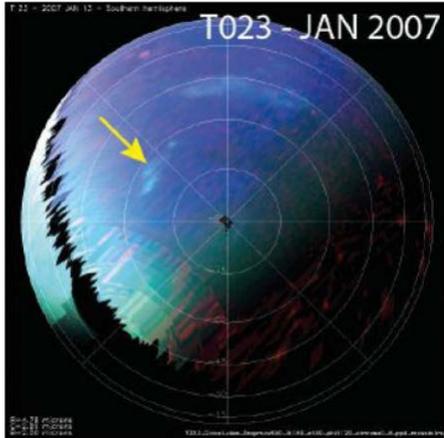
- Montée d'air dans la stratosphère => pas de nuage stratosphérique comme au pôle N.
- Présence de quelques nuages convectifs troposphériques.

Été sud



Nuage au pôle sud : évolution été -> automne

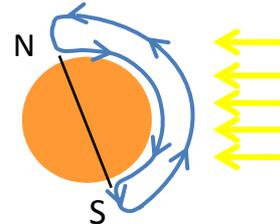
Observations VIMS



Été Sud

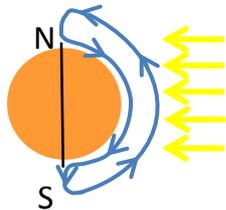
- Montée d'air dans la stratosphère => pas de nuage stratosphérique comme au pôle N.
- Présence de quelques nuages convectifs troposphériques.

Été sud

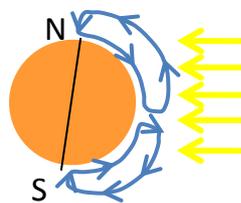


Après l'équinoxe d'automne sud (Août 2009) :

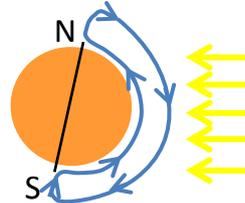
Dec. 2009



Juin 2010



Juin 2011



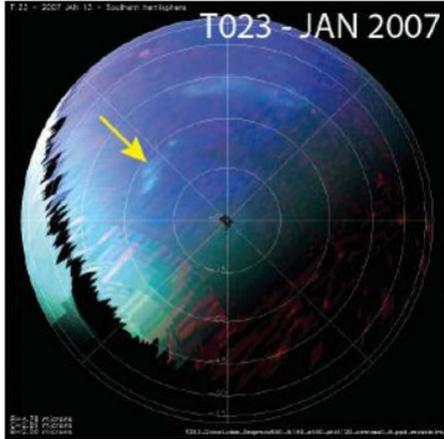
Descente d'air au pôle sud
+
faibles températures (<120 K)
+
fort enrichissement des molécules



**Formation d'un nuage stratosphérique
au pôle S pendant l'automne**

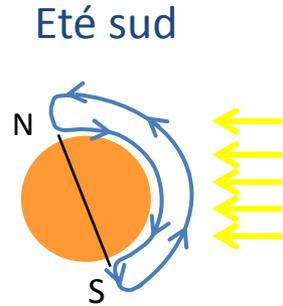
Nuage au pôle sud : évolution été -> automne

Observations VIMS



Été Sud

- Montée d'air dans la stratosphère => pas de nuage stratosphérique comme au pôle N.
- Présence de quelques nuages convectifs troposphériques.

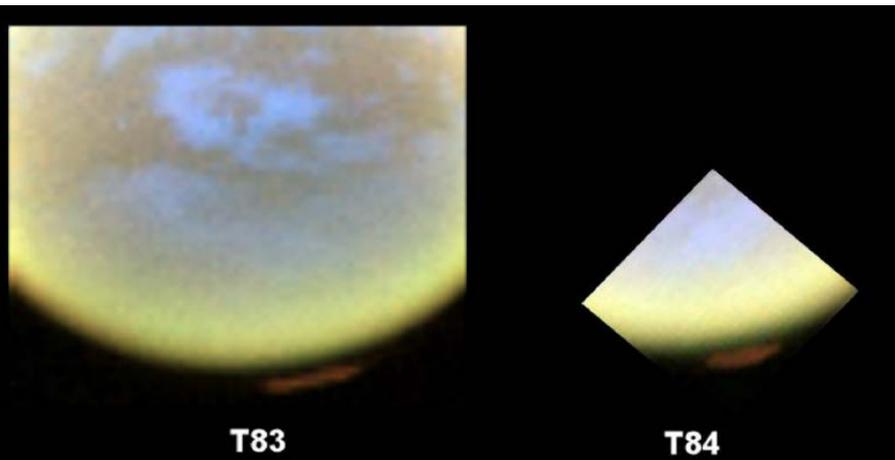


1^{ère} Observation du nuage stratosphérique en Mai 2012 : causé par la descente d'air observée depuis juin 2011.

Mai 2012 (VIMS)

Juin 2012 (VIMS)

Cassini/ISS

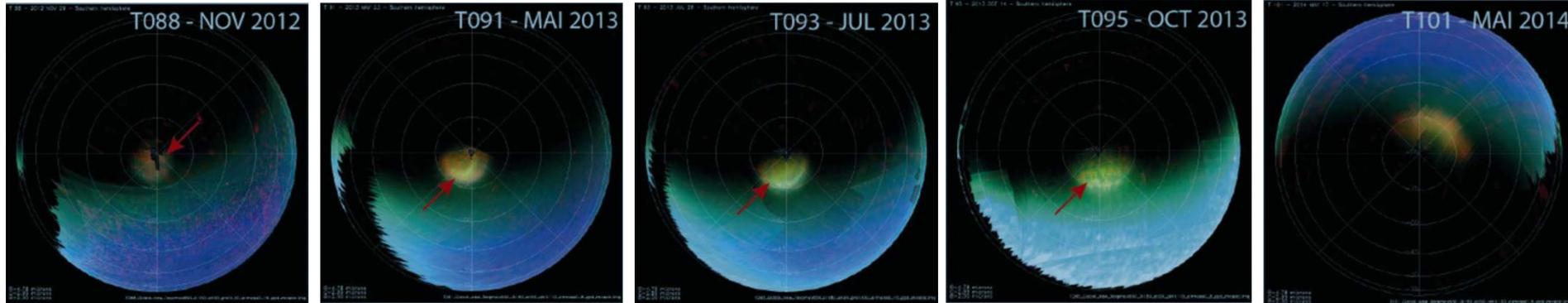


Nuage localisé à 300 km !!!

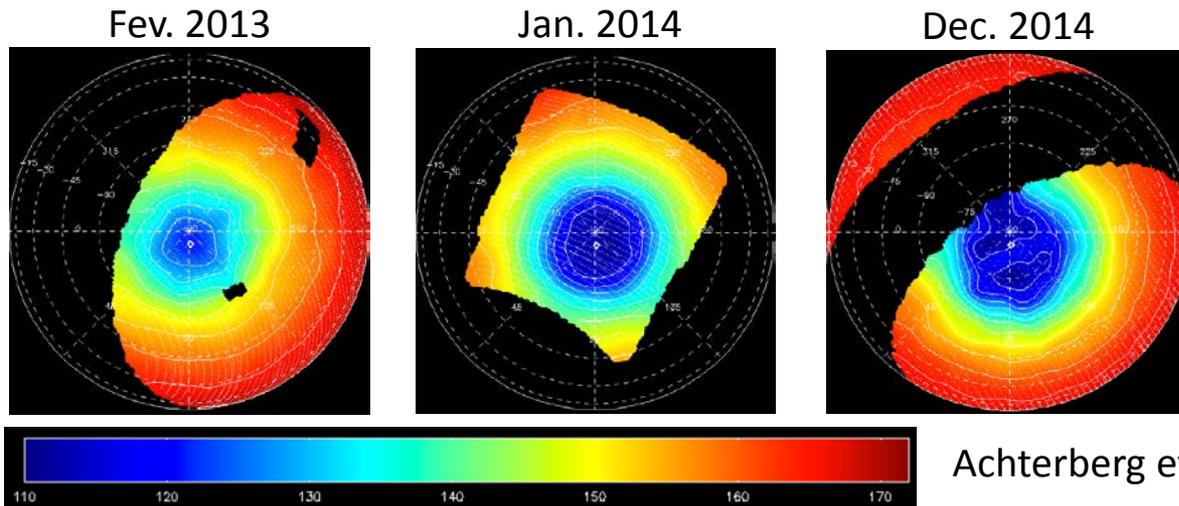
Nuage au pôle sud : évolution été -> automne

Observations Cassini/VIMS

Le Mouelic et al., 2014



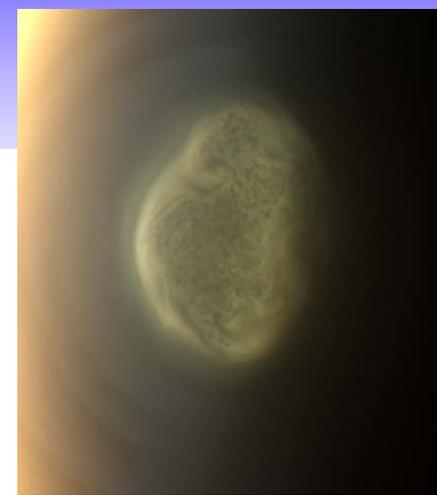
- Nuage au pôle sud détecté par VIMS lors de tous les survols depuis Mai 2012.
- Nuage associé à une forte diminution de température + fort enrichissement venant de la haute atmosphère (observations CIRS).



Achterberg et al., 2015

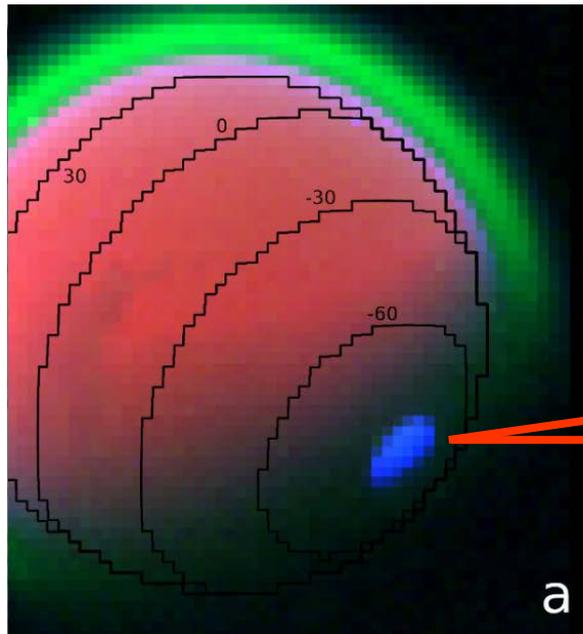
Nuage au pôle sud à haute altitude

- Première contrainte sur la composition du nuage à partir des données de Cassini/VIMS (nov. 2012)
-> **glace de HCN** (de Kok et al., 2014)

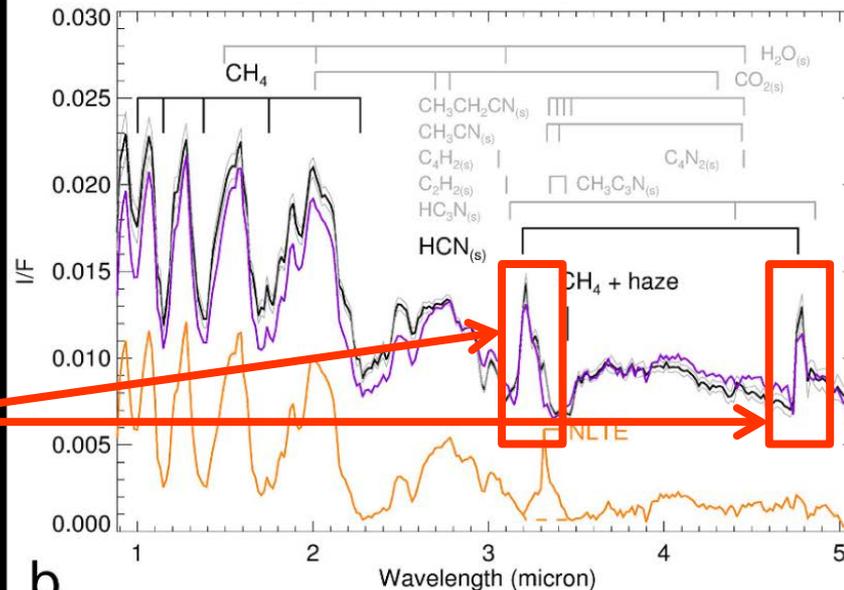


Observation Cassini/ISS
En visible, juin 2012

Novembre 2012



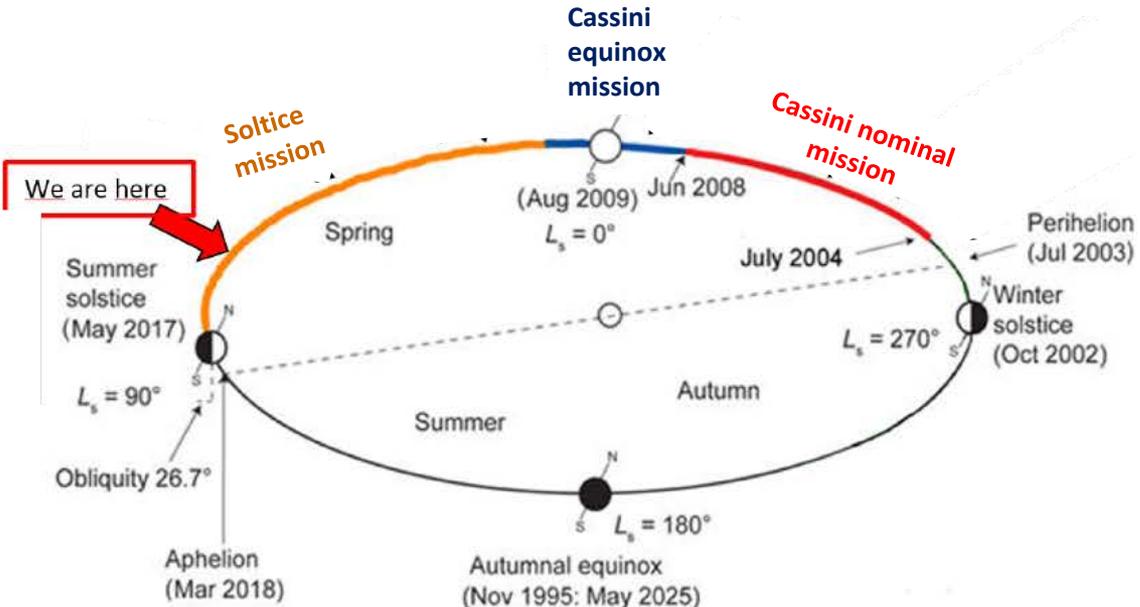
a



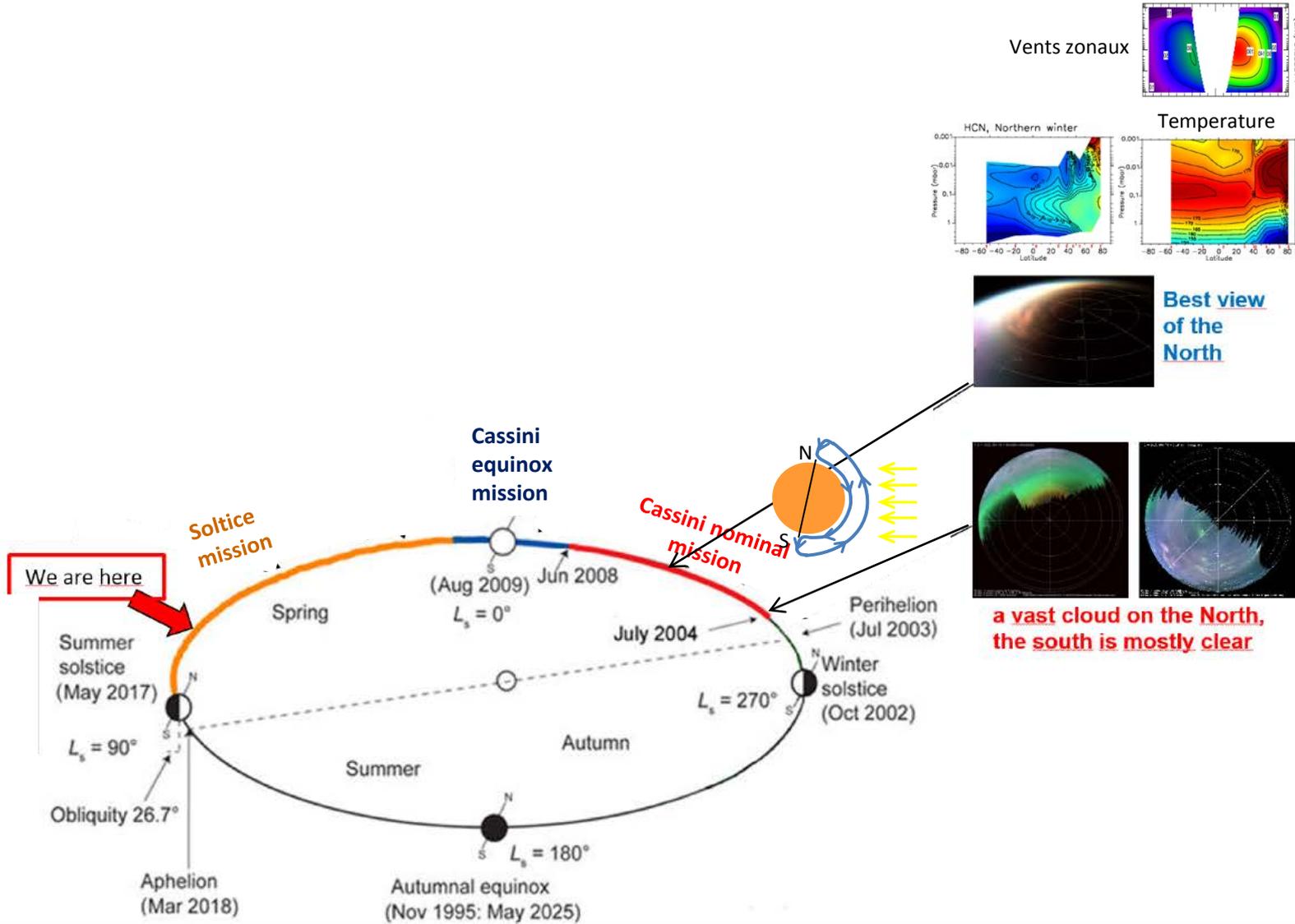
b

- A partir des données CIRS : **condensation de C_6H_6 , HCN et HC_3N dans le nuage entre 250 et 300 km** entre $90^\circ S$ et $80^\circ S$.

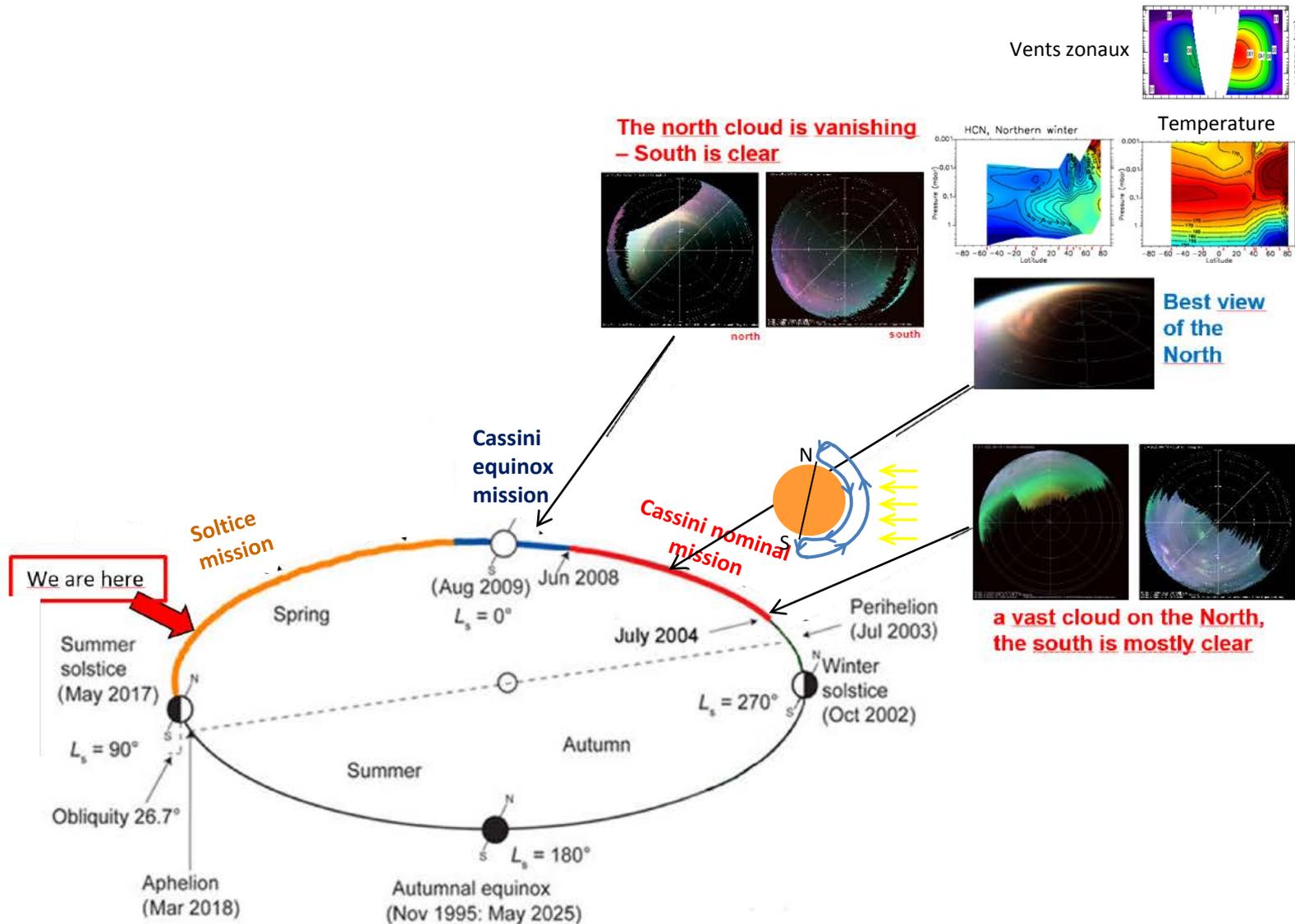
Conclusions



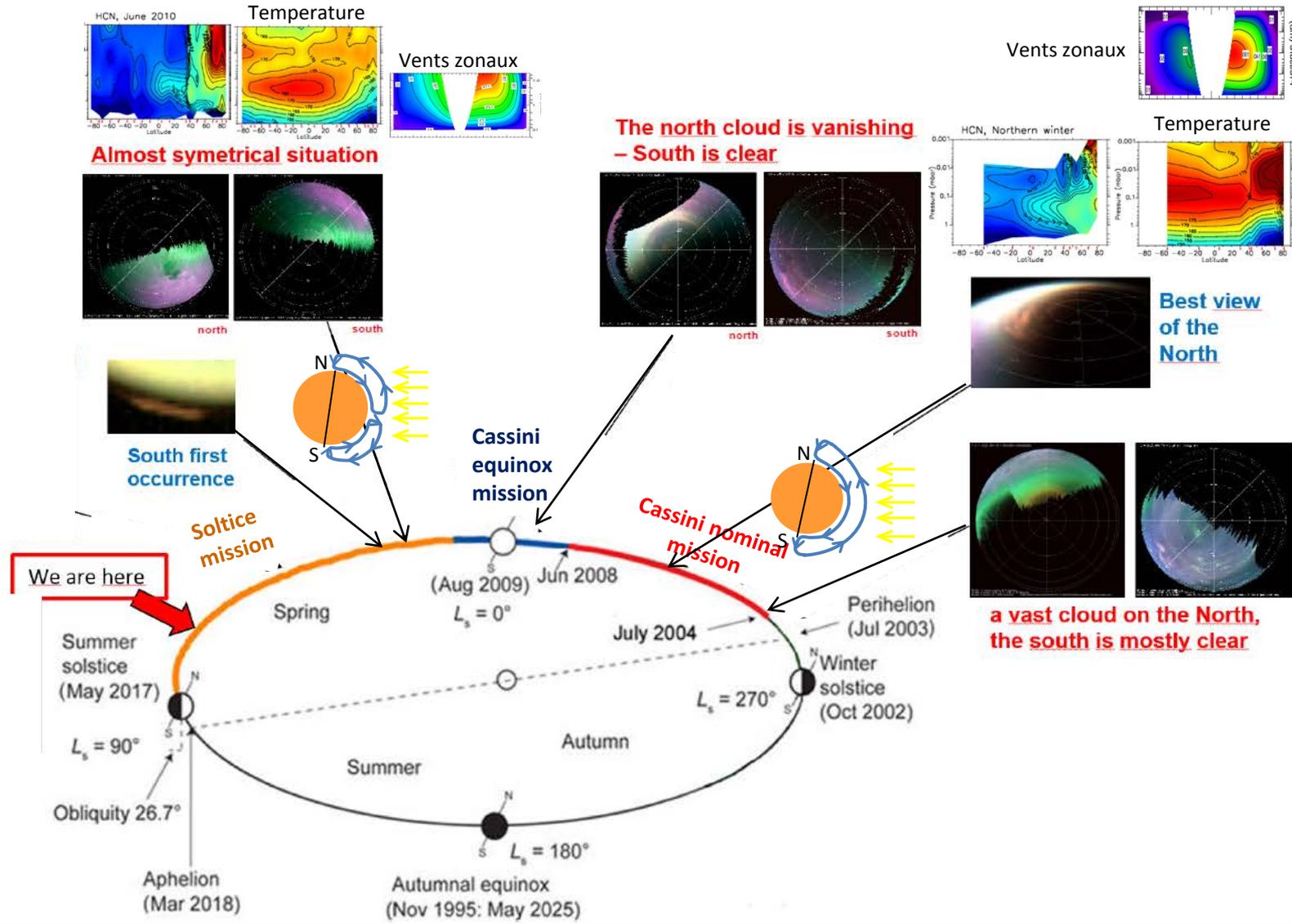
Conclusions



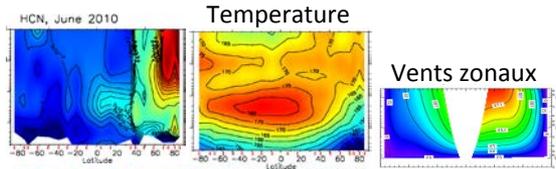
Conclusions



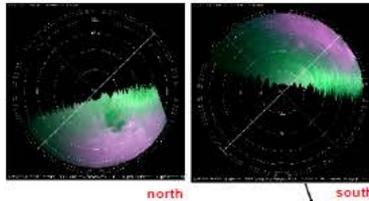
Conclusions



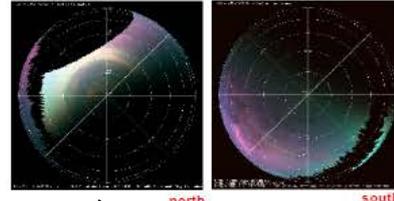
Conclusions



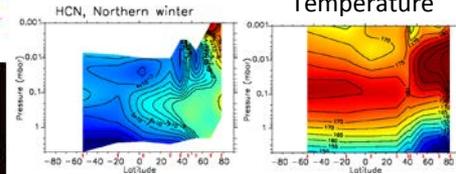
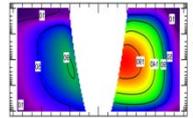
Almost symetrical situation



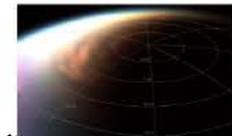
The north cloud is vanishing – South is clear



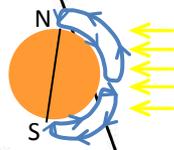
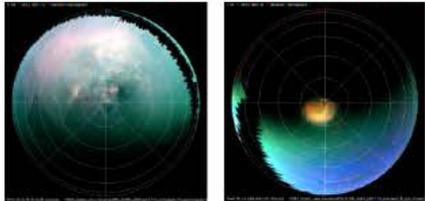
Vents zonaux



Temperature

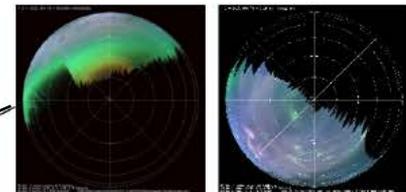
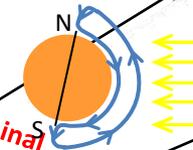


North (clear) South (growing)



Cassini equinox mission

Cassini nominal mission



We are here

Solstice mission

Summer solstice (May 2017)

$L_s = 90^\circ$

(Aug 2009) $L_s = 0^\circ$

Jun 2008

July 2004

Perihelion (Jul 2003)

Winter solstice (Oct 2002)

$L_s = 270^\circ$

Spring

Autumn

Summer

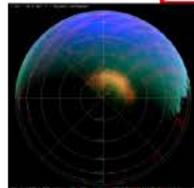
Autumnal equinox (Nov 1995: May 2025)

$L_s = 180^\circ$

Aphelion (Mar 2018)

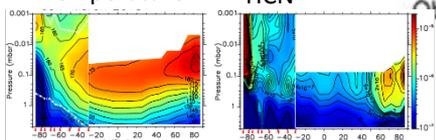
Obliquity 26.7°

Mai 2014, T101 **South**

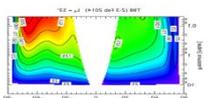


Temperature

HCN



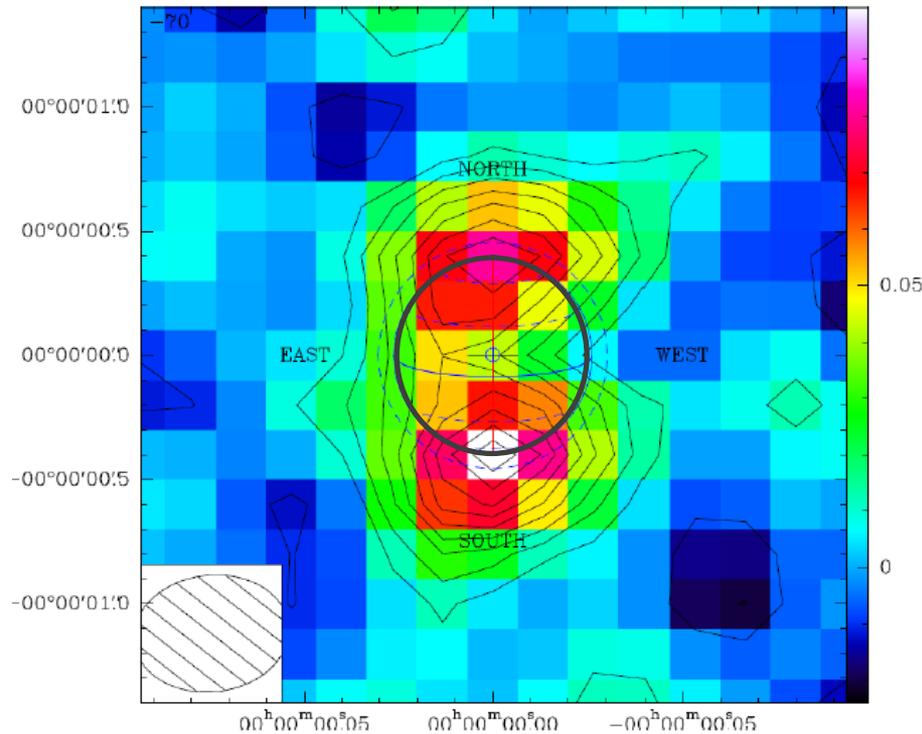
Vents zonaux



Perspectives ...

- Analyse des données Cassini jusque la fin de la mission en 2017.
- Observations depuis le sol avec l'interféromètre ALMA en juin 2012 (16 antennes) :
1^{ère} détection de C₂H₅CN

C₂H₅CN à 349.5 GHz en juin 2012



Egalement cartographie de :
HCN, HC₃N, CH₃CN, HNC, DCN,
et 1^{ère} détection de CH₃¹³CN et
HC₃¹⁵N ...
(Moreno et al., 2014)