

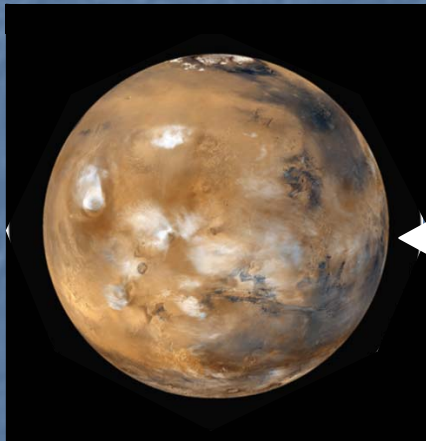
Aspects microphysiques de l'atmosphère martienne : de la poussière aux nuages de glace d'eau

Thèse de doctorat de l'Université Paris 6
présentée par
Franck Montmessin
Service d'Aéronomie (IPSL)

Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux
Perspectives

1. Brumes martiennes : exemples...

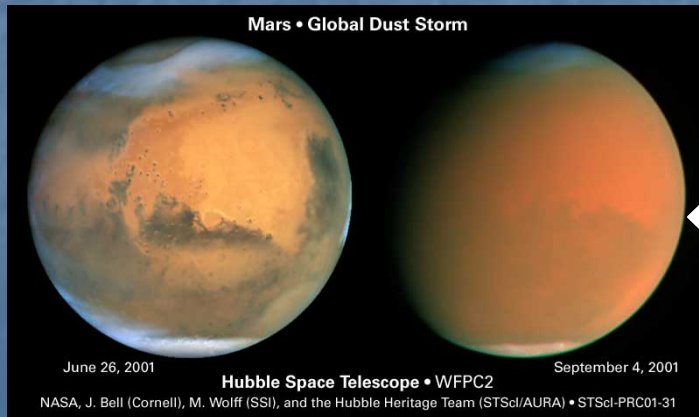


Nuages sur les reliefs

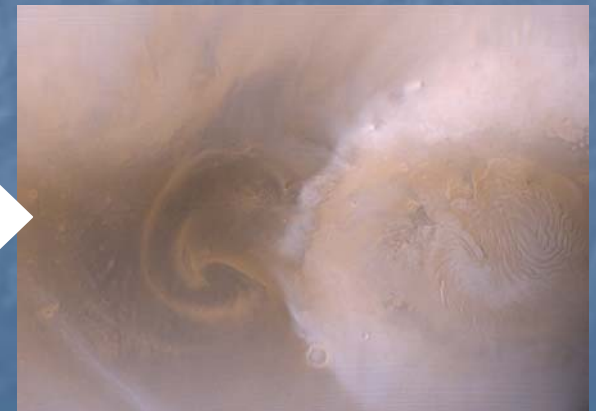
Brumes de condensation



Cyclogénèse en arctique



Brumes « sèches »



Tempête de poussière (région polaire)

Tempête de poussière globale (juin 2001)

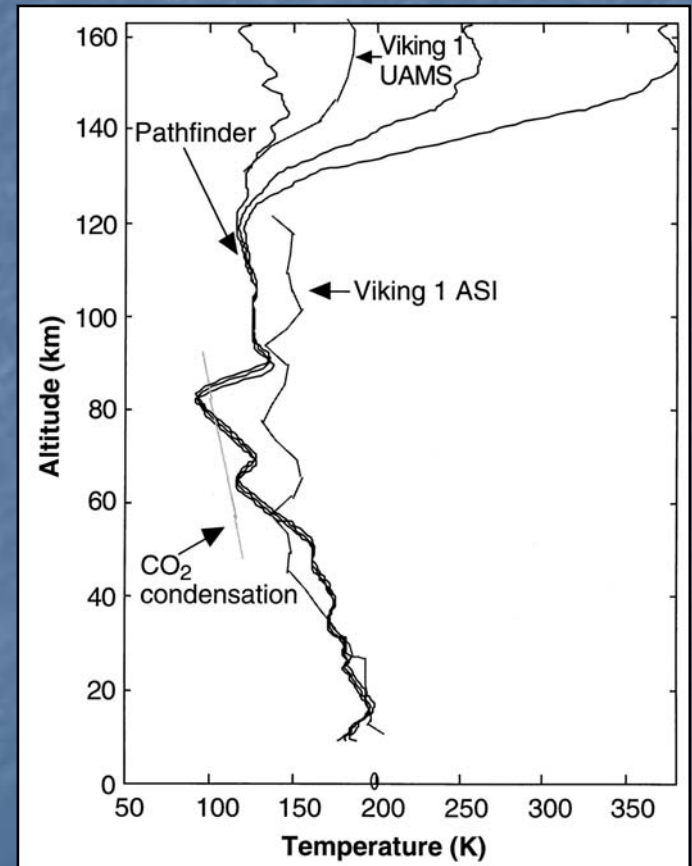
1. Brumes martiennes : environnement climatique

➤ Atmosphère :

- 6 mbar
- CO₂ majoritaire
- T~200 K
- H₂O : 10 µm pr.
- Poussières (noyaux) et cristaux

➤ Cycles :

- Diurne : $\Delta T > 50$ K
- Saisonnier : Pression ± 30 %



Profil de descente « Pathfinder »

(Schofield 1997)

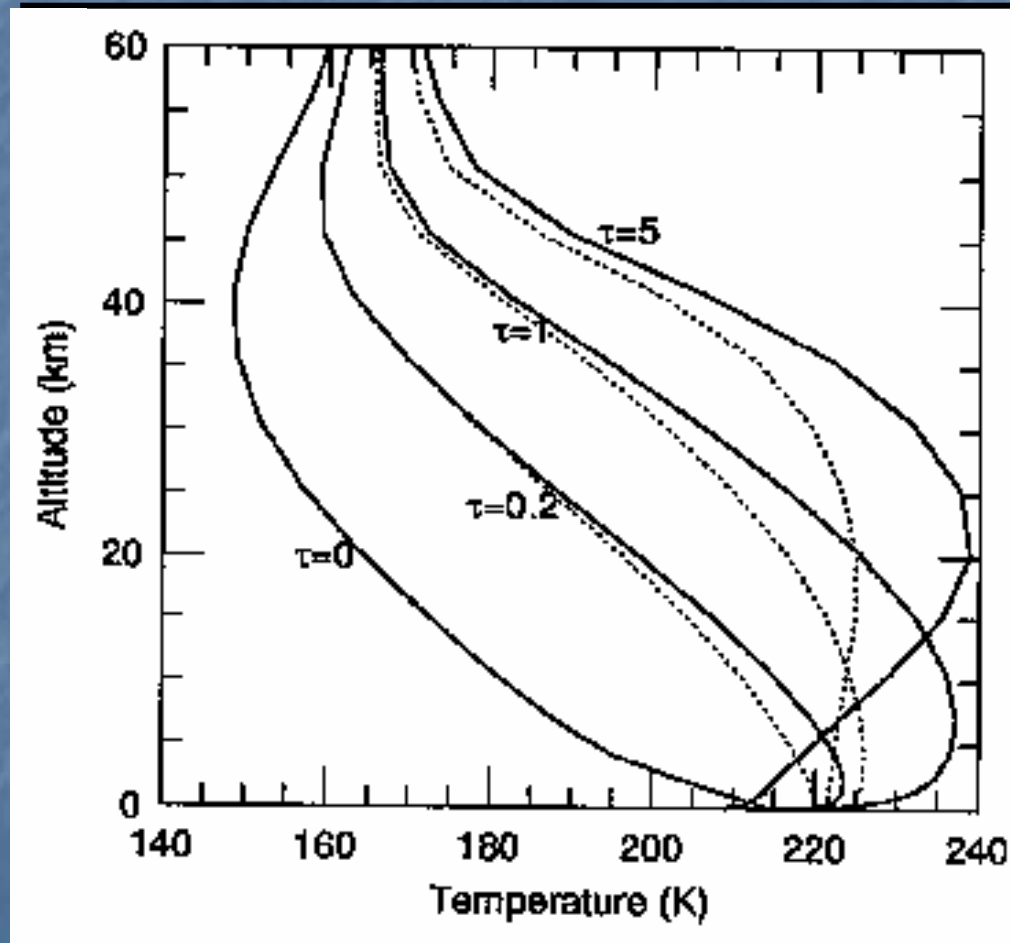
1. Brumes martiennes : nature et propriétés

	<i>Poussière en suspension</i>	<i>Nuages de H₂O glace</i>
<i>Origine</i>	Soulèvement éolien	Forçage radiatif et ondulatoire
<i>Couverture spatiale et temporelle</i>	Globale et permanente	Locale et saisonnière
<i>Structure verticale</i>	Distribution uniforme	Fort confinement
<i>Épaisseur optique</i>	0.1 à 5+ « fond » → tempêtes	0.01 à 1 diffuse → reliefs
<i>Rayon des particules</i>	~1 μm	~2 μm

1. Brumes martiennes : intérêts scientifiques

Poussière

- *Acteur climatique global*
- *Propriétés optiques ?*



1. Brumes martiennes : intérêts scientifiques

Nuages de glace d'eau

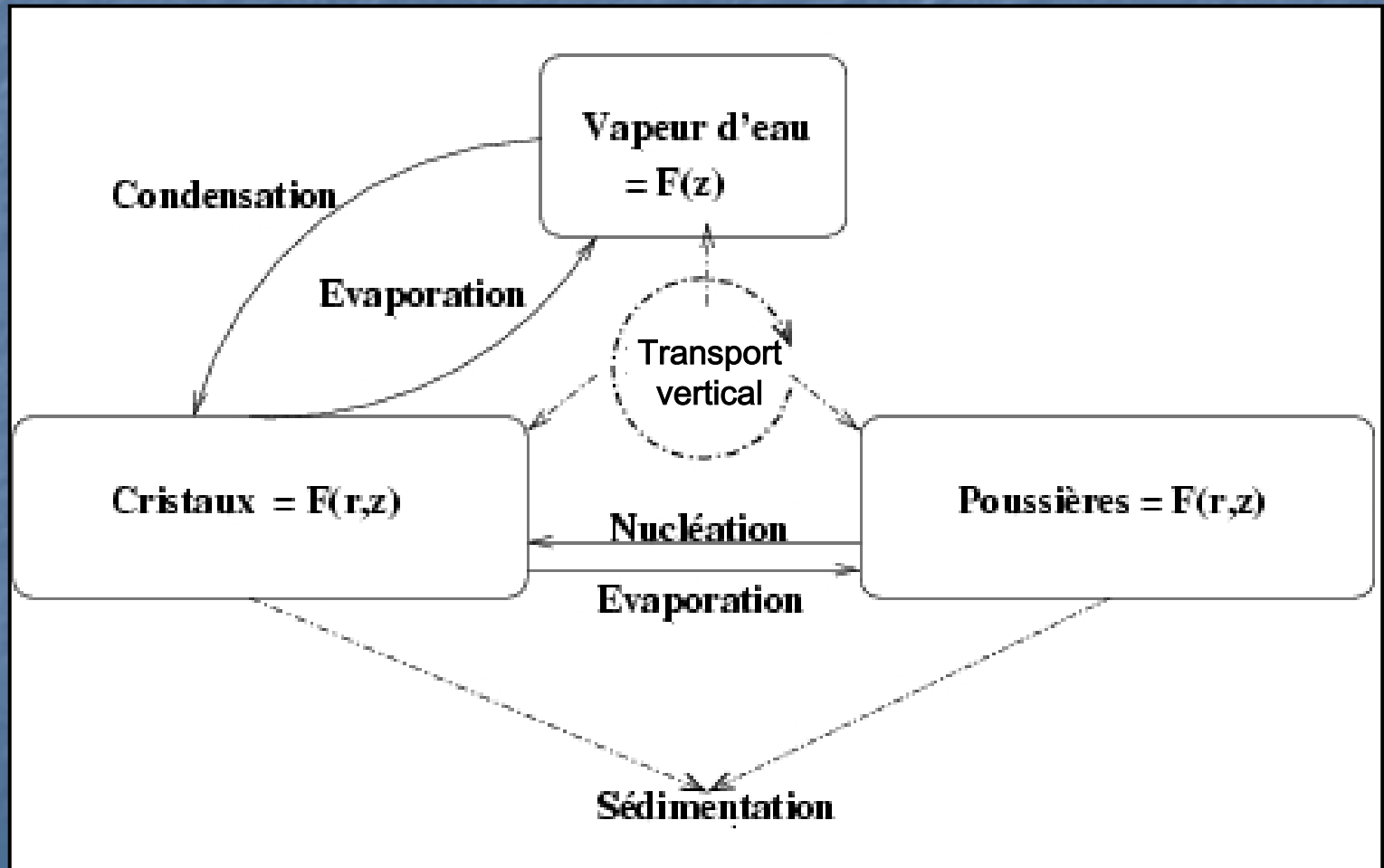
- *Indicateurs météorologiques*
- *Impact climatique*
- *Cycle hydrologique*
- *Cycle du deutérium*

Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux

Perspectives

Evolution des populations de particules de rayon r à une altitude z :



2. Processus microphysiques : efficacités relatives

Processus	Temps caractéristique
Nucléation	<i>Seconde</i>
Condensation	<i>Minute</i>
Sédimentation	<i>1-10 jours</i>
Transport vertical (Diffusion)	<i>1-10 jours</i>

■ *Condensation et Sublimation rapides :*

- Profil H₂O à saturation
- Pas de précipitation en surface

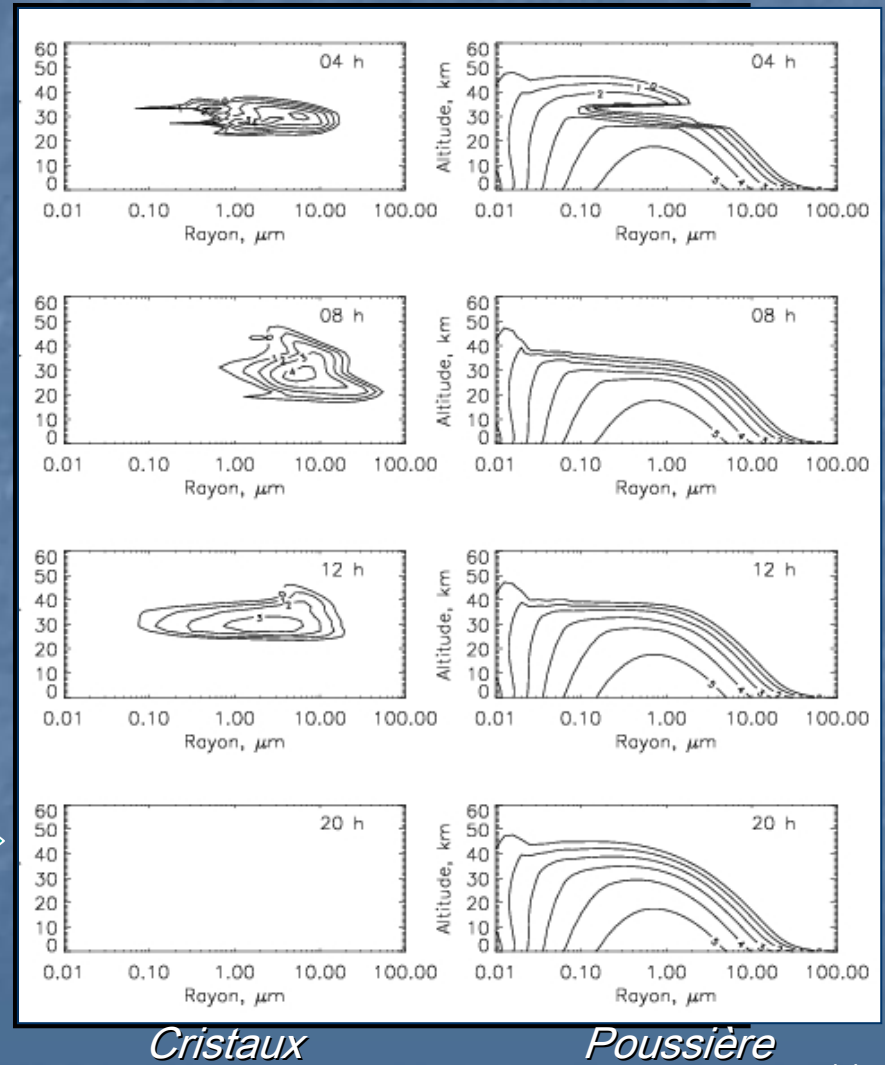
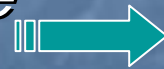
■ *Concentration de noyaux :*

- Propriétés microphysiques des cristaux

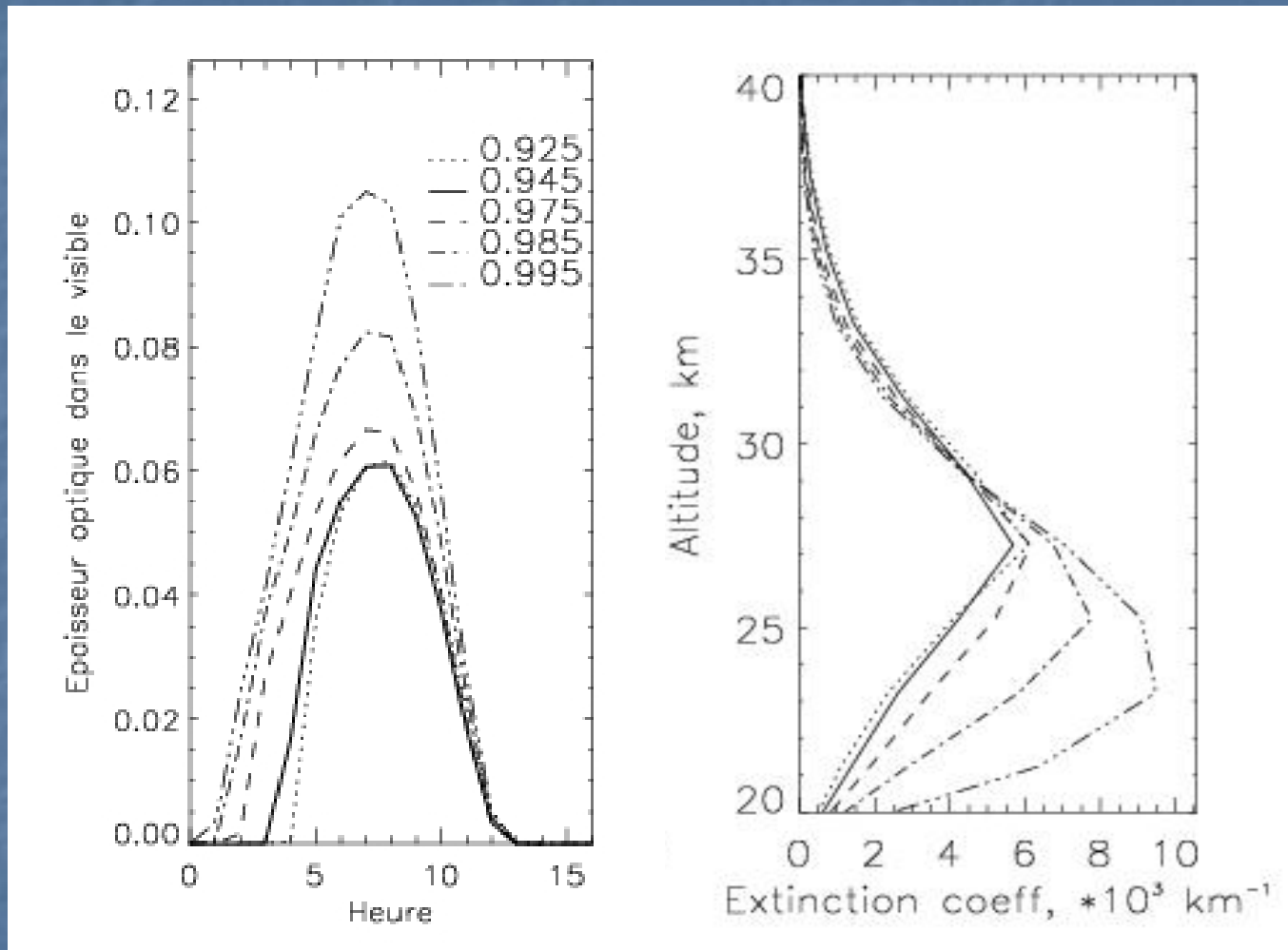
2. Simulation nuages-1D

Modèle microphysique 1D

- *Atmosphère :*
 - 30 couches de 2 km
- *Particules :*
 - Poussières & Cristaux
 - 50 rayons
- *Pas de rétroaction radiative*
- *Variations diurnes de $T(z)$*

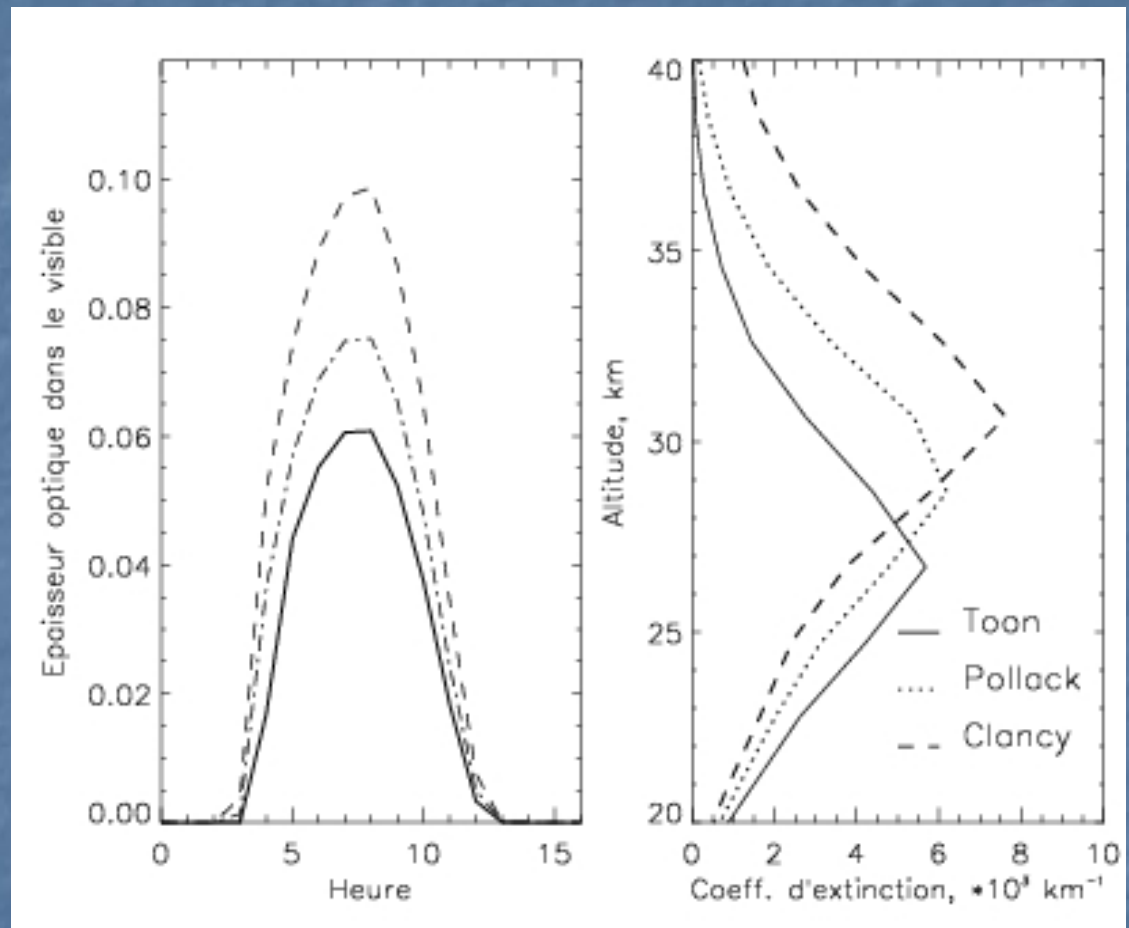
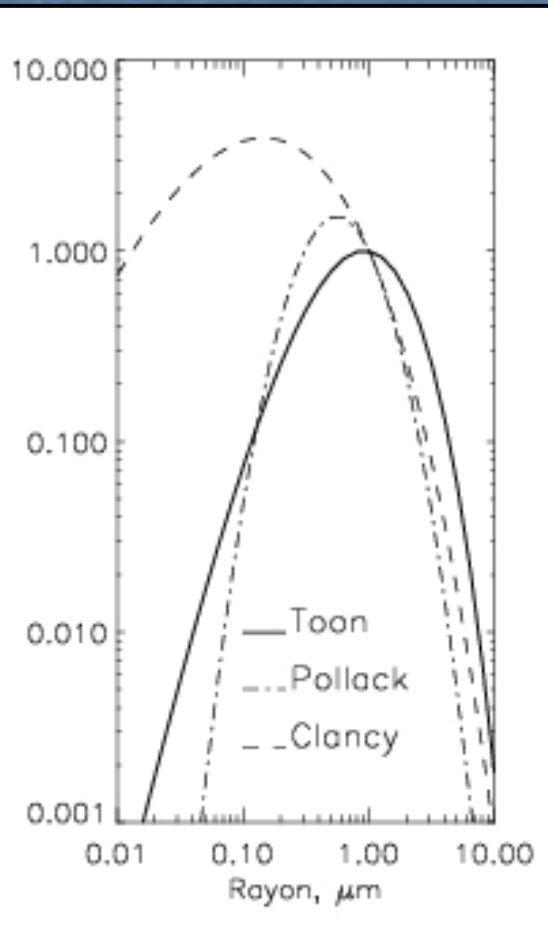


2. Sources d'incertitudes : nucléation



- « Mouillabilité » des poussières = $m \sim 0.95$

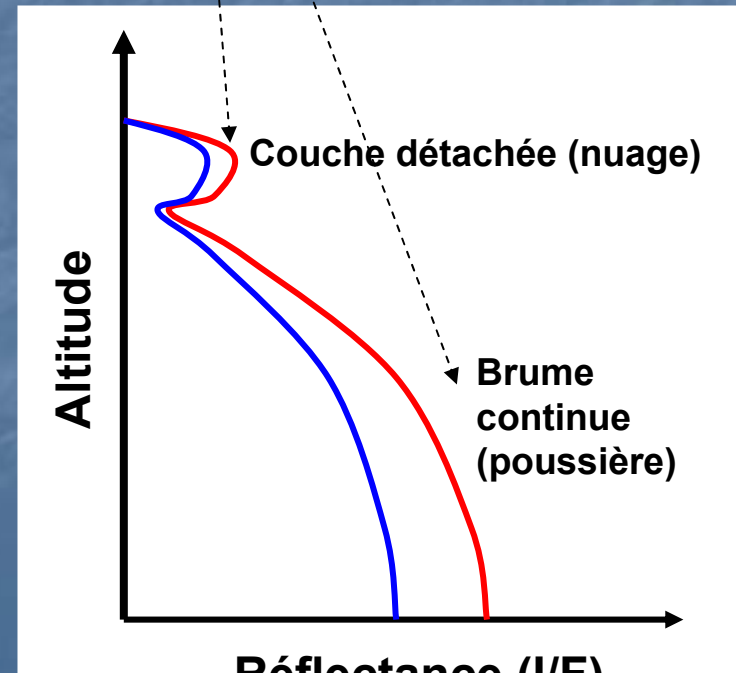
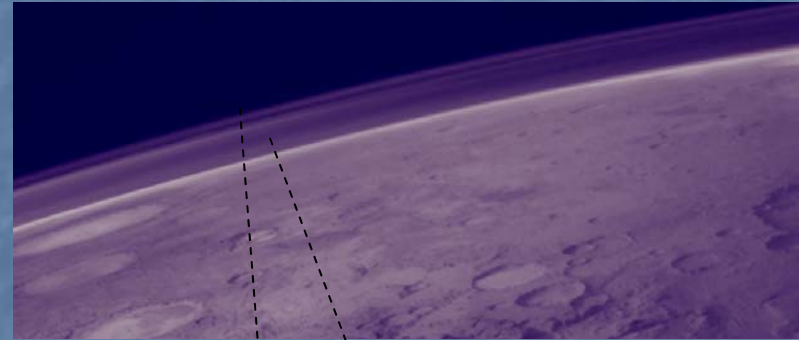
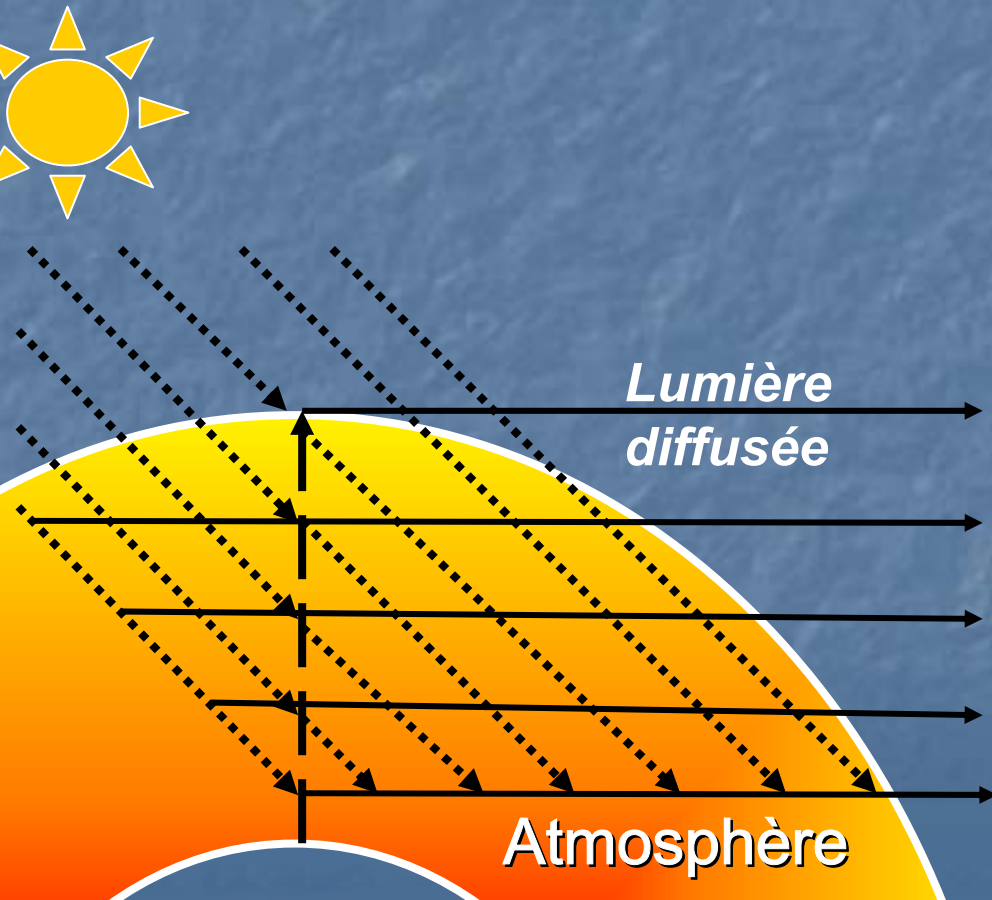
2. Sources d'incertitude : granulométrie des poussières



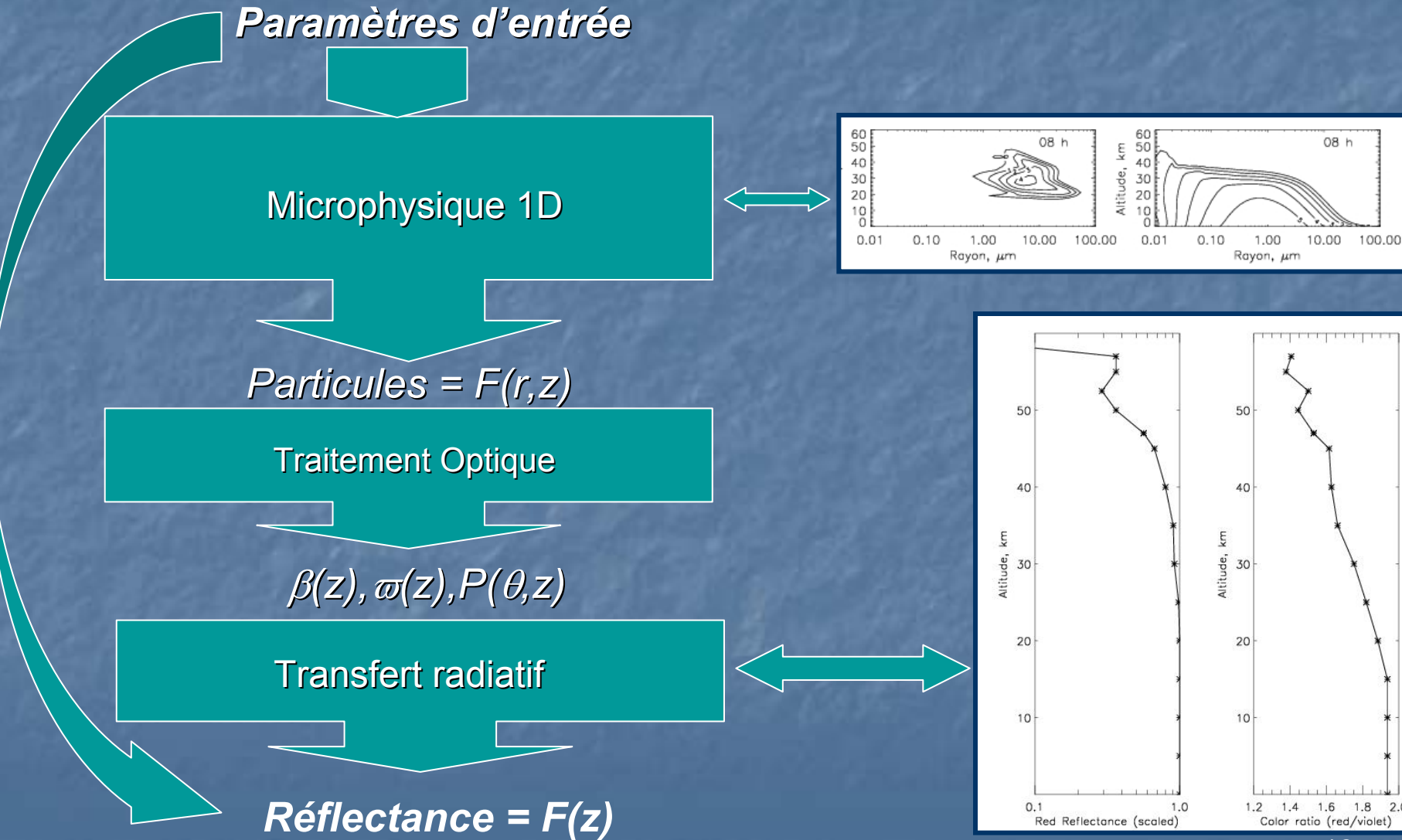
Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux
Perspectives

3. Diffusion de la lumière par les particules : visée aux limbes

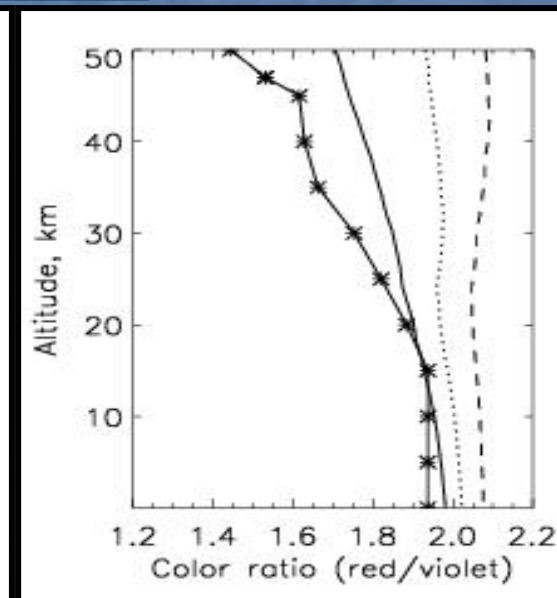
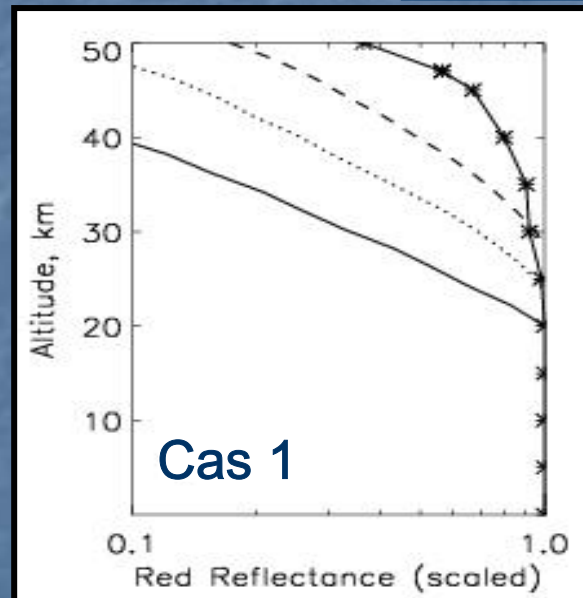
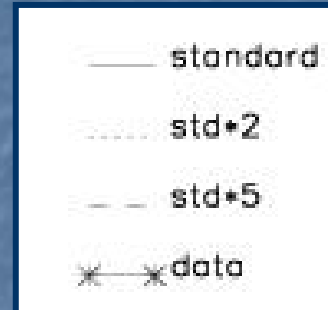


3. Méthode directe : description



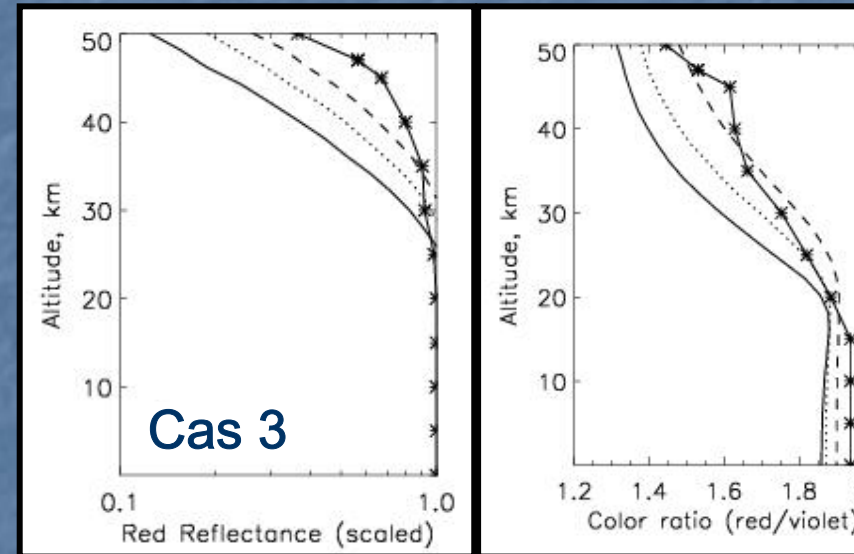
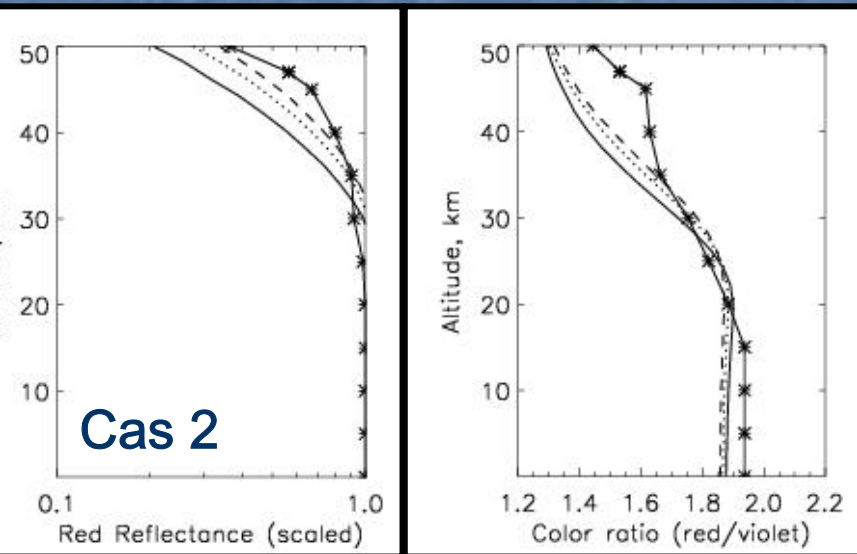
3. Recherche d'un modèle de poussière

- *Portion continue du profil*
 - *Poussière*
- *Paramètres ajustés :*
 - $R_{\text{eff}}, \nu_{\text{eff}}$ moyens
 - Mélange vertical (3 scénarios)



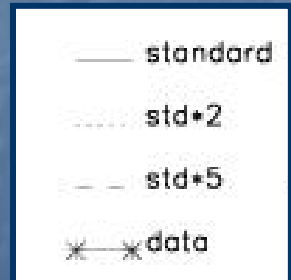
Modèle classique
 $R_{\text{eff}}=1.8 \mu\text{m} - \nu_{\text{eff}}=0.5$

3. Recherche d'un modèle de poussière



Poussières fines

$$R_{\text{eff}}=0.2 \mu\text{m} - \nu_{\text{eff}}=0.03$$



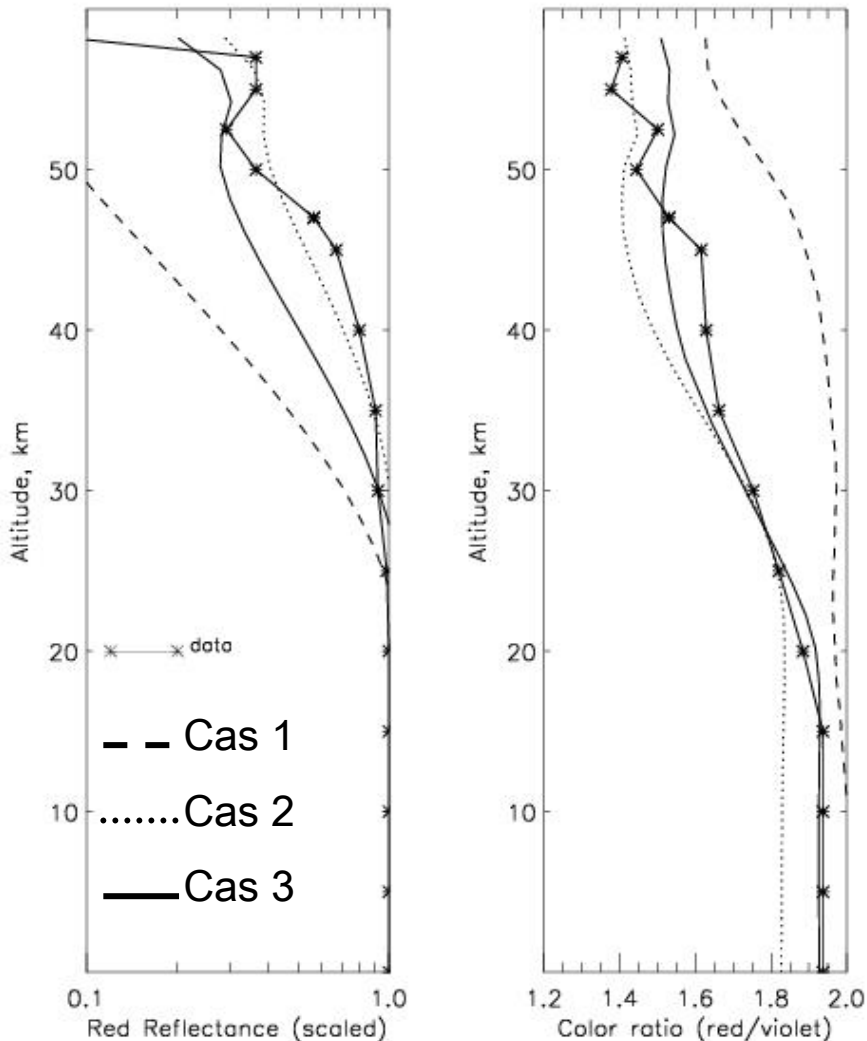
Distribution bimodale

$$R_{\text{eff}}=1.6 \mu\text{m} - \nu_{\text{eff}}=0.2$$

+

$$R_{\text{eff}}=0.2 \mu\text{m} - \nu_{\text{eff}}=0.03$$

3. Analyse de la couche détachée



Distribution bimodale :

- *Hypothèse proposée par le passé*
- *Poussière martienne vs. saharienne :*
 - granulométrie similaire
 - similarités de composition
 - même processus d'injection

3. Limitations de l'étude

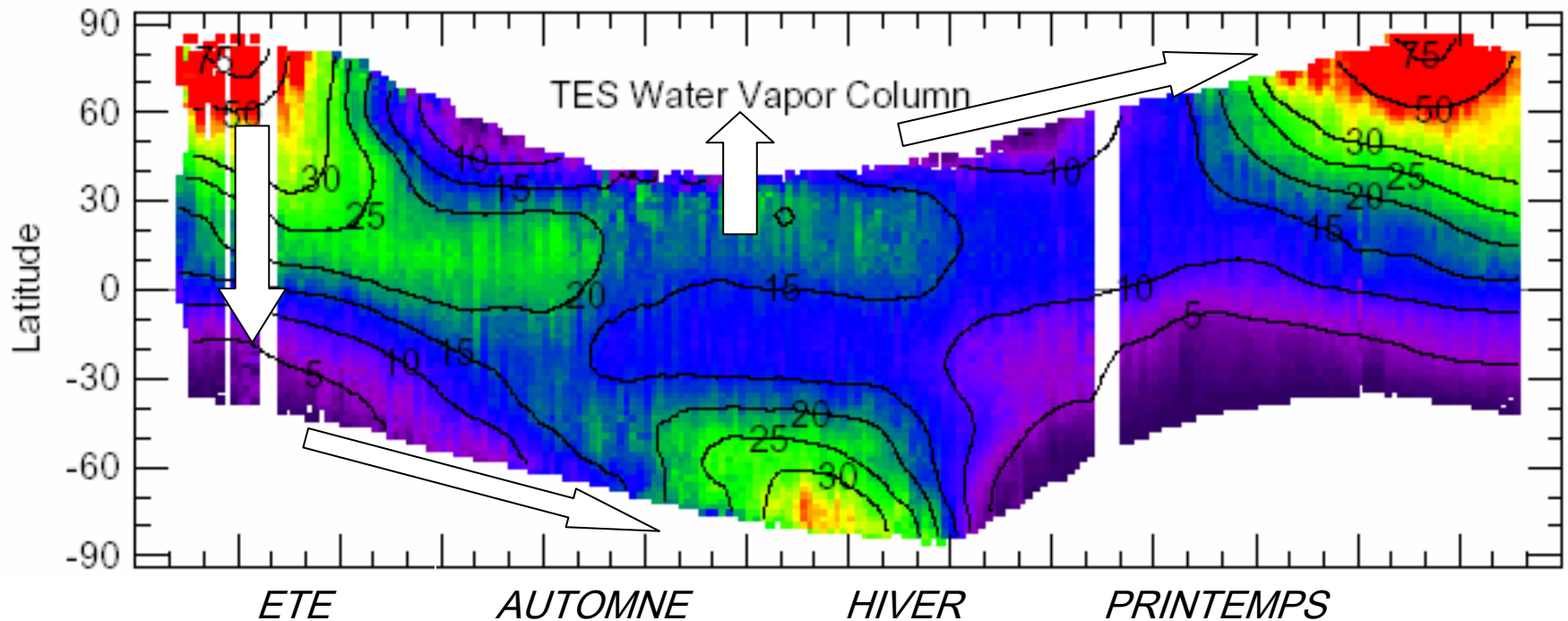
- *Un seul profil à couleurs multiples*
- *Influence de la dynamique*
- *Aucun test de sensibilité sur l'indice imaginaire de la poussière*
- *Forme réelle des poussières inconnue*

Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux

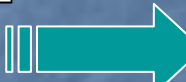
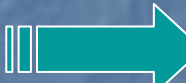
Perspectives

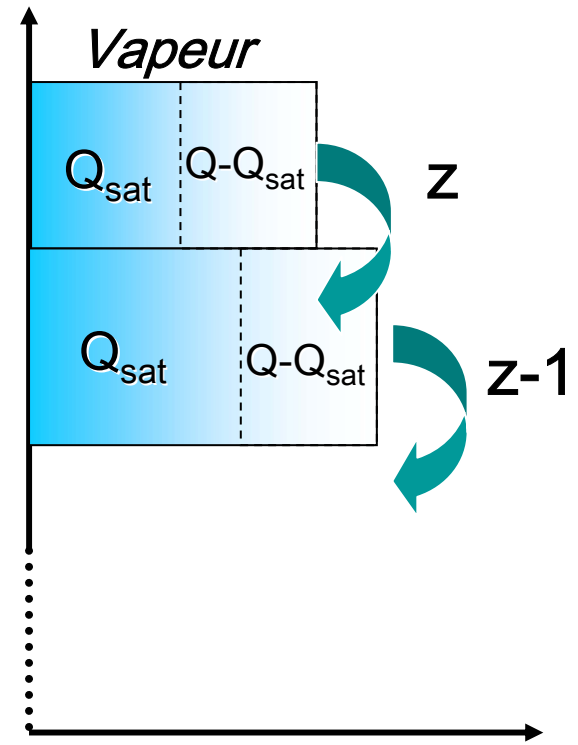
4. *Le cycle hydrologique martien*



Distribution géographique et saisonnière de la vapeur d'eau (en $\mu\text{m pr.}$)
(Smith, 2002)

4. Nuages de glace d'eau : étude théorique 3D

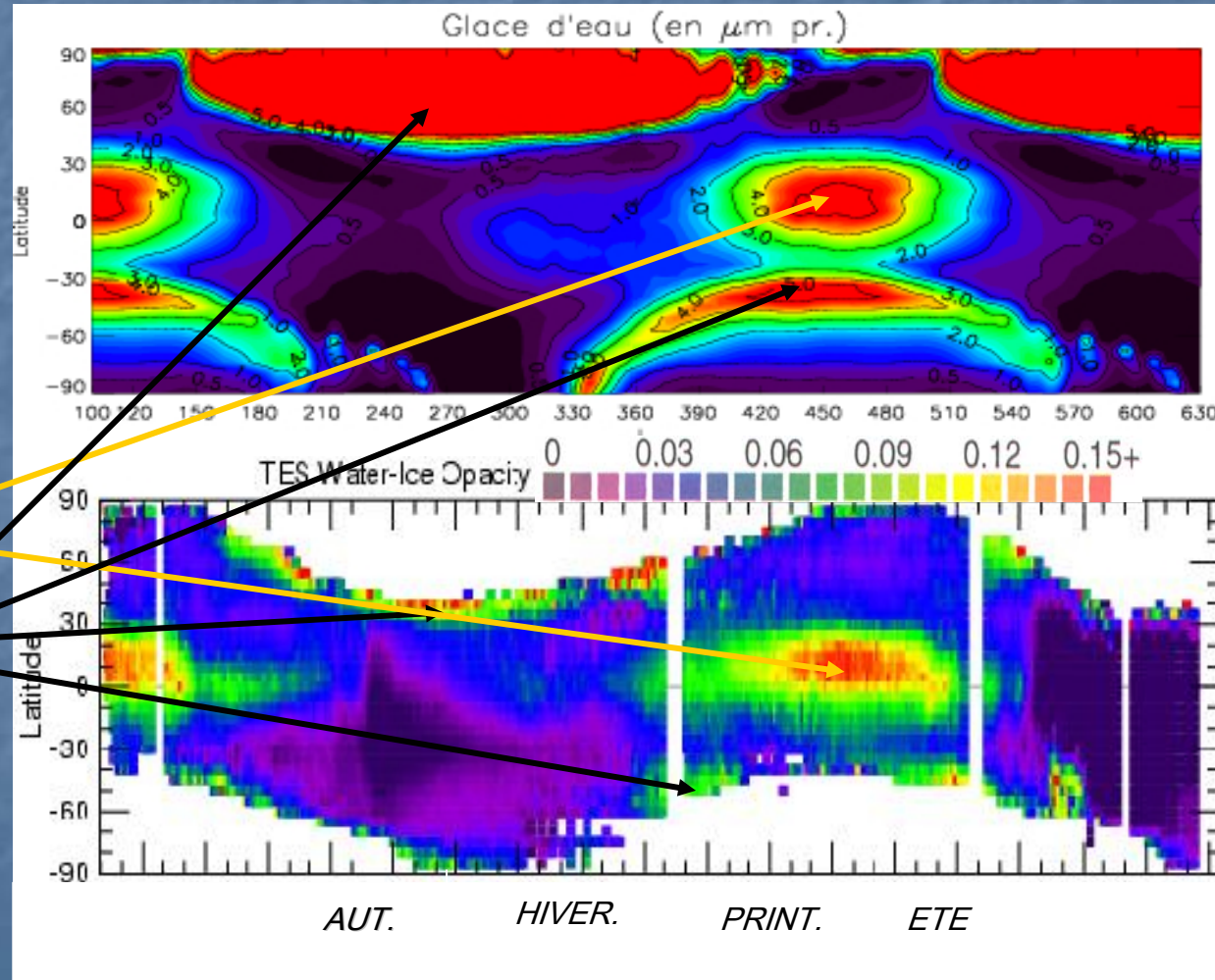
- MCG Mars du LMD
 - Comparaison entre deux versions de modèle
 1. Version initiale –
Sans nuage 
 2. Version avec schéma
de nuages
Nuages transportés
(microphysique simplifiée) 
- ⇒ **Effet « brut » des nuages
sur le cycle de l'eau martien**



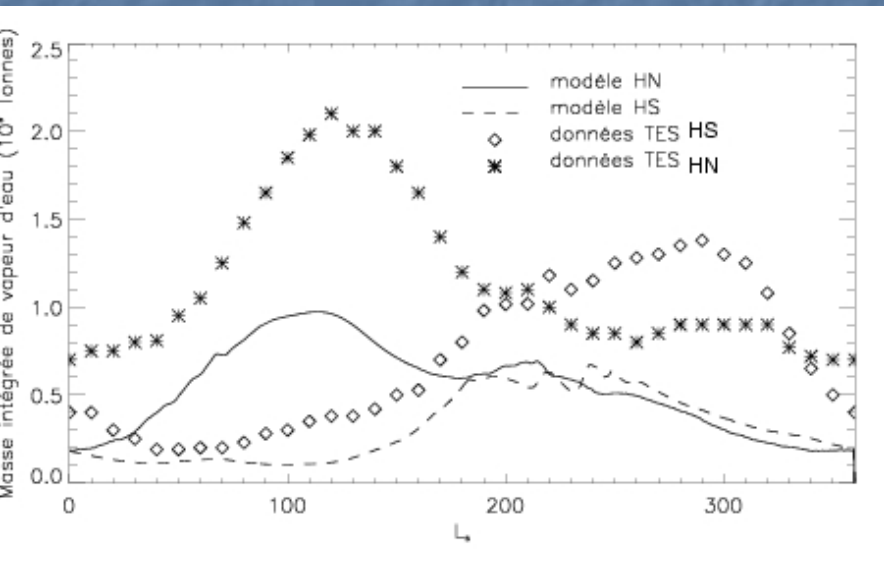
4. Nuages : comparaison prédictions/mesures

■ Formations majeures :

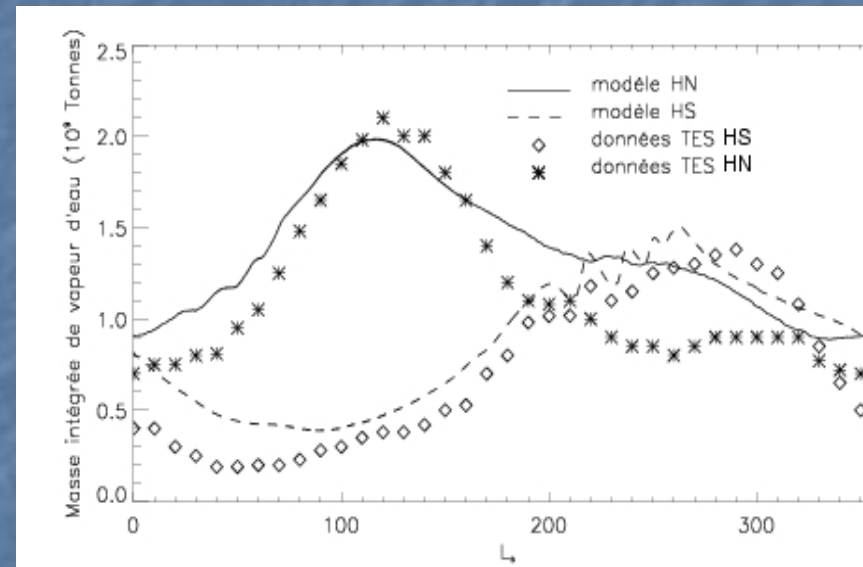
- Ceinture équatoriale
- Capuches polaires



Sans nuage

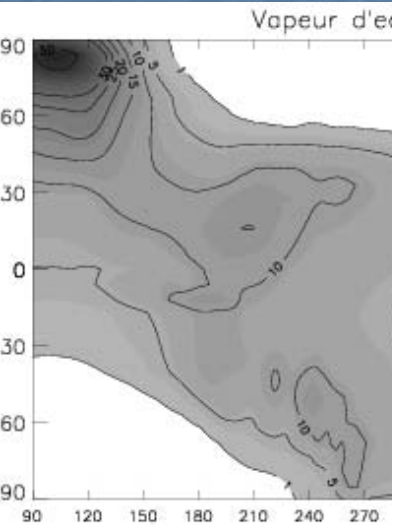


Avec nuages

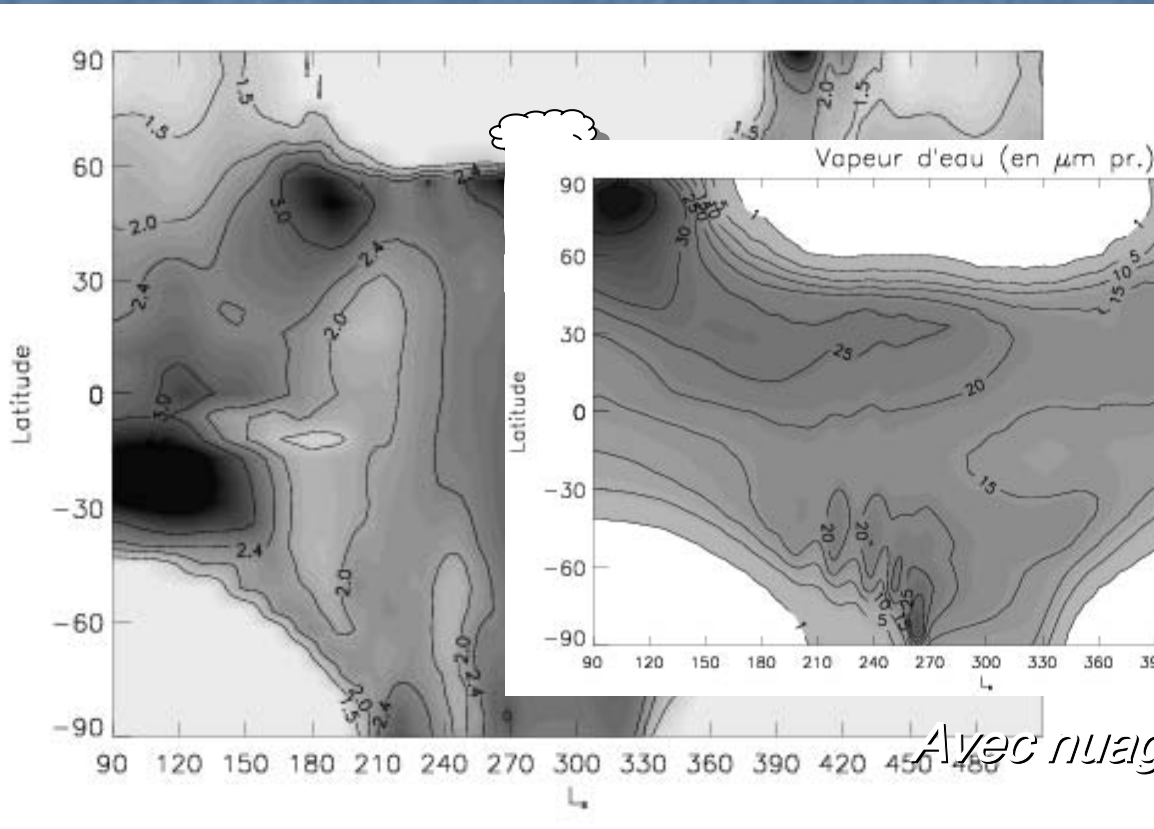


Transport de la glace d'eau = Humidité globale x 2

4. Répartition géographique de l'eau : rôle des nuages



Sans nuage



Avec nuages

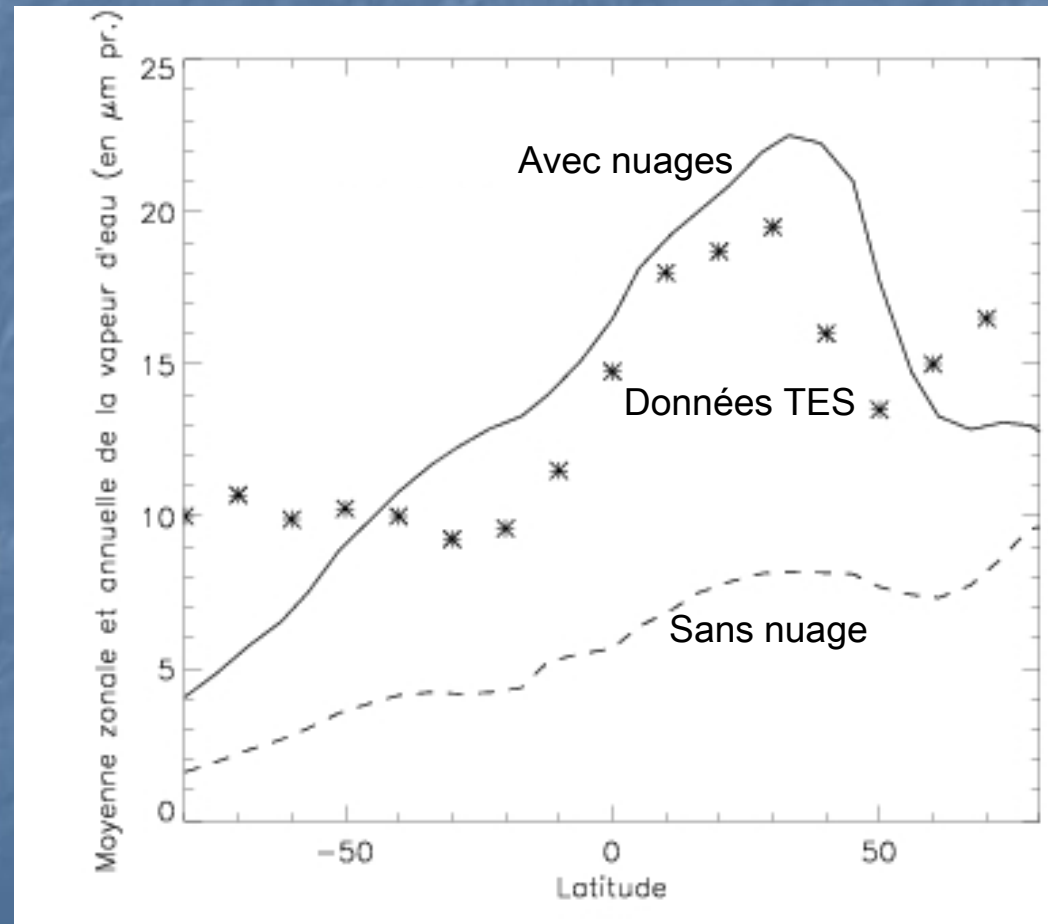
Rapport des abondances de vapeur d'eau :

Avec nuages / Sans nuage

4. Répartition géographique de l'eau : rôle des nuages

Rééquilibrage vers les tropiques

- *Echange humide entre capuches polaires et moyennes latitudes*



Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux

Perspectives

5. Mars : une atmosphère « enrichie » en deutérium...

$$(\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})_{\text{Mars}} = 1.7 \cdot 10^{-3} = 6 \times (\text{HDO}/\text{H}_2\text{O})_{\text{Terre}}$$

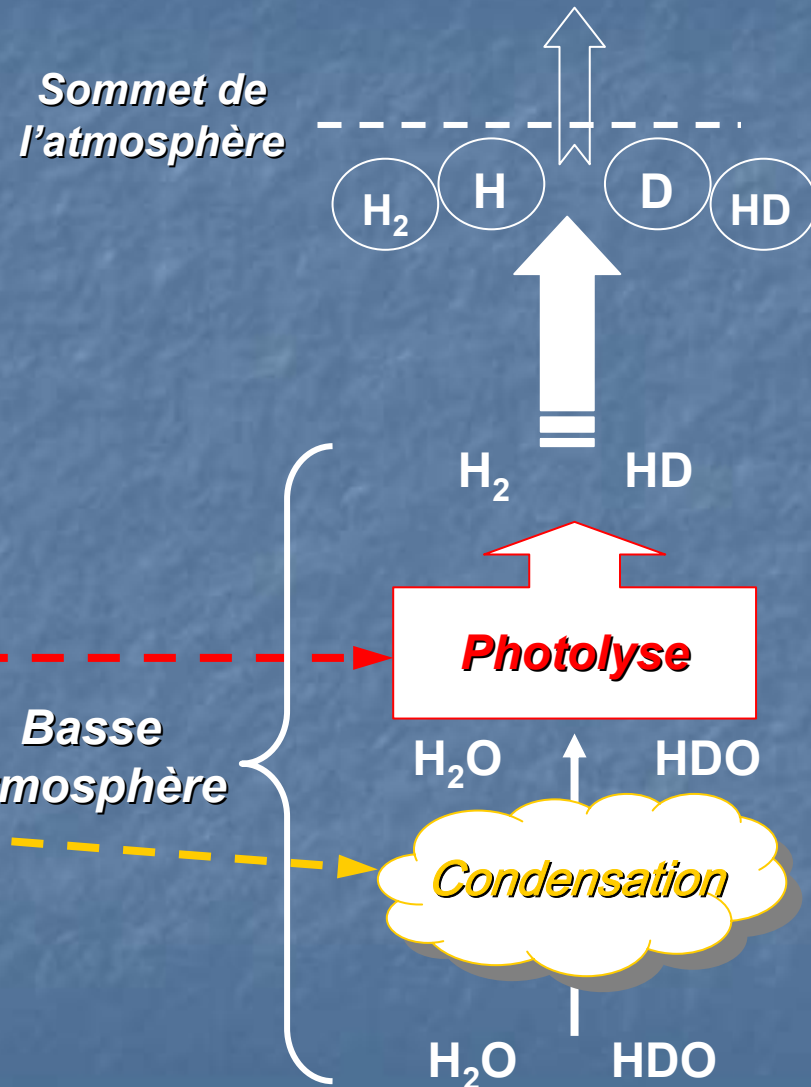
- Echappements D et H vers l'espace
 - Fonction des abondances de D et H à haute altitude

R ⇌ Variation verticale de (D/H)

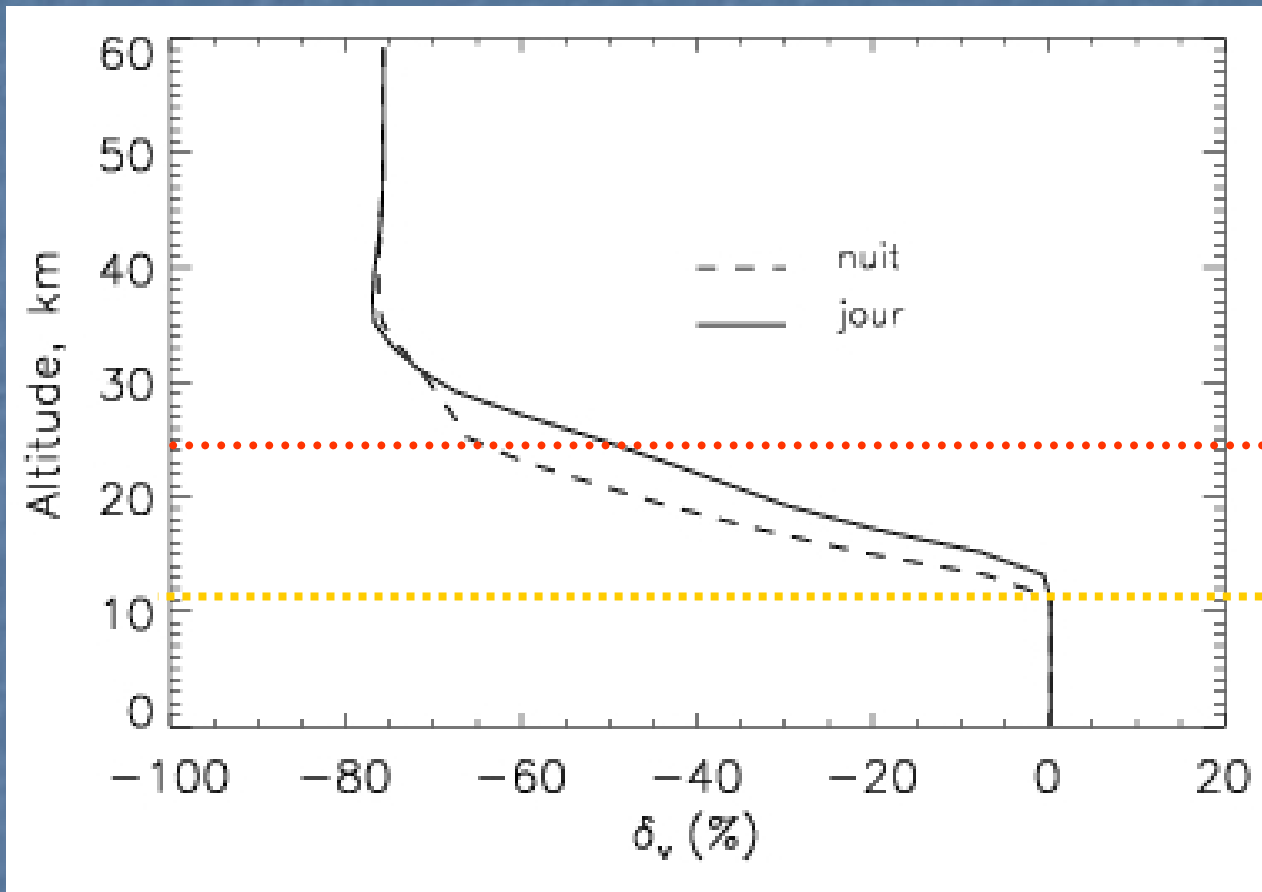
- Mesures Hubble (Krasnopolsky et al., 1998)
 - R = 0.09
- ≠ Modèle photochimique (Yung et al., 1988)
 - R = 1.6

5. Cycle du deutérium et fractionnements

- 2 effets à prendre en compte :
 - *Fractionnement HDO à la photolyse (Cheng et al., 1999)*
 - *Fractionnement HDO à la condensation (CEFE) (Fouchet & Lellouch, 2000)*



5. CEFÉ à l'aphélie (équateur)



Hygropause ☞ Deutéropause

$$\Rightarrow R \sim 0.18 \quad (R_{\text{obs}} = 0.09)$$

5. Le CEFE, un effet systématique ?

- CEFE viable si $z_{\text{cond}} < z_{\text{photolyse}}$
- Conditions à l'aphélie (trop) favorables
- Données SPICAM Light

Plan de la présentation

1. Généralités sur les brumes de Mars
2. Microphysique : Théorie & Modèle
3. Modélisation photométrique :
Interprétation de données Viking
4. Etude 3D : Nuages de glace d'eau dans
un Modèle de Circulation Générale
5. Nuages et fractionnement isotopique
6. Bilan des travaux
Perspectives

Bilan des travaux

■ *Nuages :*

- D {
 - Modèle microphysique : nature des interactions, effet de confinement
 - Siège d'un fractionnement isotopique du deutérium
- $3D$ ➤ Impact fort sur le cycle hydrologique

■ *Poussière en suspension :*

- Contraintes sur le spectre en taille
- Propriétés optiques et microphysiques (transport)

Perspectives pour le futur

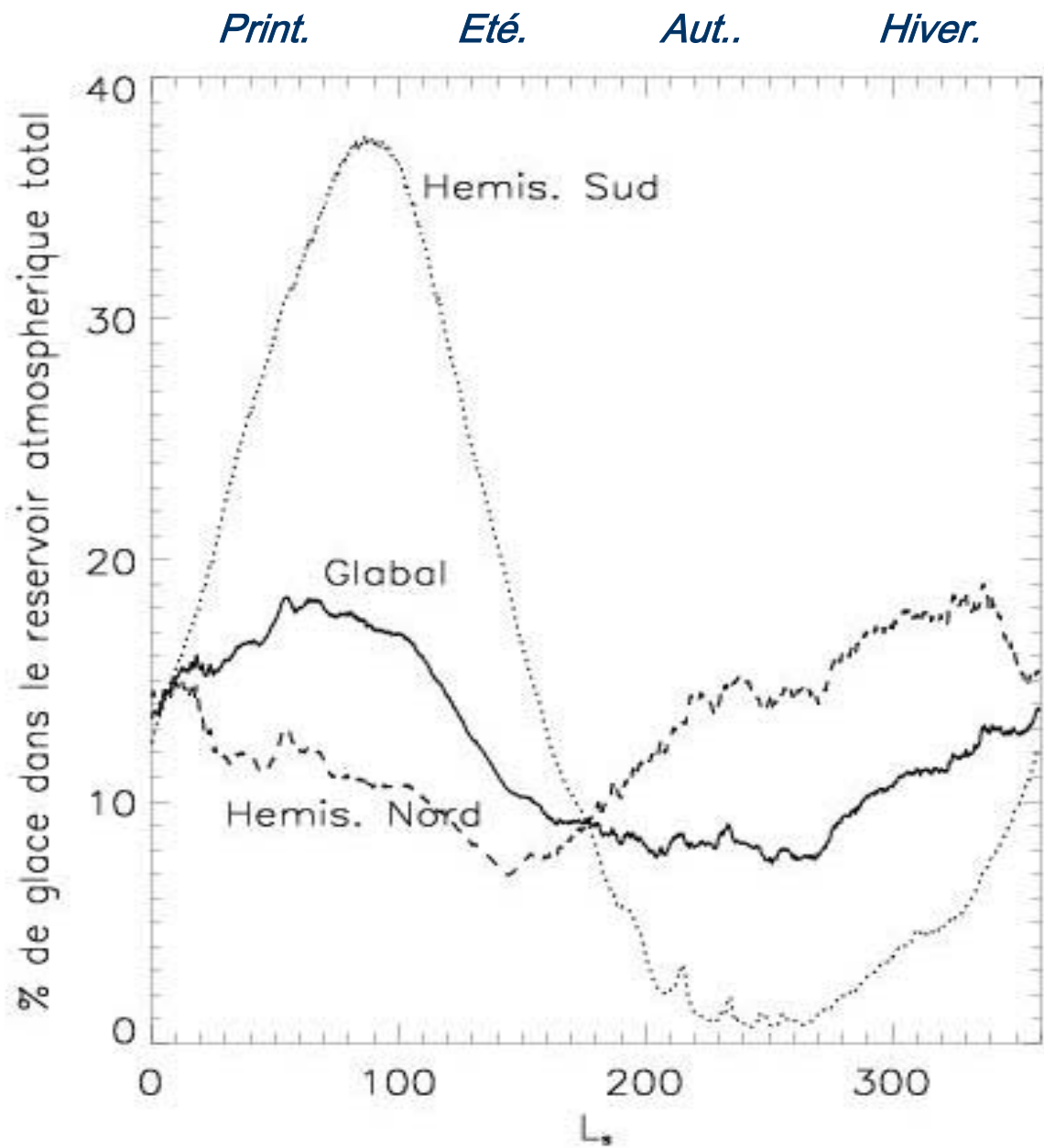
■ *Etudes 3D :*

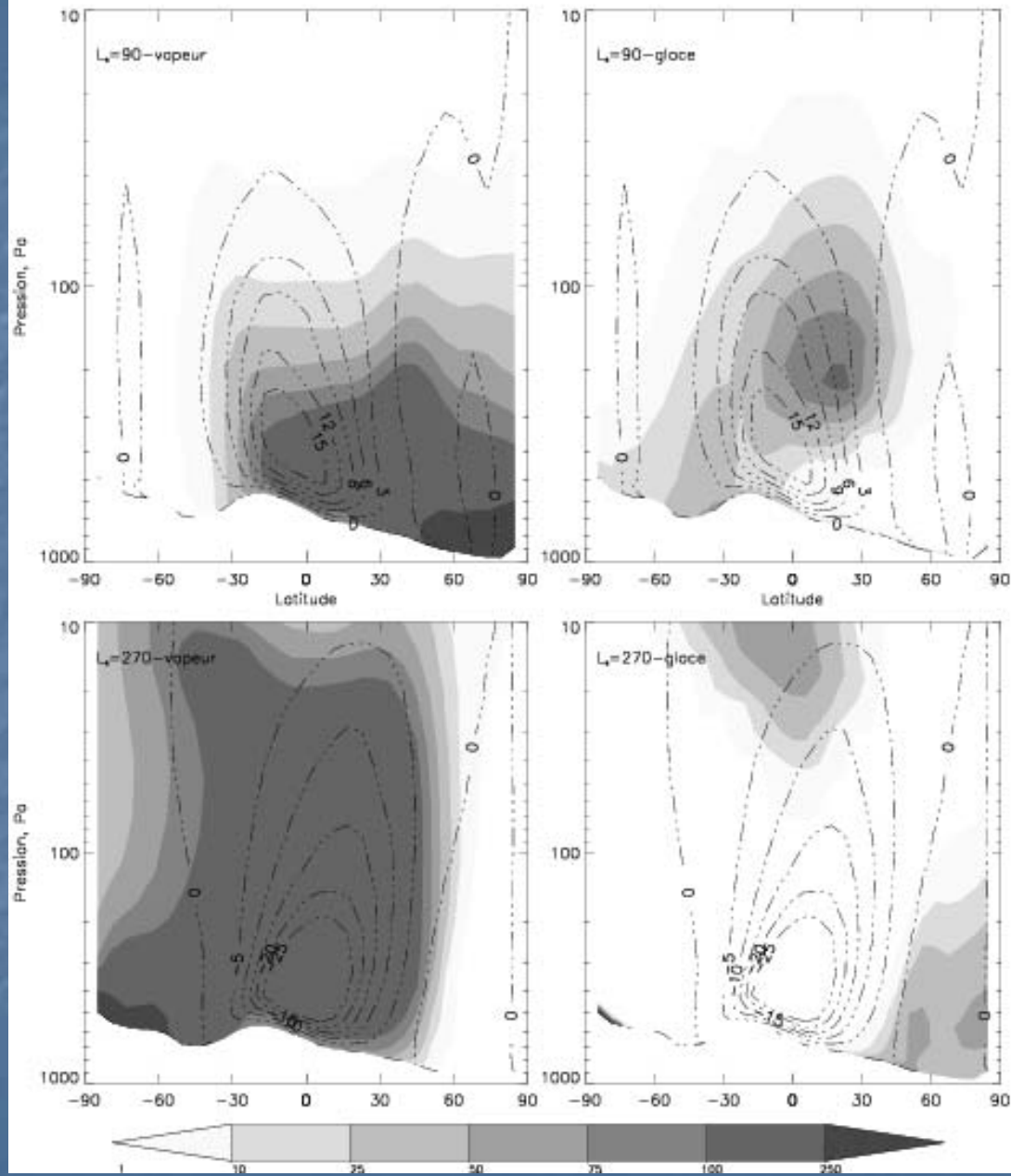
- Finalisation étude nuages (rétroaction radiative)
- Cycle de l'eau et paléoclimat
- HDO

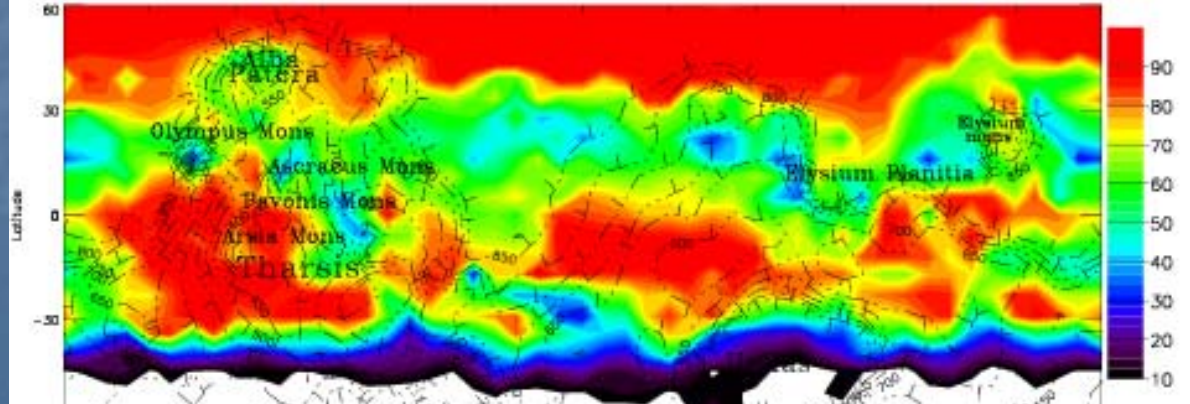
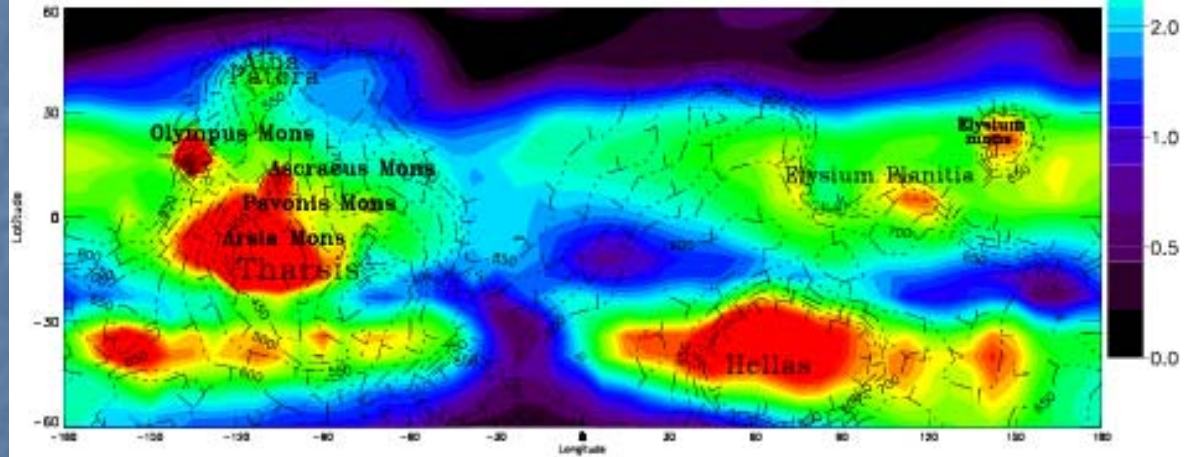
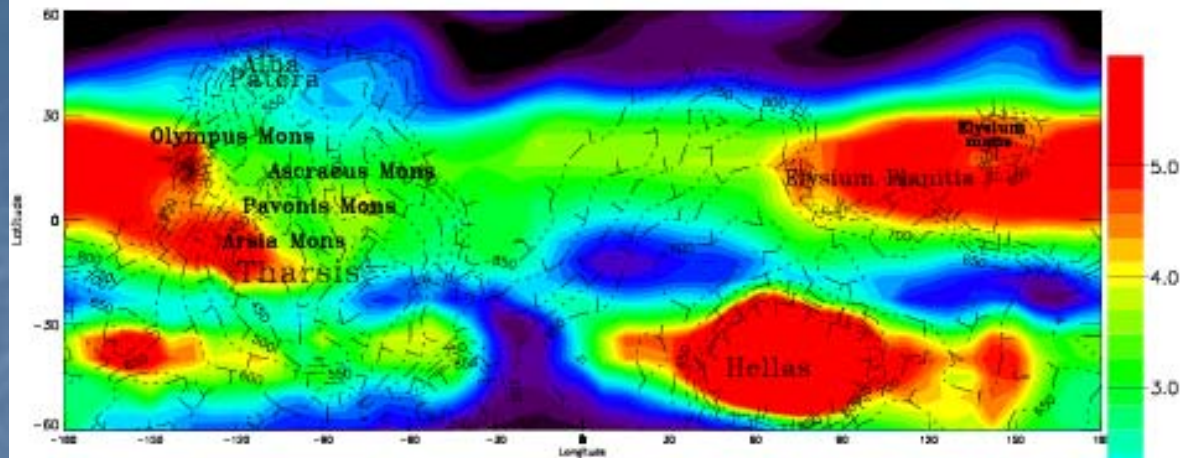
■ *Mission(s) spatiale(s) :*

- Mars express :
 - ✓ (SA) Instrument SPICAM Light
 - ✓ (IAS & DESPA) Instrument OMEGA

Pot de thèse :
Salle de réunion du
Service d'Aéronomie
Tour 15 - 5^{ème} étage







4. Cycle du deutérium : Fractionnement du HDO

■ Modèle photo-chimique (Yung et al., 1988)

➤ $F = 0.32$

≠ Mesures HST (Krasnopolsky et al., 1998)

➤ $F = 0.02$

➤ Q^{té} d'eau échappée ~ 50 m (Yung & Kass, 1999)

■ 2 Effets expliquent l'opposition théorie-observations

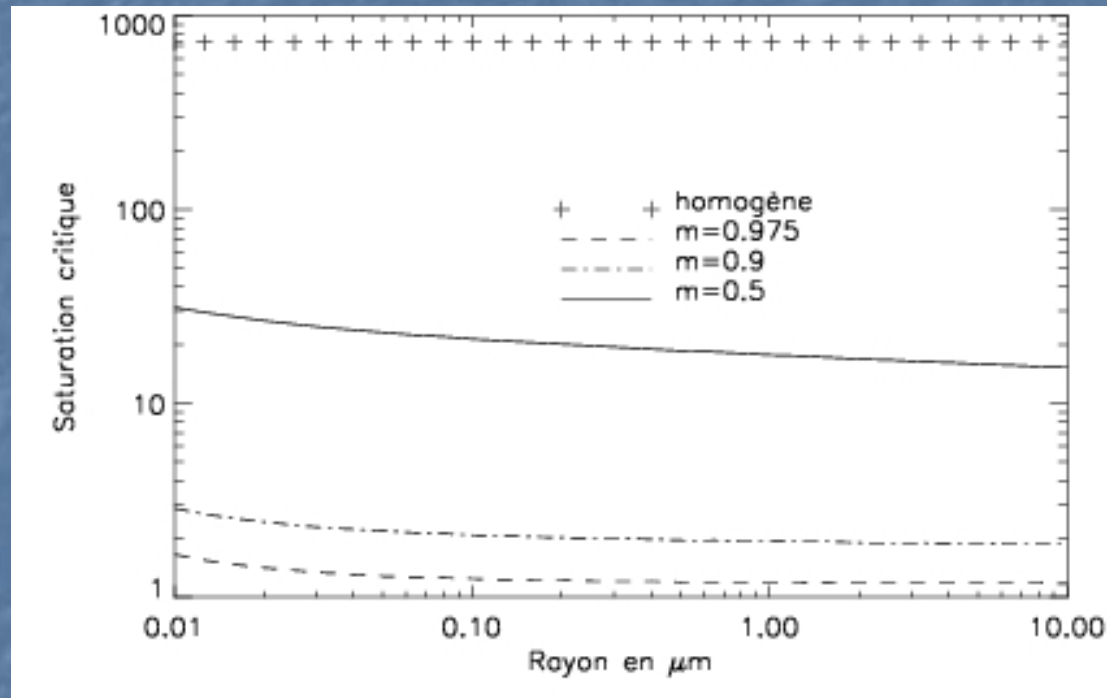
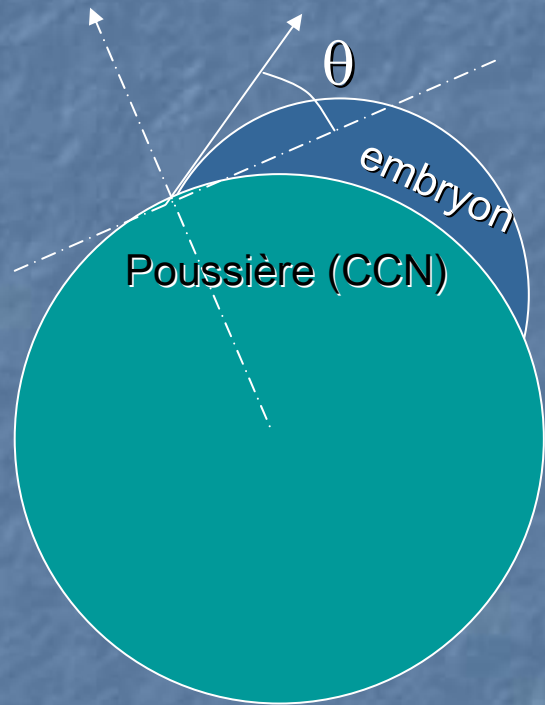
➤ PHIFE = Fractionnement à la photolyse (Cheng et al., 1999)

✓ photo-dissociation de HDO plus faible à $\lambda > 170$ nm

➤ CEFE = Fractionnement à la condensation (Bertaux & Montmessin, 2002)

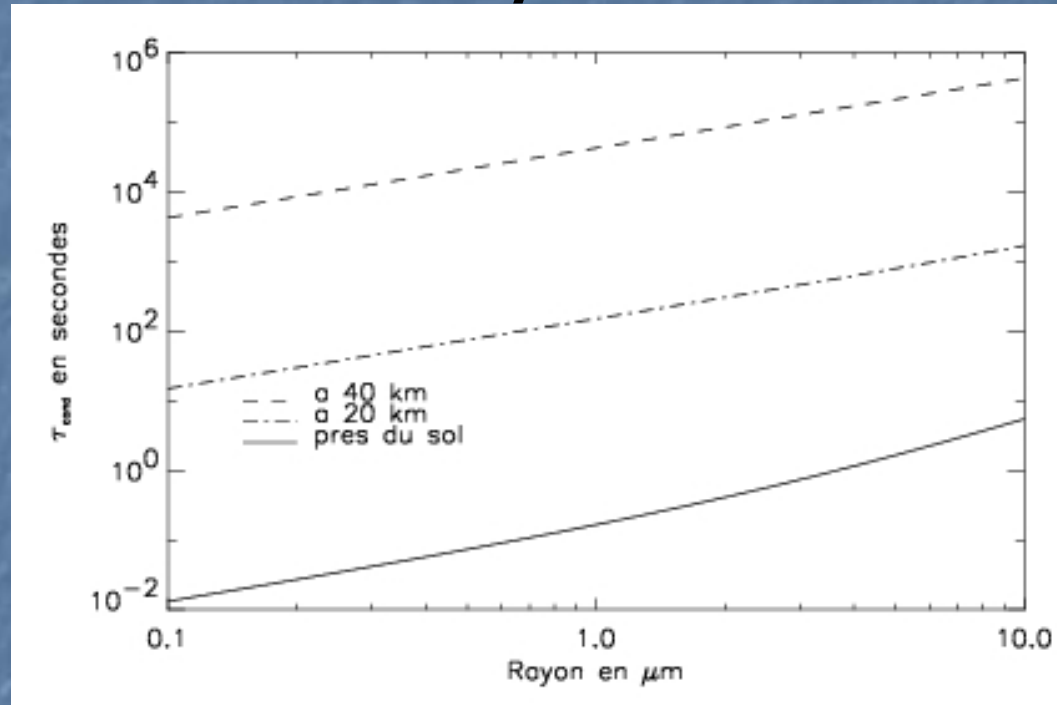
✓ P.V.S. de HDO < H₂O ➡ concentration de HDO plus forte dans la phase solide

2. *Processus microphysiques : description*



- Nucléation hétérogène
- ⇒ Dépendance : Rayon, θ , Saturation

2. *Processus microphysiques : description*



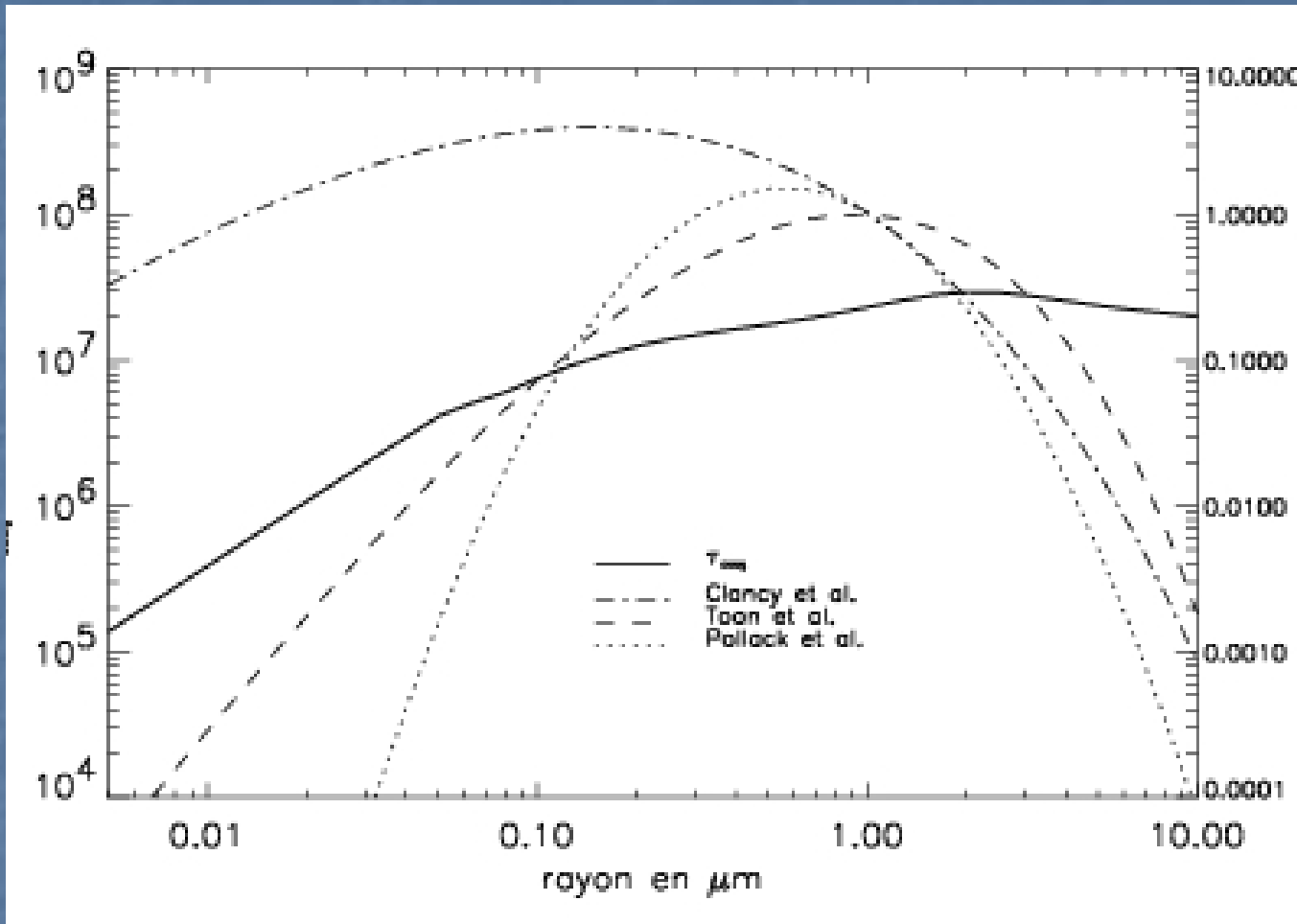
- Condensation/sublimation

Par dépôt de vapeur d'eau en surface des cristaux

- ⇒ Dépendance : Taille et Altitude

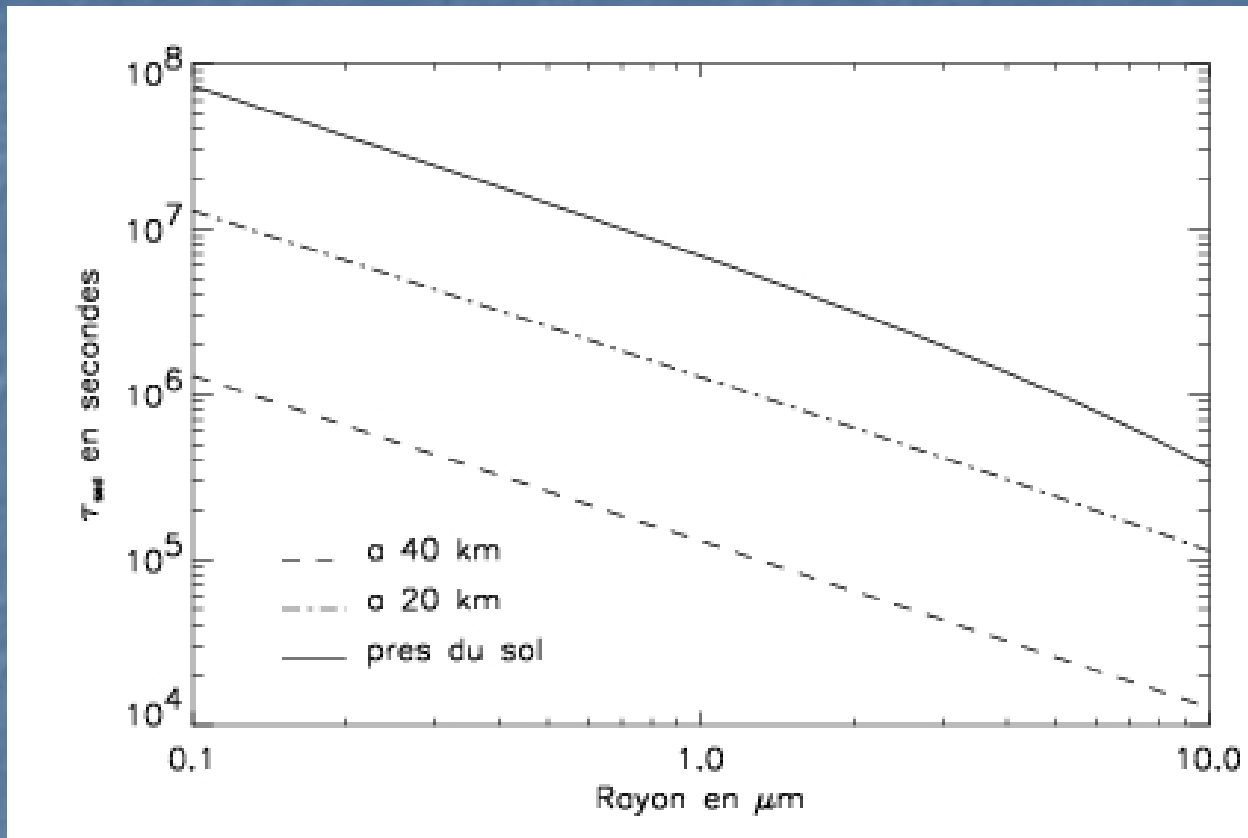
- ⇒ Processus rapide : quelques secondes à la journée

2. Processus microphysiques



- Accrétion des particules
- ➡ Processus le + lent : jour à l'année
- ➡ Rôle microphysique faible

2. Processus microphysiques : description

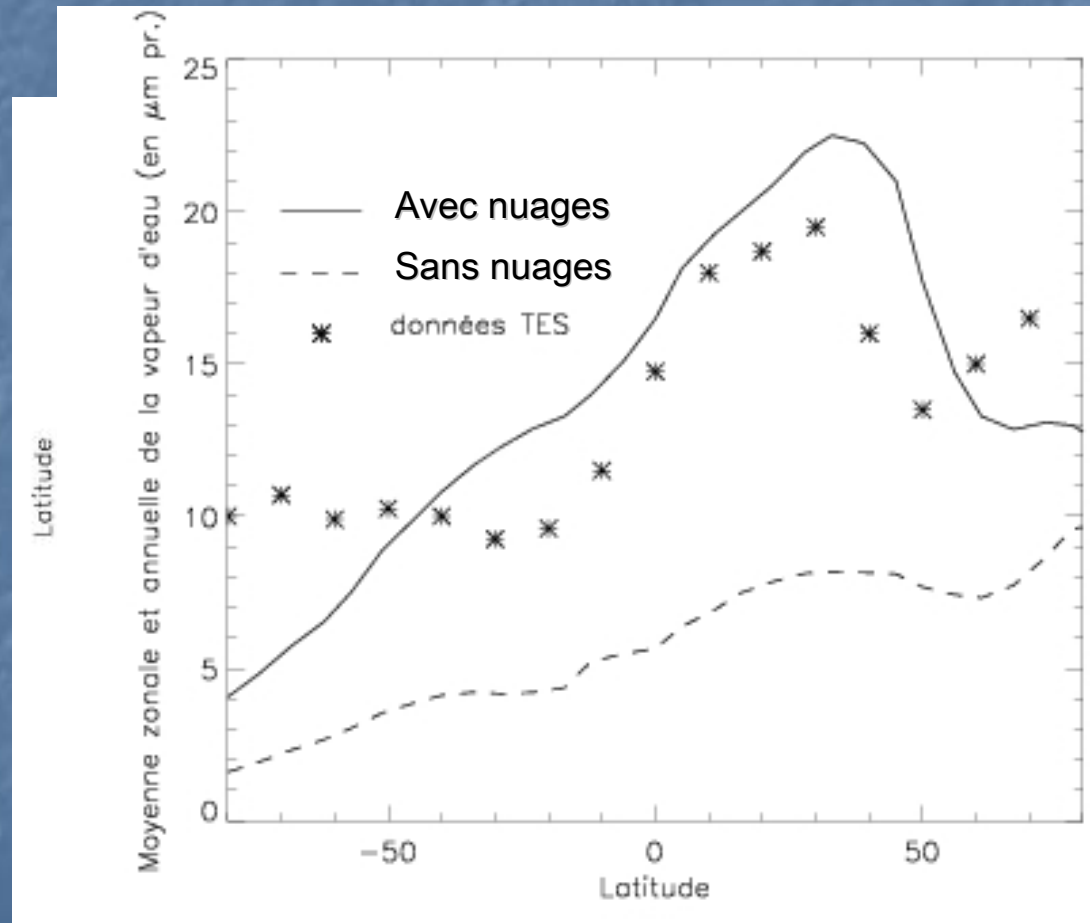


- Sédimentation
Chute des particules
- ⇒ Temps car. : heure à semaine
- ⇒ Compétition mélange/sédimentation = Structure verticale de la brume

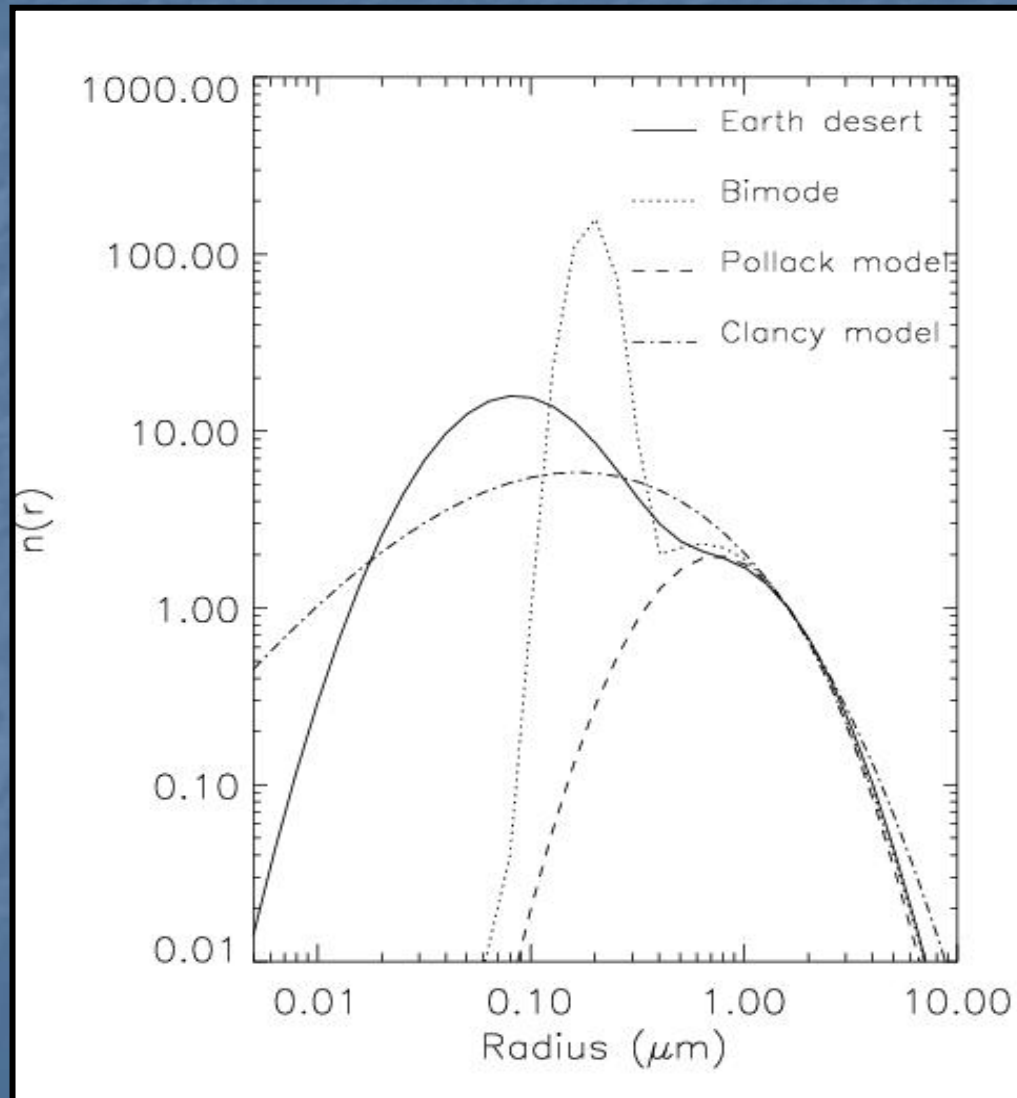
4. Répartition géographique de l'eau : rôle des nuages

Rééquilibrage vers les tropiques

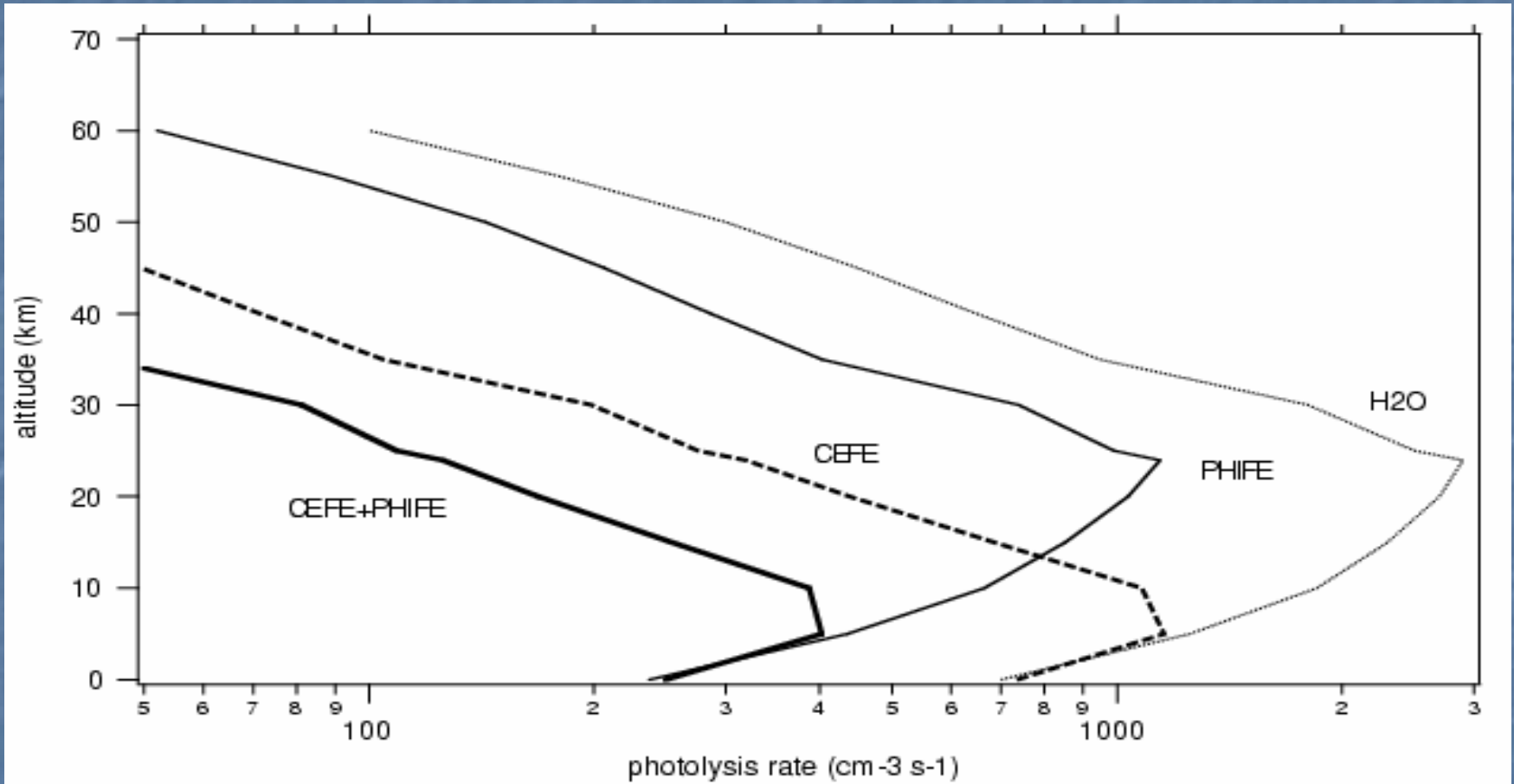
- *Echange humide entre capuches polaires et moyennes latitudes*



3. Comparaison de spectres de poussières



4. Réconcilier mesures et théorie



CEFE & PHIFE combinés