

# Etude de la matière interstellaire : Caractérisation de l'émission des grains Physico-chimie dans les milieux denses et froids

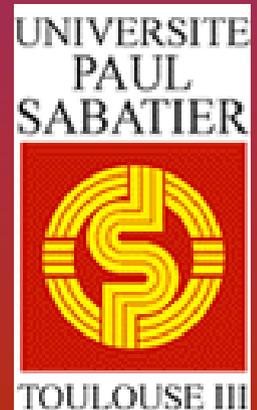
Nathalie Boudet

Directeurs de thèse :

Claude Mény  
Isabelle Ristorcelli



Département Univers Froid



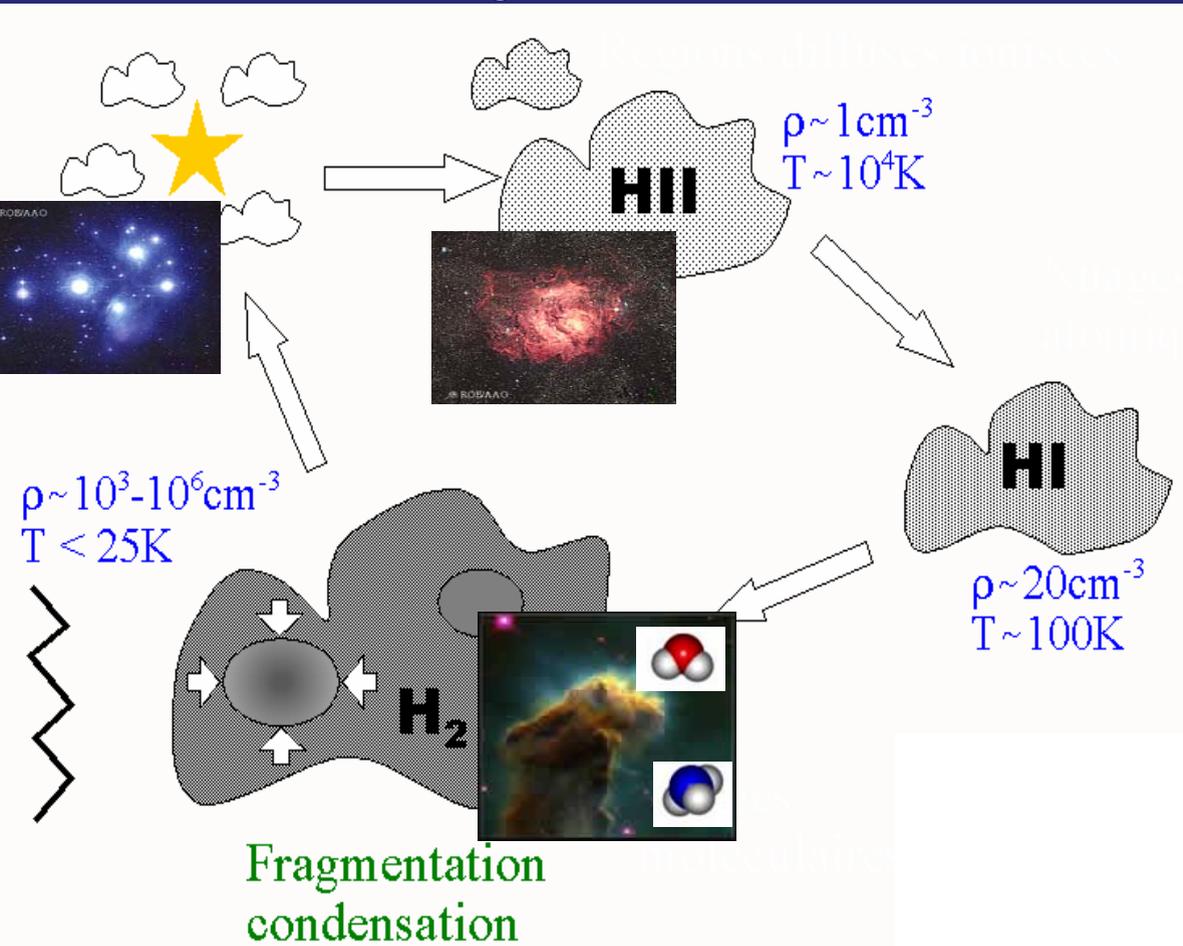
# Plan de présentation

1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

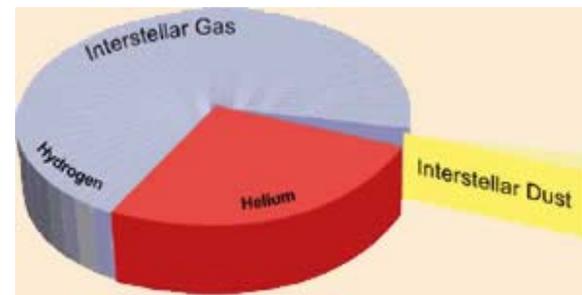
# Plan de présentation

1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

# 1.1. Le cycle du milieu interstellaire



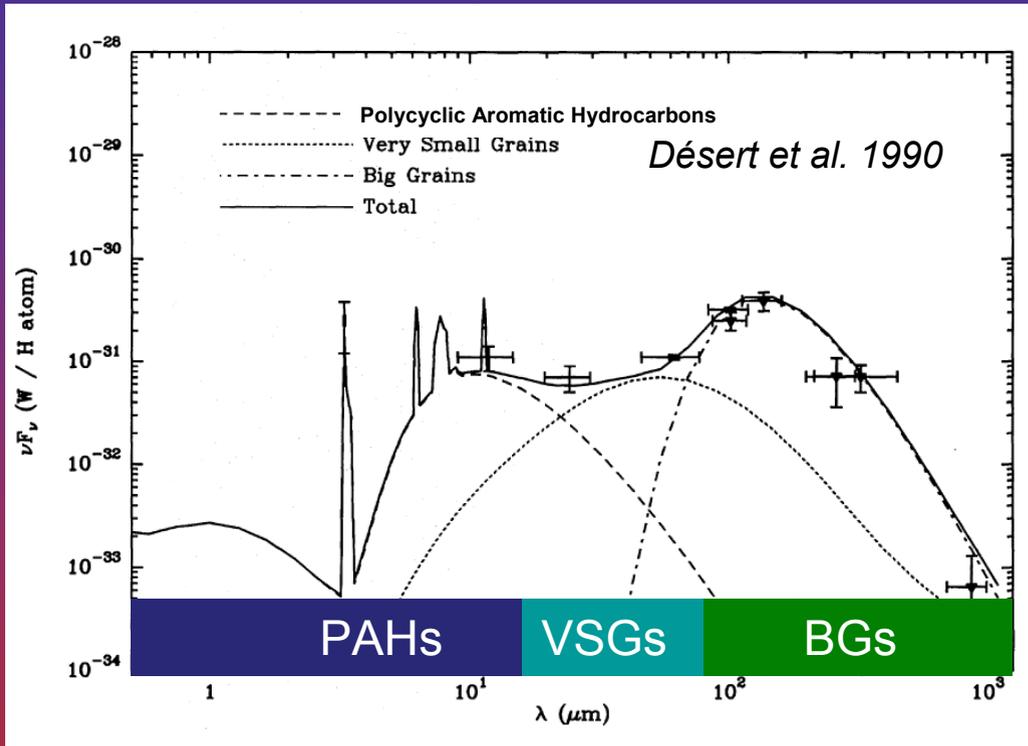
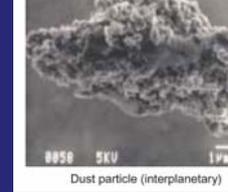
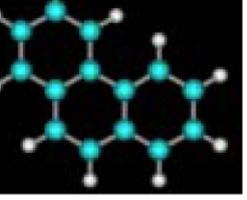
**MIS=gaz +grains**



**Grains = 1% en masse du gaz**

**Comprendre premières étapes de la formation stellaire** → **Etude des propriétés physico-chimiques du gaz et des grains dans les cœurs denses et froids** ⇨ **Evolution propriétés milieux diffus vers denses**

# 1.2. Modèles de grains interstellaires dans le MIS diffus



## 3 composantes :

- Molécules aromatiques PAHs
- Très petits grains carbonés VSG (hors eq. thermique)
- Gros grains silicatés amorphes BGs ( $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ) rayonnant dans le submm à l'équilibre thermique :

$$I_V = A \nu^\beta B_V(T)$$

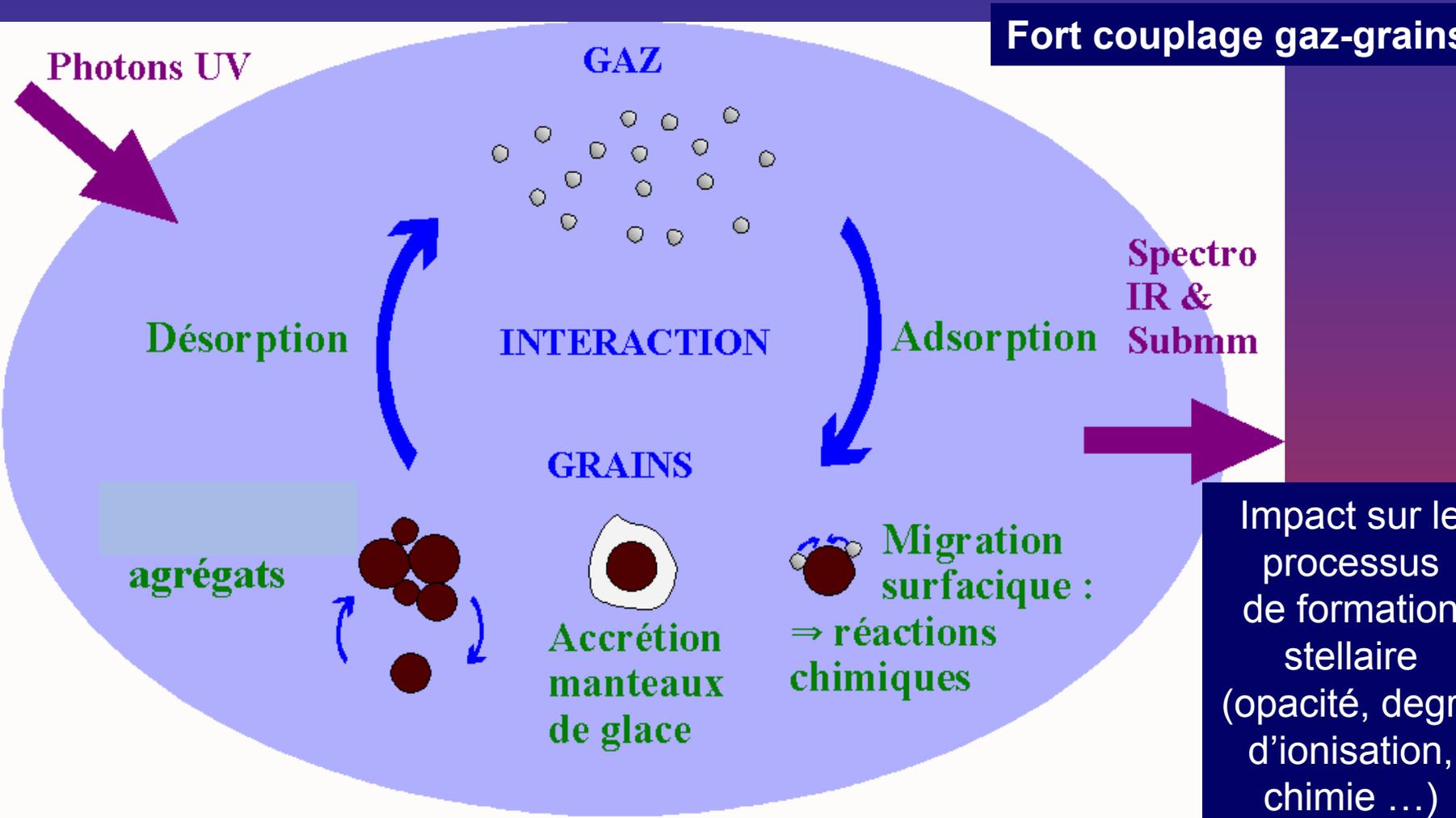
loi d'émission des grains : détermination de la masse, opacité, T ...

Trait commun de ces modèles  
Propriétés intrinsèques des grains indpt de T et de  $\nu$  :

$$\beta = \text{cst}$$

Évolution des prop. des grains dans les environnements denses ?

# 1.3. Evolution des propriétés du milieu diffus → dense et froid



Evolution des mécanismes d'interaction des milieux diffus → denses

Modifications propr. physico-chimiques gaz & grains

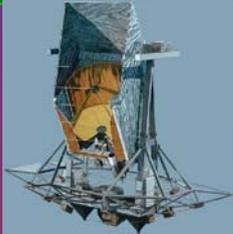
• Nécessité de mieux comprendre les processus à l'œuvre dans ces régions

# 1.4. Objectifs de la thèse

## GRAINS



Observations  
astrophysiques



Etudes  
théoriques

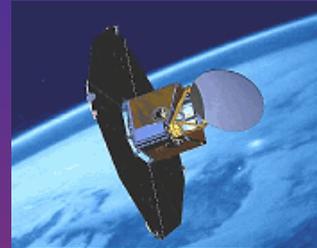
Mesures de  
laboratoire

Emission dans le  
continuum  
submillimétrique des  
grains de poussières :  
 $T, \beta, N$ , émissivité

Interactions gaz-grains

Agrégation,  
manteaux de glace

## GAZ



ODIN  
Raies submm  
 $H_2O$



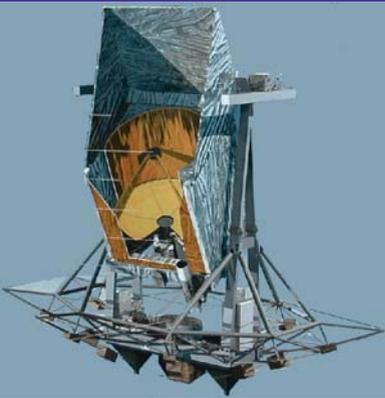
Observations  
sol (IRAM ...)  
 $CO, N_2H^+$

Emission des molécules  
dans leurs transitions  
rotationnelles :  $T^\circ$ ,  
densité, turbulence,  
chimie du milieu

# Plan de présentation

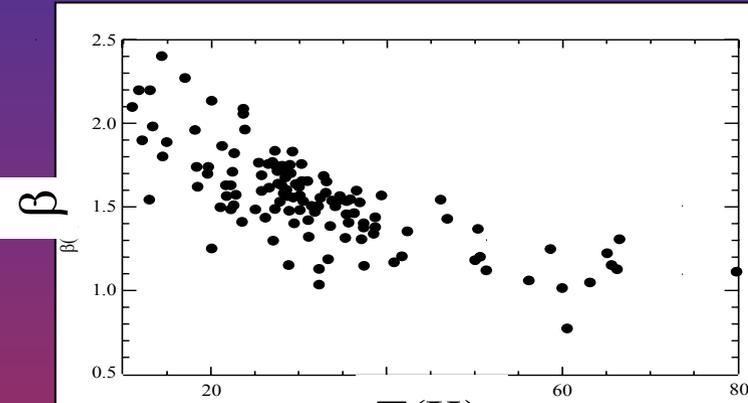
1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

# 2.1. Données observationnelles



PRONAOS : mesure de l'émission submm des gros grains dans différents sites du MIS ;  $\lambda_{\text{PRONAOS}} \in [100, 1000] \mu\text{m}$ -  
Résolution angulaire : 3.5'

**Anti-corrélation  
prononcée entre  
T et  $\beta$**   
*Dupac et al., 2003*

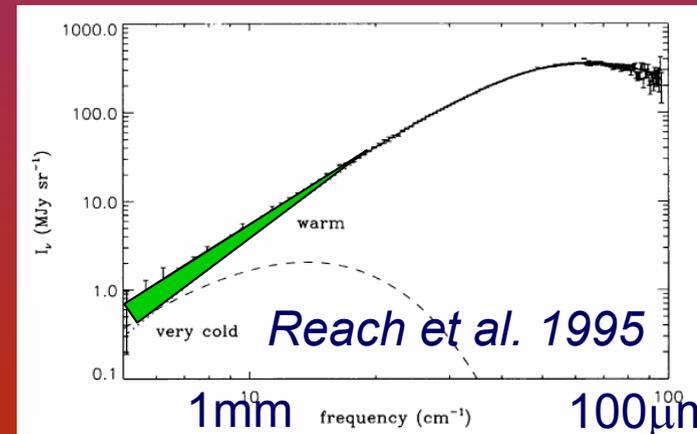


**Insuffisance des modèles actuels de grains :  $\beta = \text{cst}$**

FIRAS : mesure de l'émission galactique à grande échelle  
 $\lambda_{\text{FIRAS}} \in [100 \mu\text{m} - 10 \text{mm}]$   
Résolution angulaire = 7°



**Excès d'émission  
submm le long du  
plan galactique**  
variation de  $\beta$  avec  $\nu$



# 2.2. Données de laboratoire

## Agladze (1996)

T = 1K - 30K

700  $\mu\text{m}$ -2mm

Silicates amorphes  
MgSiO<sub>3</sub> et Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

## Bösch (1978)

T=1.5K-300K

500  $\mu\text{m}$ -5mm

silicate amorphe :  
Soda-lime silica glass

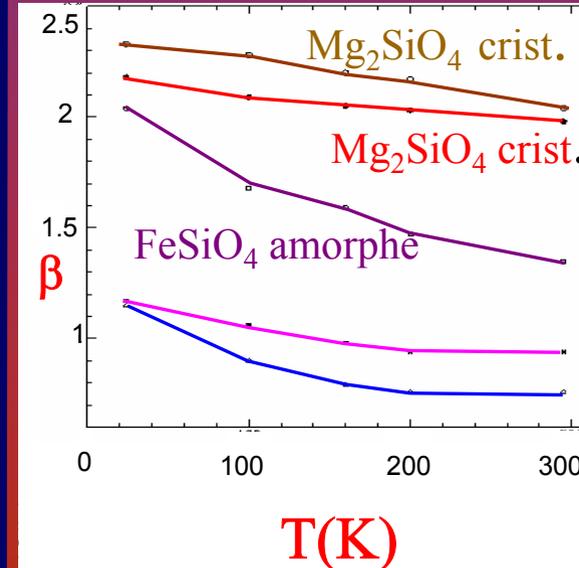
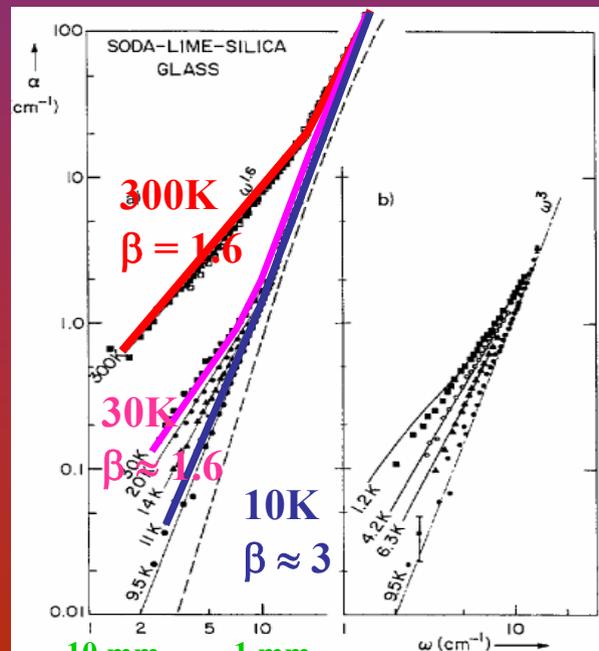
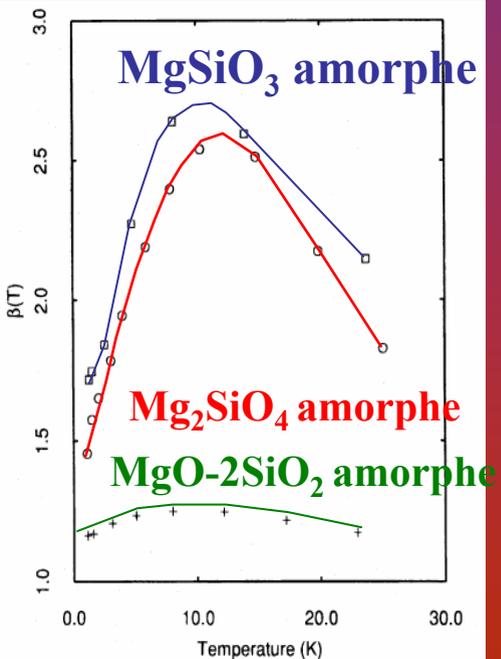
## Mennella (1998)

T = 24K – 294K

20  $\mu\text{m}$ -2mm

silicates amorphes et  
cristallins

Caractéristiques communes entre données de laboratoire  
et données astrophysiques



# 2.2. Données de laboratoire

## Agladze (1996)

T = 1K - 30K

700  $\mu\text{m}$ -2mm

Silicates amorphes  
 $\text{MgSiO}_3$  et  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

## Bösch (1978)

T=1.5K-300K

500  $\mu\text{m}$ -5mm

silicate amorphe :  
Soda-lime silica glass

## Mennella (1998)

T = 24K – 294K

20  $\mu\text{m}$ -2mm

silicates amorphes et  
cristallins

**Caractéristiques communes entre données de laboratoire  
et données astrophysiques**

Interprétation des données de laboratoire en terme de :

**Effet résonnant dans  
des systèmes à deux  
niveaux (TLS= Two  
Levels System)**

**Processus TLS+  
absorption  
structure  
désordonnée du  
matériau**

**Différence de  
deux phonons**

**$\Rightarrow$  Les processus invoqués peuvent-ils expliquer  
les données astrophysiques ?**

# 2.2. Données de laboratoire

## Bösch (1978)

$T=1.5K-300K$

$500 \mu m-5mm$

silicate amorphe :  
Soda-lime silica glass

Variation de  $\beta$  avec  $T$   
et  $\beta$  dépendant de  $\nu$

Utilisation de la  
modélisation de Bösch :  
mécanismes TLS+  
absorption due à la  
structure désordonnée  
du matériau

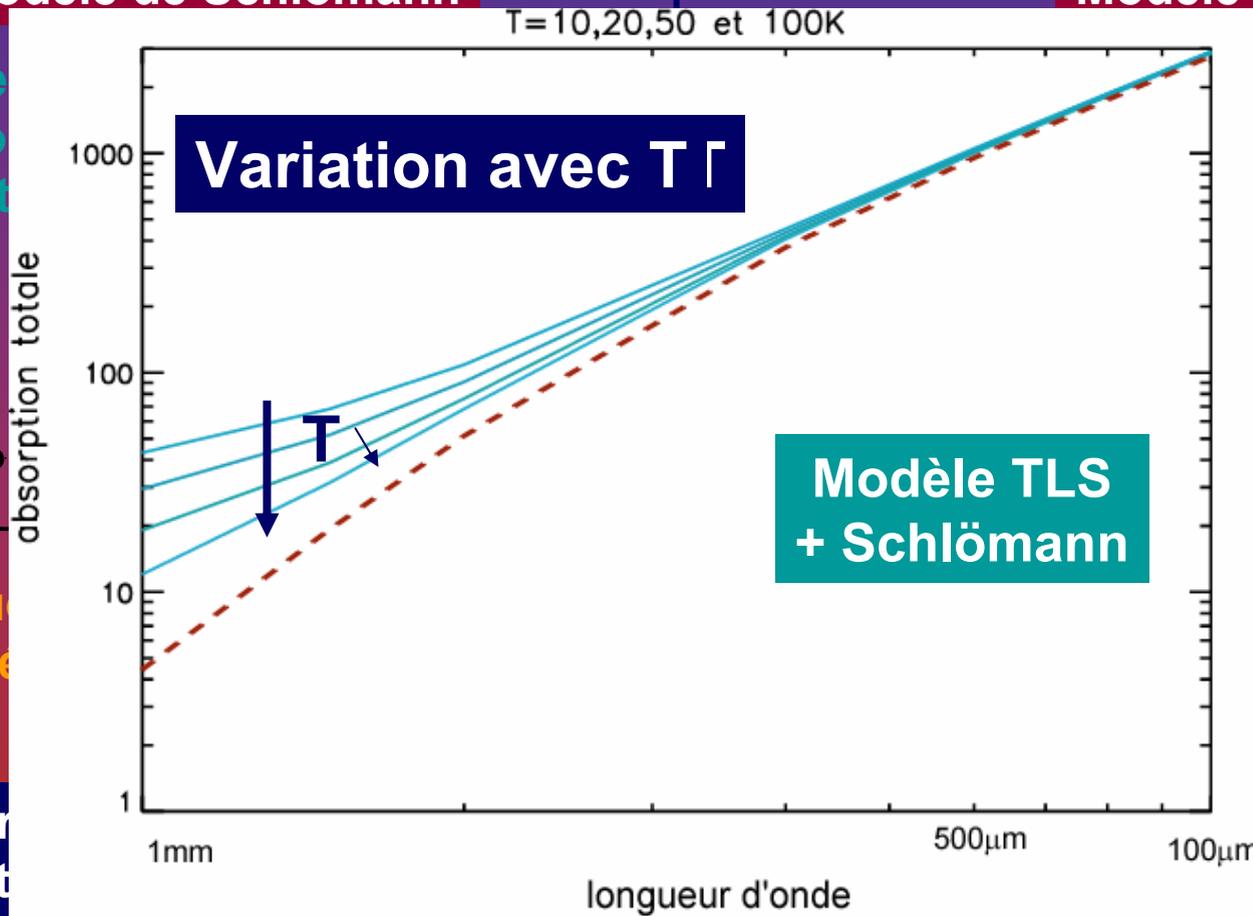
Tester l'aptitude de ce modèle à reproduire l'anticorrélation  
PRONAOS et l'excès submillimétrique FIRAS

# 2.3. La modélisation du désordre : Modèle TLS et modèle de Schlömann (1964)

Modélisation de Bösch (1978)

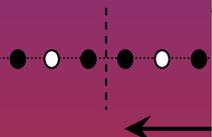
Modèle de Schlömann

Modèle TLS

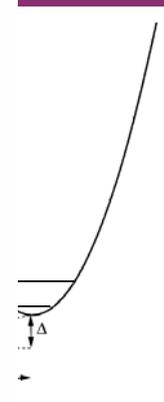


Désordre  
variations  
st

puits de potenti  
permettent une  
es ou de groupe  
rations spatiale  
voisines



L : longu  
Neutralité



Absor  
la t

pendante de  
e et  $\beta < 2$

Choix des paramètres utilisés par Bösch, valable pour un silicate amorphe de composition  
73% de SiO<sub>2</sub>, 17% de Na<sub>2</sub>O, 8% de CaO

## 2.4. La modélisation du désordre : le modèle de Schlömann (1964), indépendant de $T$

$$\alpha_{\text{back}} \approx \frac{2 \cdot (\epsilon + 2)^2}{3^3 \cdot c \cdot \sqrt{\epsilon} \cdot c_t^3} \cdot \frac{\langle q^2 \rangle}{\bar{m}} \cdot \omega^2 \cdot \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^{-2} \right]$$

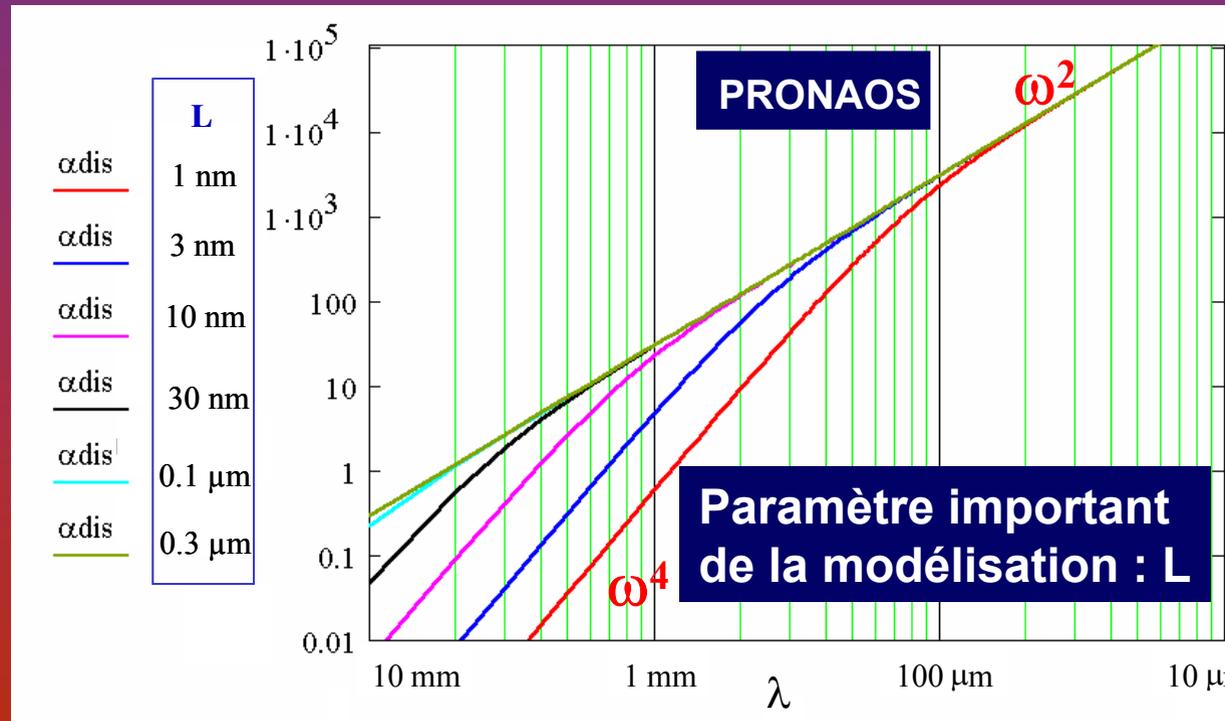
Dépendance fréquentielle

$$\omega_0 = \frac{2\pi c_t}{L}$$

Suivant la valeur de  $L$  :  
dépendance entre  $\omega^2$  et  $\omega^4$

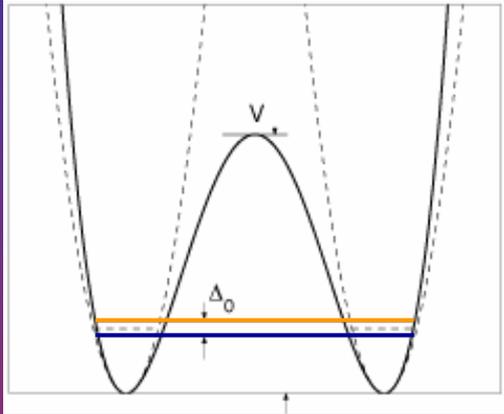
Intensité du processus

$\epsilon$ : constante diélectrique  
 $c$ : vitesse de la lumière  
 $c_t$ : vitesse du son  
 $\langle q^2 \rangle / \bar{m}$ : déviation de charge moyenne

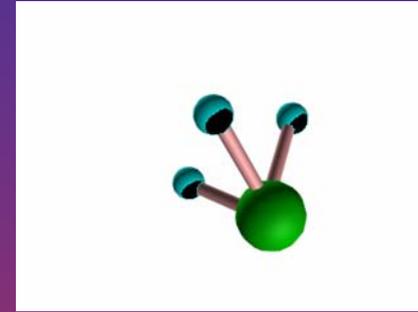
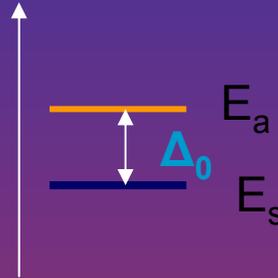


# 2.5. La modélisation du désordre : le modèle TLS (Phillips, 1971), dépendant de $T$

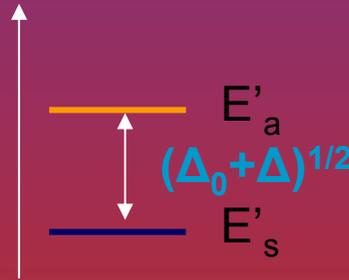
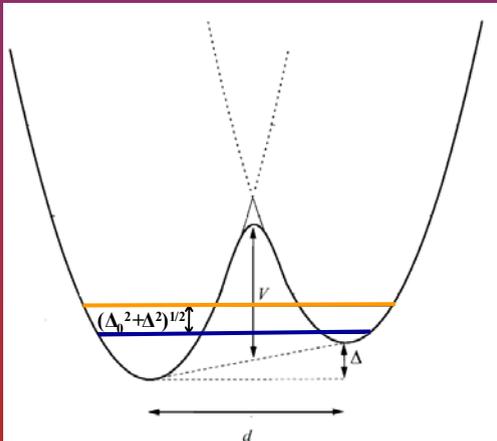
Double puits symétrique



Inversion de la molécule d'ammoniac  
par effet tunnel résonnant



NH<sub>3</sub>



Effet tunnel résonnant

$$\alpha_{res}(\omega) = \frac{4\pi^2 \cdot N(\omega) \cdot \mu^2}{3c \cdot \sqrt{\epsilon}} \cdot \omega \cdot \tanh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right)$$

intensité

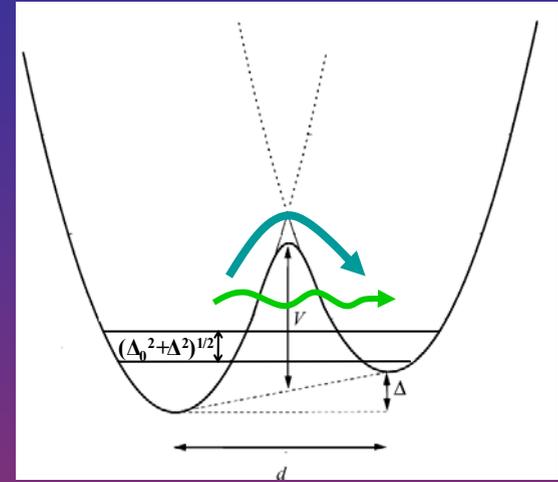
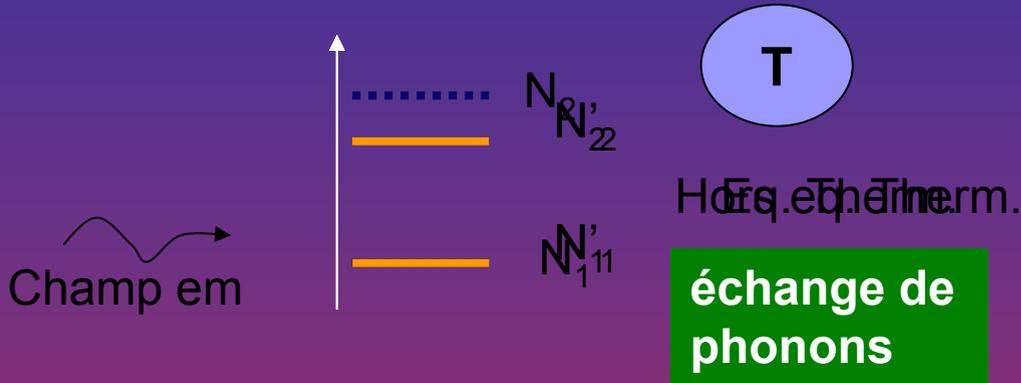
dépendance  
fréquentielle

Distribution de double puits  
de potentiel d'asymétrie  $\Delta$   
haut.  $V$ . dist.  $D$

$\Rightarrow$  Densité d'états  $N(\omega)\mu^2$

# 2.6. Le modèle TLS (*Phillips, 1971*)

Couplage avec environnement local à T :  
Processus de relaxation



Relaxation par effet tunnel assisté par un phonon

$$\alpha_{ph}(\omega) = A \int \frac{\exp(E/kT)}{kT(1 + \exp(E/kT))^2} \frac{\omega^2 \tau_r}{1 + \omega^2 \tau_r^2} dE$$

Relaxation par sauts activés thermiquement assistée par 2 phonons

$$\alpha_{hop}(\omega) = \left(\frac{h}{T}\right) \int_0^\infty P(V) \cdot \frac{\omega^2 \tau_{hop}(V)}{1 + \omega^2 \tau_{hop}(V)^2} \cdot dV$$

Intensité du processus:

A et h : constantes de relaxation

Dépendance fréquentielle :

$\tau_r$  et  $\tau_{hop}$  : temps de relaxation

P(V) : distribution de la barrière de potentiel

# 2.7. Modélisation de l'anticorrélation T- $\beta$

## Calcul spectre d'émission

Calcul de T et  $\beta$  issu de la procédure de traitement PRONAOS

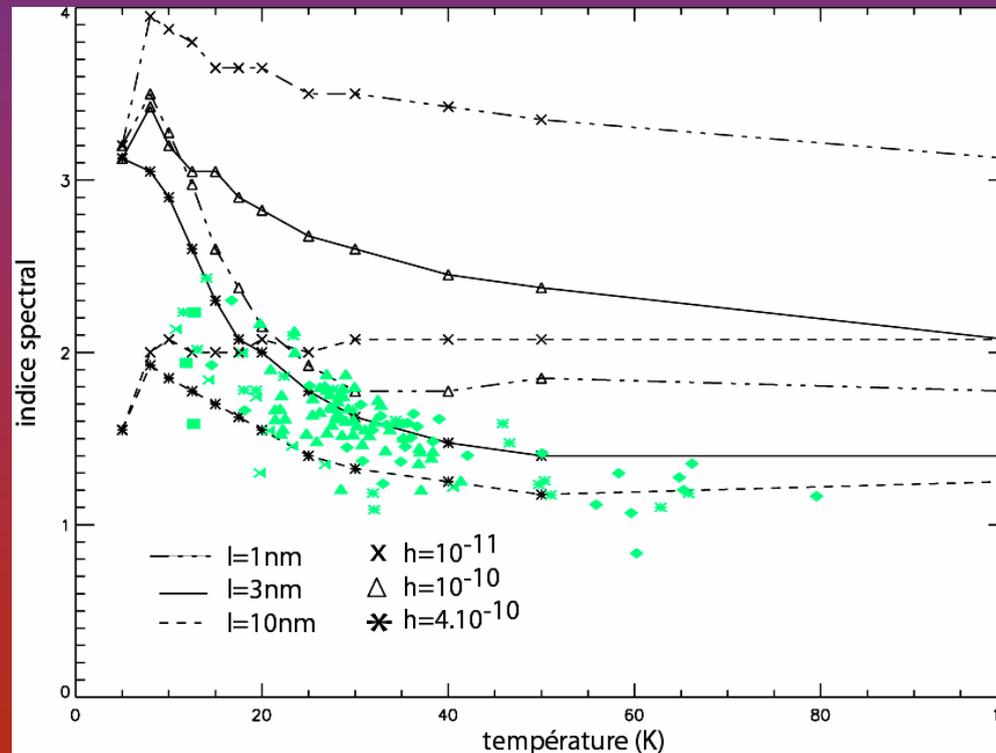
On se restreint à deux paramètres libres :

- La longueur de corrélation L
- La constante de relaxation h du mécanisme activé thermiquement

**Anticorrélation reproductible  
pour**

$$h = 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}$$
$$L = 1 - 5 \text{ nm}$$

Augmentation de 30-100 du  
processus  
activé thermiquement



# 2.8. Modélisation de l'excès submillimétrique FIRAS

Paramètres libres :

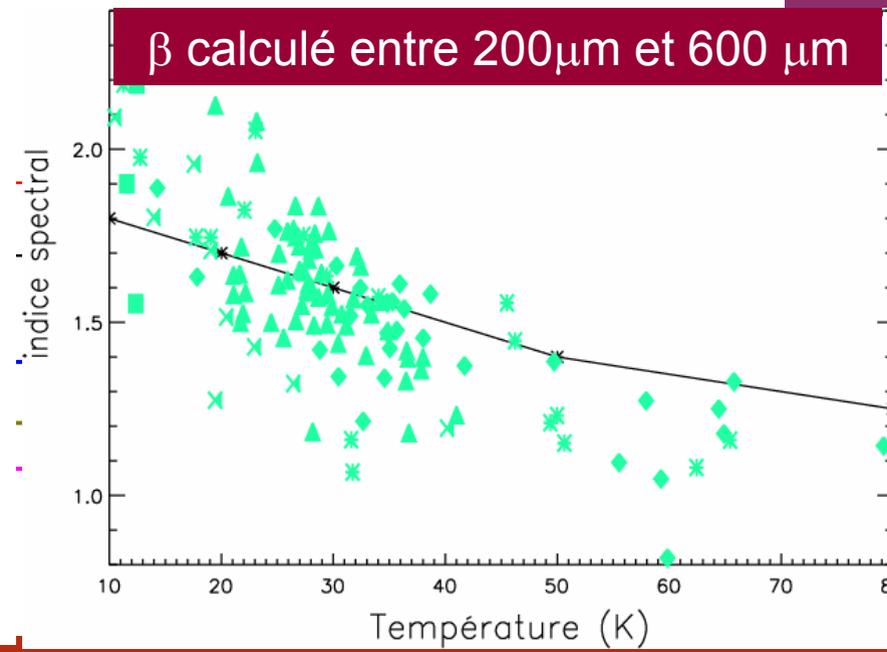
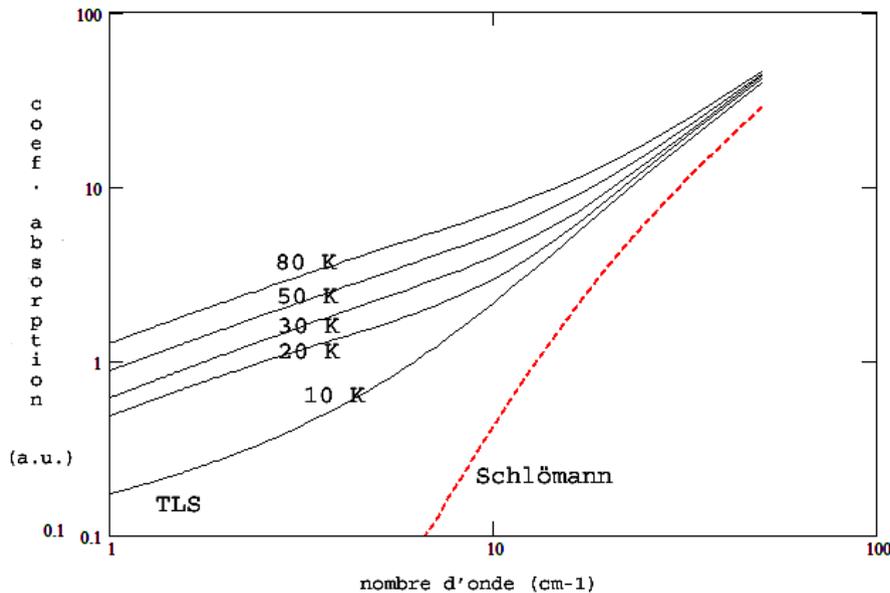
- La longueur de corrélation  $L$
- La constante de relaxation  $h$  du mécanisme activé thermiquement
- La constante de relaxation  $A$  du mécanisme assisté par phonons
- La densité d'états TLS  $N\mu^2$

$L = 5\text{ nm}$

$N\mu^2 = 5.6 \times 10^{-2}$  (unités cgs)

$A = 2.6 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}$

$h = 6 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{s}$



# 2.9. Conclusions

- **Modèle basé sur le modèle TLS (explique les propr. thermiques et diélectriques de tous les solides amorphes à basses T) + absorption due à la structure désordonnée du réseau**

*Mény, Gromov, Boudet et al., A&A, en préparation*

- **Pour la première fois ce modèle est appliqué à des données astrophysiques**

**Modèle unique, basé sur  $\Delta^\circ$  prop. intrinsèques des grains, qui permet de rendre compte à la fois de l'anticorrélation T- $\beta$  et de l'excès submm. FIRAS**

# Plan de présentation

1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

# 3.1. Dépendance en température de l'absorption submillimétrique de grains silicatés amorphes

<b>Agladze</b>	<b>Bösch</b>	<b>Mennella</b>
T = 1K - 30K	T=1.5K-300K	T = 24K – 294K
700 $\mu\text{m}$ -2mm	500 $\mu\text{m}$ -5mm	20 $\mu\text{m}$ -2mm
Silicates amorphes $\text{MgSiO}_3$ et $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	un silicate amorphe : Soda-lime silica glass	un seul silicate amorphe $\text{FeSiO}_4$

**Peu de mesures à basse T et grande  $\lambda$  :**

- $\Rightarrow$  Mesurer un + grand nombre de matériaux silicatés amorphes**
- $\Rightarrow$  Choisir un domaine de T et  $\nu$  pour comparaison avec les données observationnelles (PRONAOS)**



**Campagnes de mesures à l'AIU d'Iéna**

## 3. 2. Configuration instrumentale (AIU, Iéna)



Spectromètre à Transformée de Fourier  
( Bruker 113 v)

couverture spectrale :  **$5\text{cm}^{-1}$ - $100\text{cm}^{-1}$**   
(2mm-100 $\mu\text{m}$ )

résolution spectrale :  $0.5$ - $1\text{cm}^{-1}$

**Mesures de la transmission** des échantillons

Cryostat à flux continu d'hélium liquide  
(Cryovac-Konti Spektro B)

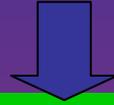
Températures d'étude :  
 **$300\text{K}$ ,  $200\text{K}$ ,  $100\text{K}$ ,  $30\text{K}$ ,  $10\text{K}$**

Détecteur bolométrique  
refroidi à  $1.5\text{K}$



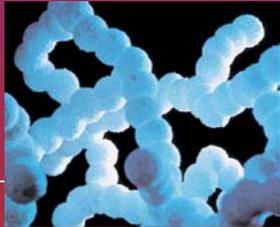
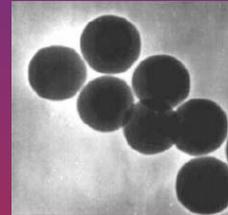
# 3. 3. Silicates amorphes étudiés

Étude combinée sur le plus simple des composés silicatés ( $\text{SiO}_2$ )  
et sur un analogue de grains interstellaires ( $\text{MgSiO}_3$ )



**Trouver les propriétés communes aux silicates amorphes**

Silice commerciale  $\text{SiO}_2$  amorphe :  
billes de silice Lancaster ( $\varnothing \sim 0.5 \mu\text{m}$ )  
billes de silice Merck ( $\varnothing \sim 1.5 \mu\text{m}$ )



chaînon microniques de billes  
de silice nanométriques Aldrich

*Silicates  
conditionnés  
sous  
forme de pastilles  
enrobées  
dans du  
polyéthylène*

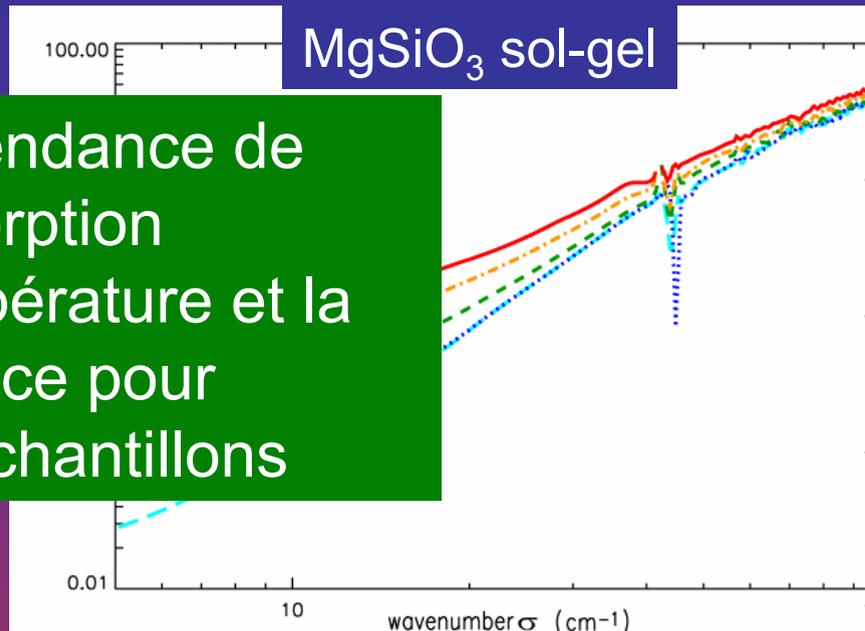
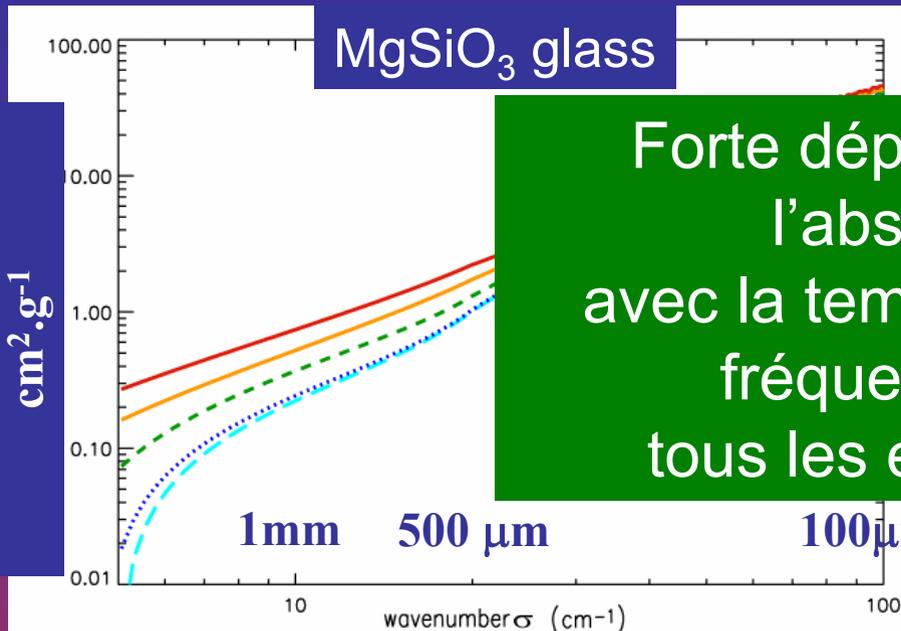
Enstatites amorphes  $\text{MgSiO}_3$  synthétisés  
par méthode sol-gel  
par fusion à hautes températures (glass)

# 3. 4. Résultats

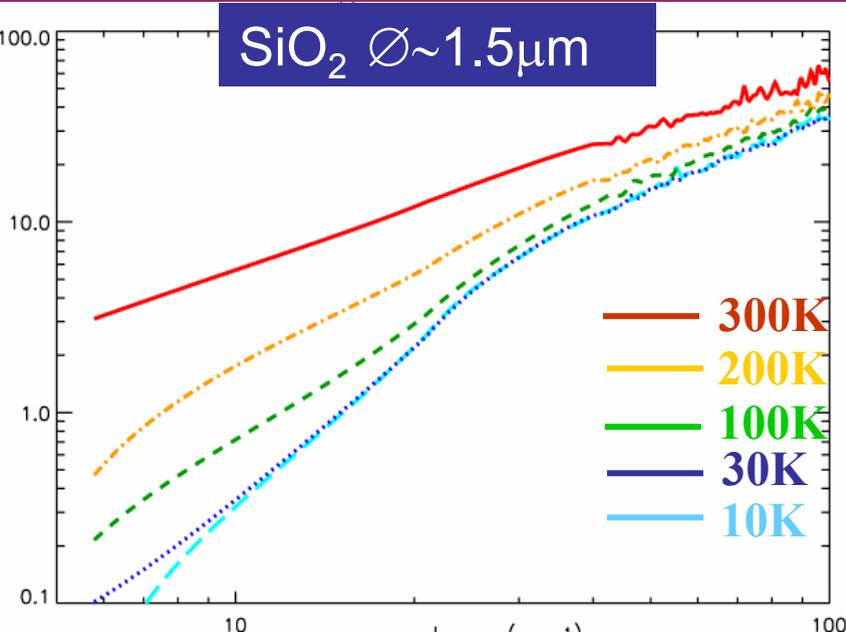
MgSiO<sub>3</sub> glass

MgSiO<sub>3</sub> sol-gel

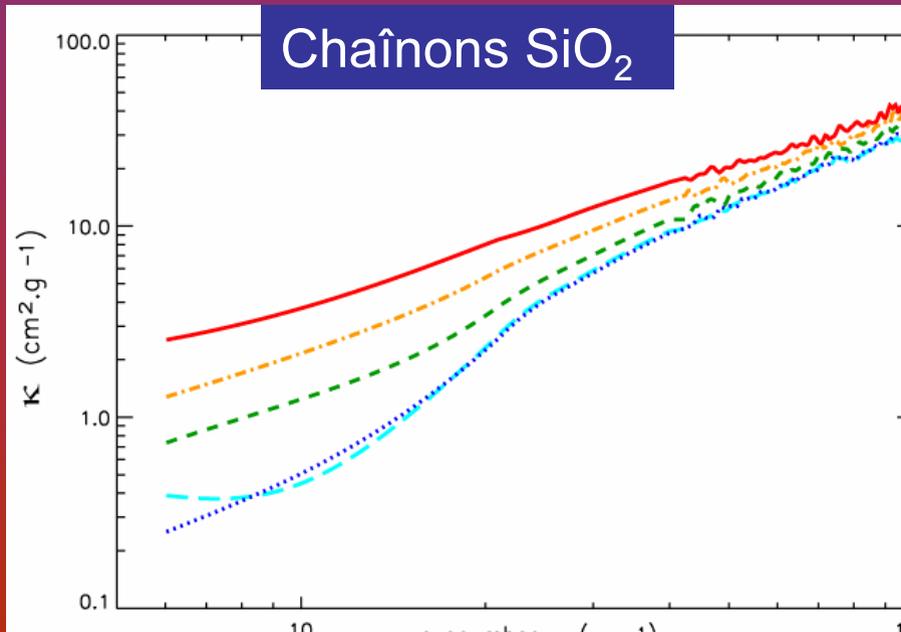
Forte dépendance de l'absorption avec la température et la fréquence pour tous les échantillons



SiO<sub>2</sub> Ø~1.5μm

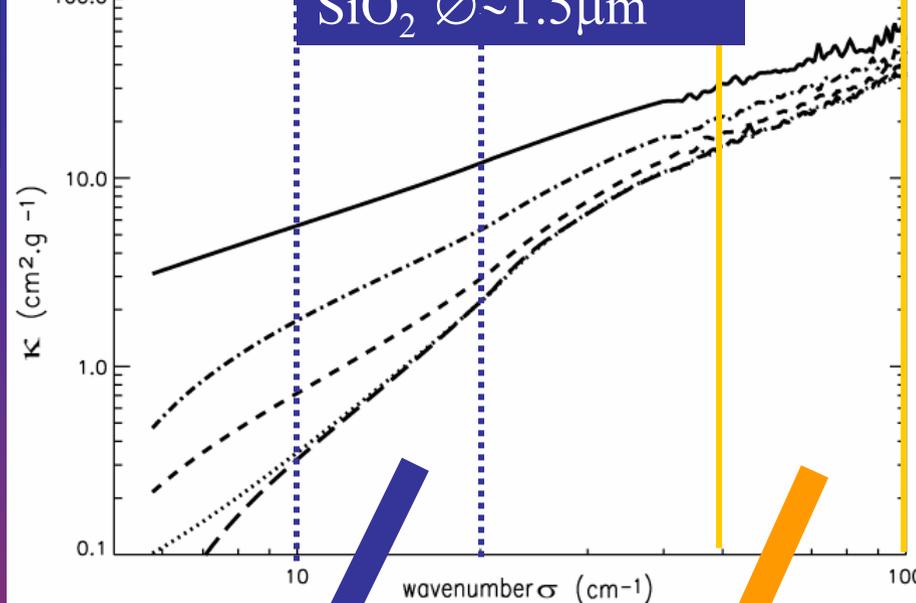


Chaînes SiO<sub>2</sub>

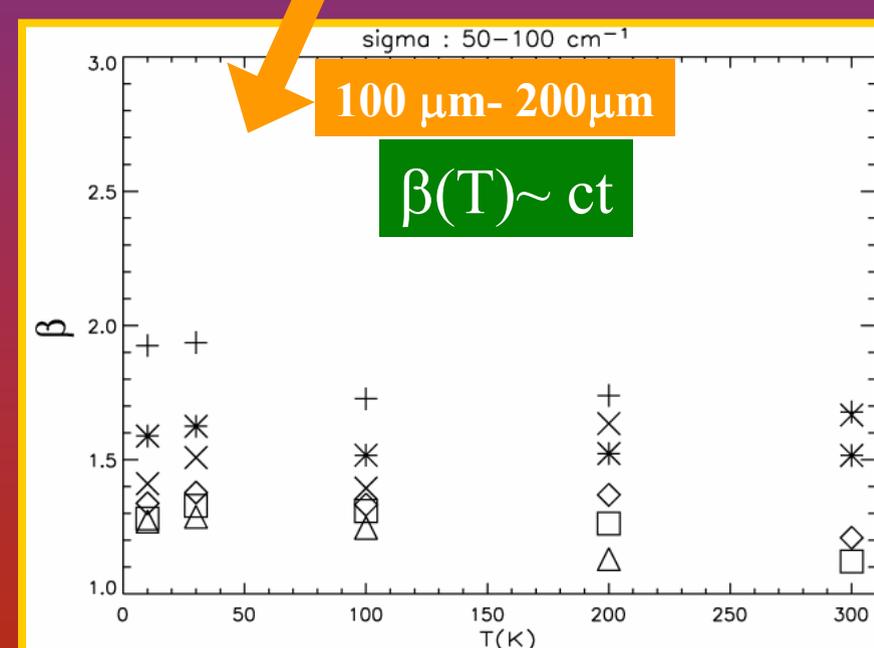
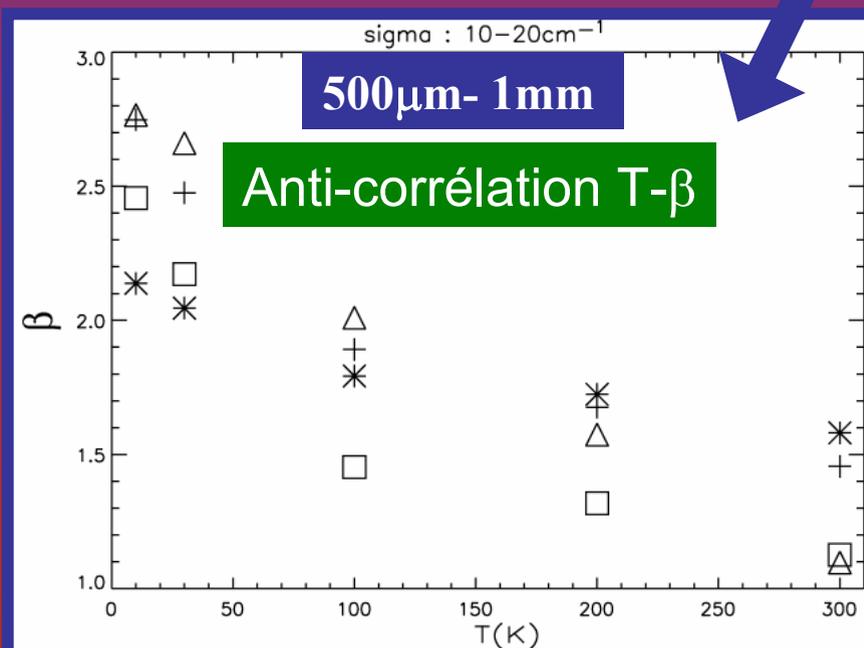


# B. 5. $\beta(T, \nu)$

- $\triangle$  SiO<sub>2</sub> 1.5  $\mu\text{m}$
- $\square$  SiO<sub>2</sub> « fumed »
- $+$  MgSiO<sub>3</sub> sol-gel
- $\star$  MgSiO<sub>3</sub> glass



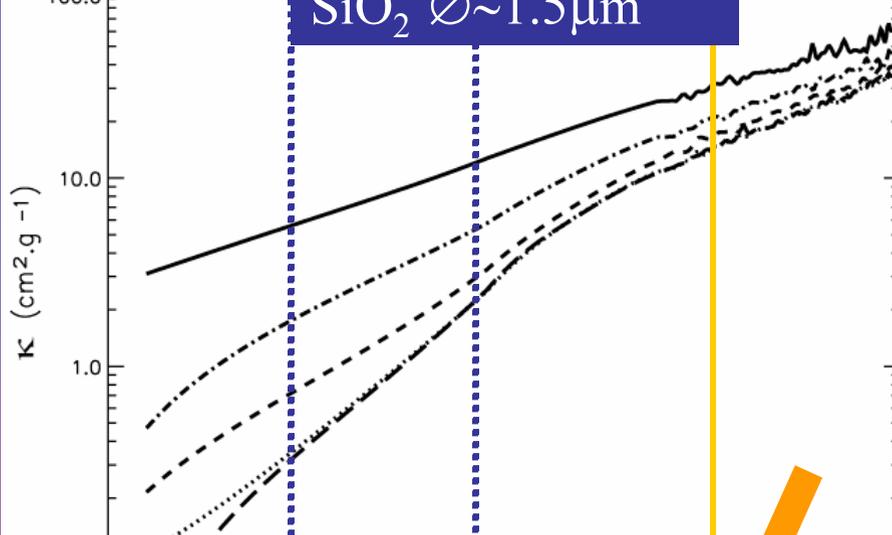
Cassure dans la loi d'absorption 2 dépend. fréquentielles distinctes



L'existence de deux domaines fréquentielles n'avait jamais été mise en évidence

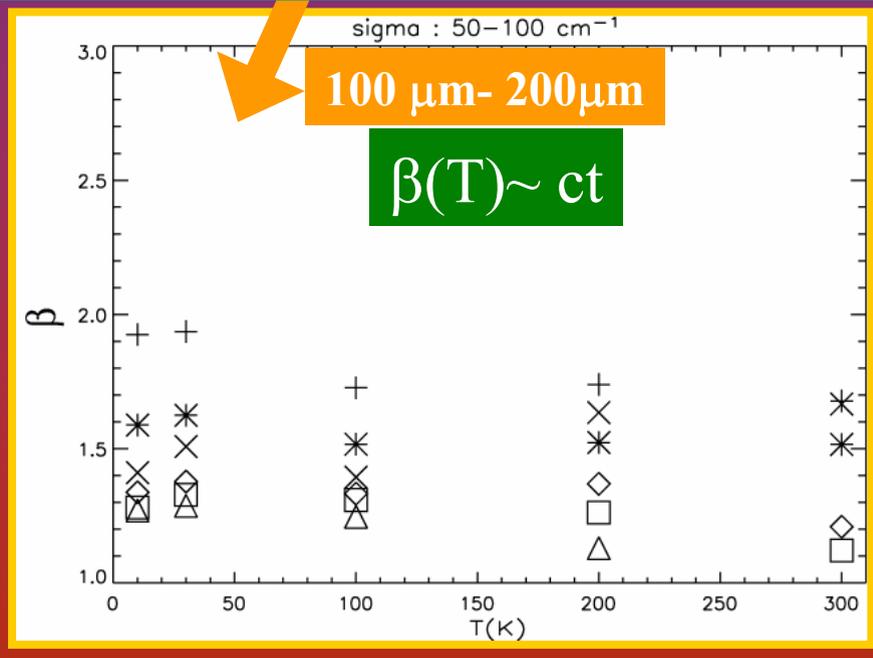
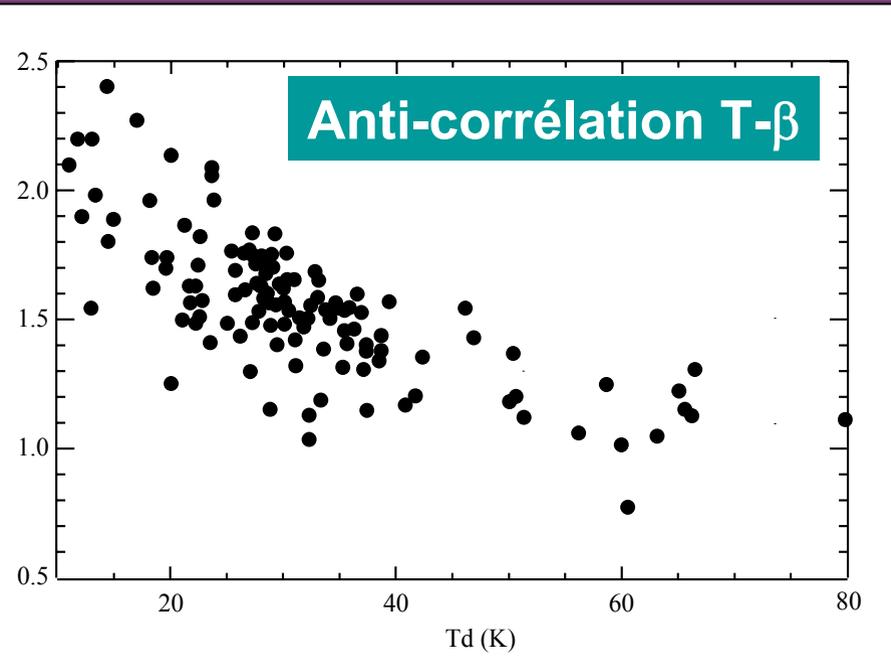
# B. 5. $\beta(T, \nu)$

- $\triangle$  SiO<sub>2</sub> 1.5  $\mu\text{m}$
- $\square$  SiO<sub>2</sub> « fumed »
- $+$  MgSiO<sub>3</sub> sol-gel
- $\star$  MgSiO<sub>3</sub> glass



Cassure dans la loi d'absorption 2 dépend. fréquentielles distinctes

L'anti-corrélation présente dans les données de laboratoire a la même allure que celle observée par PRONAOS



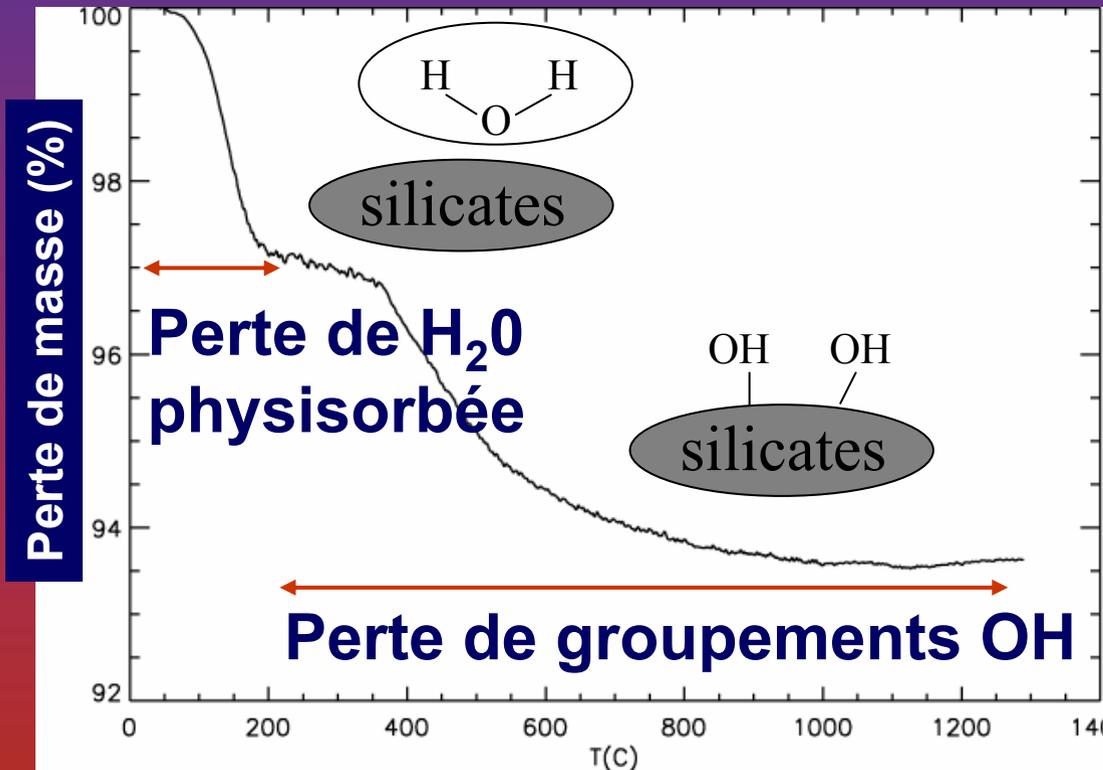
# 3. 6. Silicates : H<sub>2</sub>O et groupements OH

- **Eau physisorbée** : molécule d'eau liée à la surface d'un matériau par des forces de type électrostatique (Van der Waals ..)
- **Groupements Si-OH** : liaisons chimiques entre Si et OH

Analyse  
thermo-gravimétrique :  
MgSiO<sub>3</sub> sol-gel  
&  
MgSiO<sub>3</sub> glass  
contenu en eau physisorbée  
TRES différent  
MAIS comportements  
similaires dans le domaine  
submm.



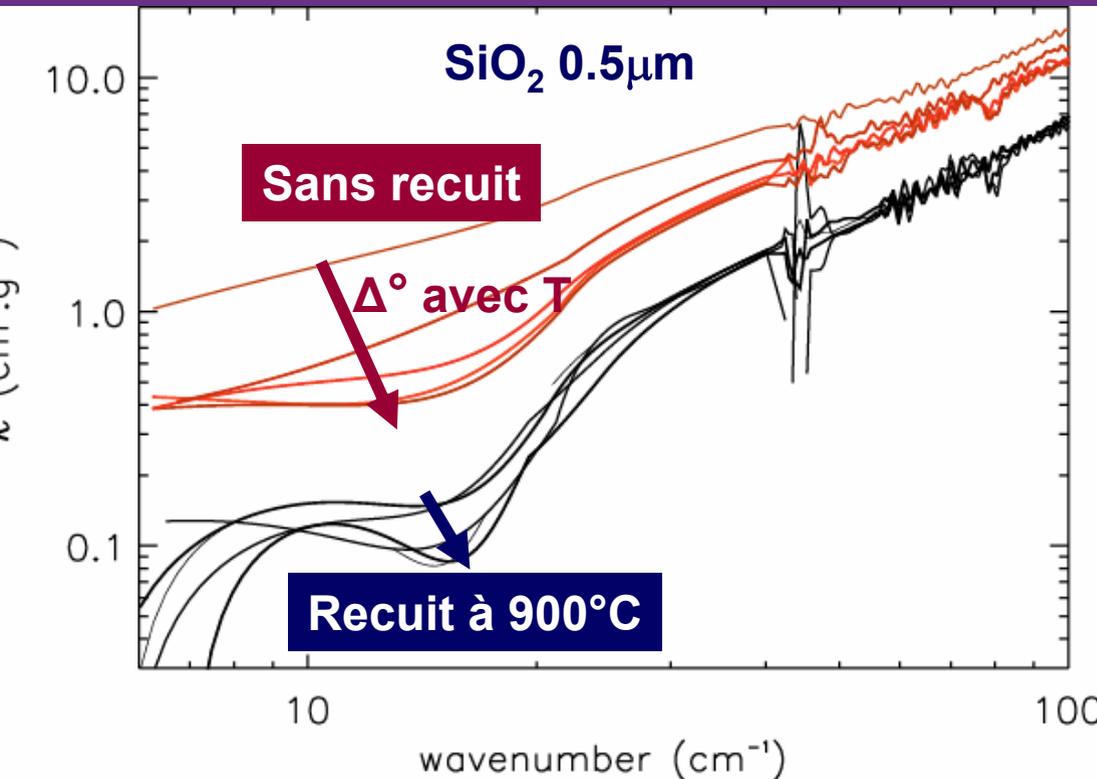
L'eau physisorbée n'EST  
PAS à l'origine  
du phénomène observé



SiO<sub>2</sub> (Ø ~ 1.5 μm)

# 3. 7. Origine de la dépendance en température : Les groupements OH ?

L'influence de OH est très importante sur les propriétés d'abs. des matériaux silicatés : la présence de OH dans les silices amorphes produit une absorption FIR dépendante de T



Traitement thermique à 900°C pdt 24h des billes  $\text{SiO}_2$   $0.5\mu\text{m}$  supprime la dépendance en T de l'absorption. Ce traitement conduit à l'élimination des groupements OH.

Etude IR bande  
Caractéristique de OH

⇒ La présence de groupements OH pourrait être une caractéristique commune à tous les échantillons présentant une forte dépendance en T

## 3. 8. Groupements OH et défauts structurels

OH peut être vu comme un défaut du matériau : la structure désordonnée de  $\text{SiO}_2$  = désordre de la structure + teneur en OH

Peu de groupements OH dans  $\text{MgSiO}_3$  glass mais quantité d'ions  $\text{Mg}^{2+}$  importante

$\text{Mg}^{2+}$  peut-être considéré comme un défaut structurel qui modifie le réseau et qui agit de la même manière que les groupements OH

⇒ **comportement observé pourrait être la conséquence de la présence de défauts**

**Influence des groupements OH :**  
**Comportement modélisable par modèle TL S**

# 3. 9. Conclusions

- **Comportement global** indpt de :
  - **Morphologie** : nanoparticules reliés en chaînons  $\mu\text{m}$  /  
Particules sphériques ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) /  
Grains microniques non sphériques
  - **Composition** :  $\text{MgSiO}_3$  and  $\text{SiO}_2$
  - **Processus de synthèse**: sol gel – fusion à hautes T

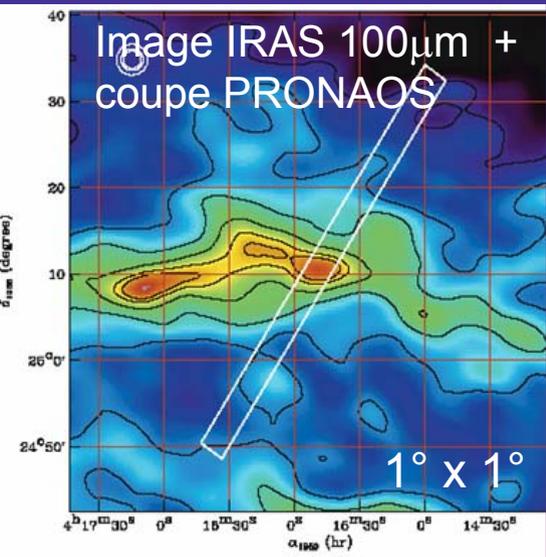
- Forte dépendance en T et en  $\nu$  de l'absorption:
  - Suivant le domaine de  $\nu$ , on peut définir **deux**  $\beta \neq$
  - Forte **anticorrélation T-  $\beta$**  pour  $\lambda=[500\mu\text{m}, 1\text{mm}]$   
similaire à celle observée par PRONAOS

- Comportement explicable par la **présence de défauts (OH,  $\text{Mg}^{2+}$ )** dans la structure

# Plan de présentation

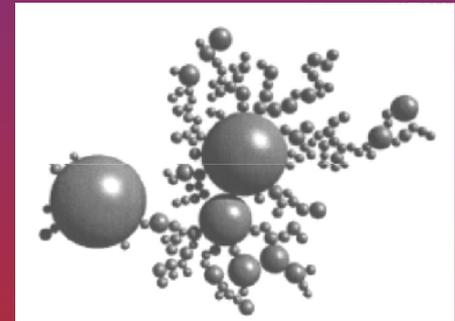
1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

# 4. 1. Gaz et grains dans une condensation froide d'un filament du Taureau : L1506



- région de formation d'étoiles les + proches :  
d ~ 140 pc
- Excellente région pour étudier propriétés grains + gaz à l'interface MIS dense / MIS diffus
- Filament observé par PRONAOS :  
centre :  $\beta=1.9$ , T=12K, émissivité submm x3.4

Modèle de grains associé (Stepnik et al.2003) :  
Apparition d'agrégats VSGs/BGs pour  $A_v \sim 2$

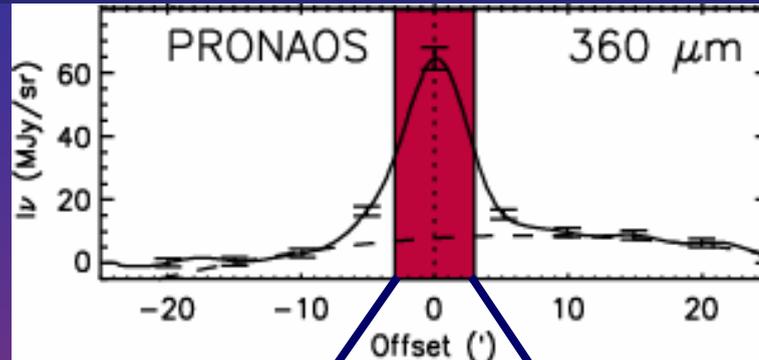


**Problématique : Relations entre modifications propriétés des grains et conditions physico-chimiques du gaz (manteaux de glace  $\rightarrow$  collage grains optimum ?)**

Transition MIS diffus  $\rightarrow$  MIS dense

# 4. 2. Observations moléculaires : $C^{18}O$ & $N_2H^+$

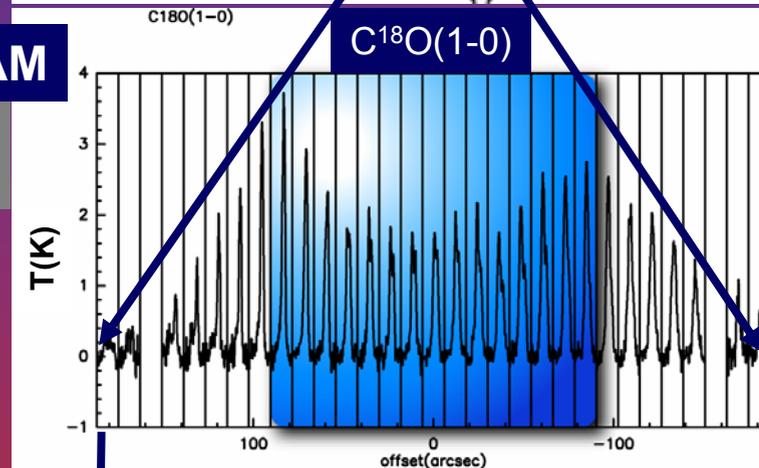
Observations  
IRAM & Kitt Peak



Traceurs  
environnements froids &  
denses :  
 $C^{18}O(1-0)$ ,  $C^{18}O(2-1)$   
 $C^{17}O(1-0)$ ,  $N_2H^+(1-0)$

IRAM

$\theta=23''$  à 110GHz  
 $\Delta\nu=10\text{kHz}$

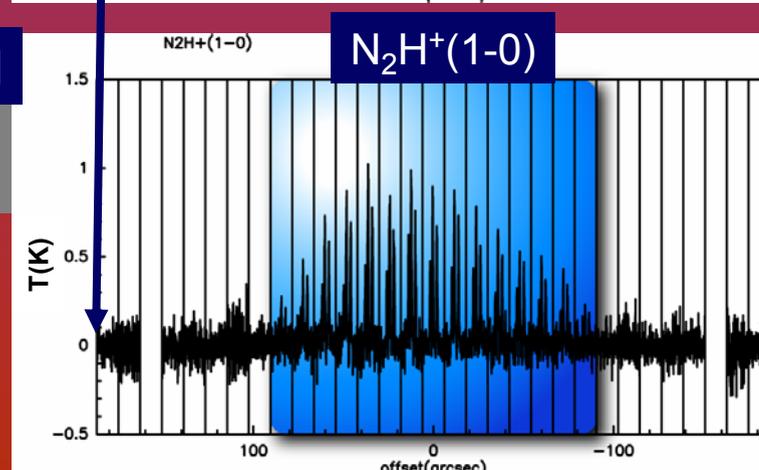


Phénomène de  
déplétion : Collage de  
 $C^{18}O$  à la surface des  
grains

$\Delta\nu=6.5-8\text{km/s}$

IRAM

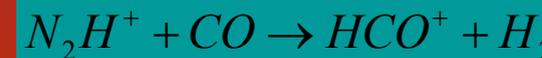
$\theta=27''$  à 93 GHz  
 $\Delta\nu=10\text{kHz}$



Apparition de  $N_2H^+$   
reliée à la disparition  
de CO

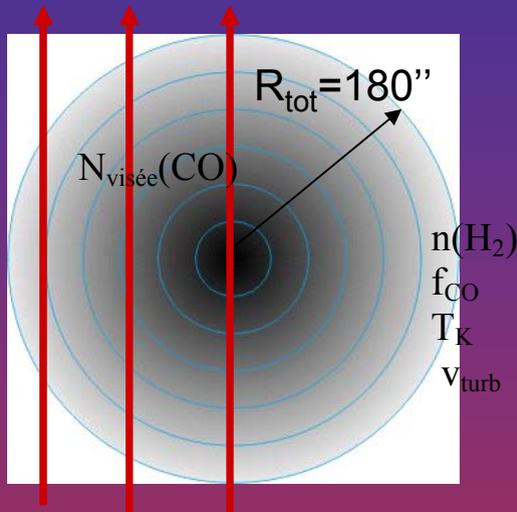
$N_2H^+$  : bon traceur des  
régions denses

$\Delta\nu=5-10\text{ km/s}$



# 4. 3. Modélisation de la déplétion de C<sup>18</sup>O

Modélisation Monte-Carlo de l'aire intégrée des raies C<sup>18</sup>O(1-0) et (2-1) le long de la coupe PRONAOS



Modèle sym. sphérique à 1D

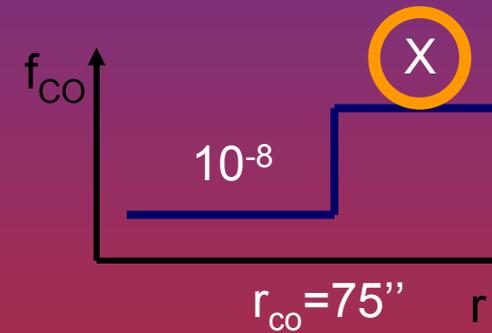
$T_K = 10\text{K}$ ,  $V_{\text{turb}} = 0.1\text{km/s}$

Paramètres libres :

- Abondance fractionnelle  $f = N(\text{C}^{18}\text{O})/N(\text{H}_2)$
- Densité du milieu

Abondance fractionnelle :

$$f_{\text{can}}(\text{C}^{18}\text{O}) = 1.7 \cdot 10^{-7}$$

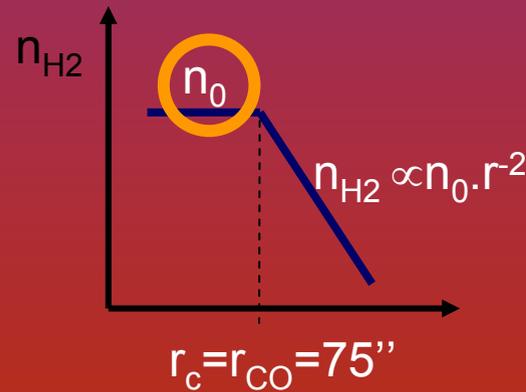


Loi de densité :

Absence de contraintes sur la densité centrale



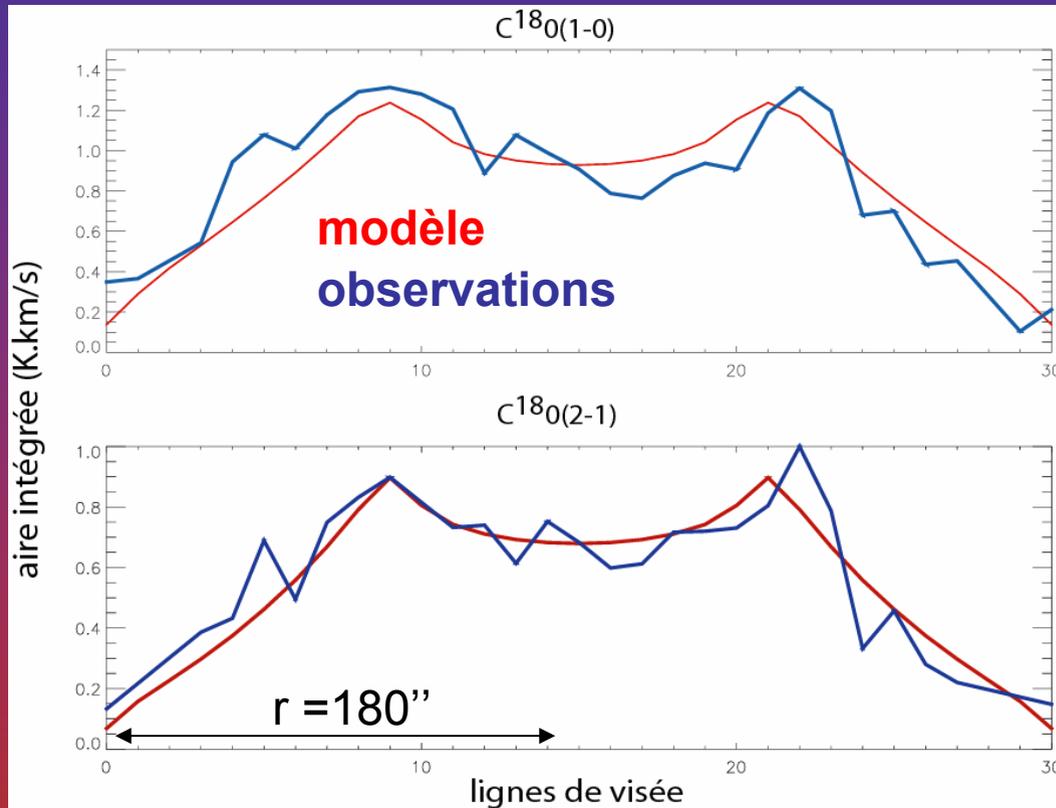
loi de densité « classique »



Paramètres libres de la modélisation :  $\chi$  et  $n$

# 4. 4. Résultats de la modélisation de l'émission de $C^{18}O$

Procédure de minimisation par moindres carrés



Conditions physiques locales d'apparition de la déplétion :

$$n_0(H_2) \approx 1.8 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$
$$V_{\text{turb}} = 0.1 \text{ km/s}$$

$X = f_{CO} \approx 3.2 \cdot 10^{-7}$   
Déplétion d'un facteur 30 entre couches internes et externes

**Phénomène de déplétion/ apparition glace de CO pour  $A_v \sim 6$**

Apparition des agrégats  $A_v \sim 2$



**Apparition des agrégats non reliée à la présence de glace de CO**  
→ manteaux de  $H_2O$  ?

# 4. 5. Conclusions

**Forte déplétion de C<sup>18</sup>O** dans les parties internes du filament  
apparition de la déplétion pour  $n(\text{H}_2) \sim 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$  et  $A_V \sim 6$   
rayon de déplétion de 75 "

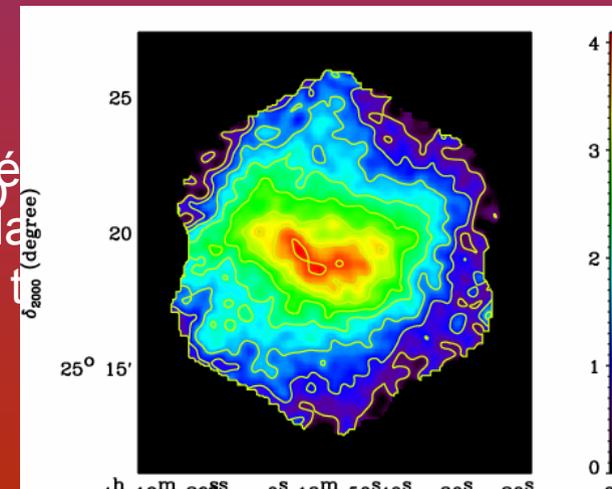
**Corrélation gaz-grains** : formation d'agrégats à  $A_V \sim 2$   
⇒ Non reliée à la formation de manteaux de glace de CO  
favorisée par manteaux de glace de H<sub>2</sub>O ?

## Cinématique du nuage :

Mise en évidence d'un mouvement de rotation associé à un mouvement de contraction  
des couches périphériques

*Boudet et al. , A&A, en préparation*

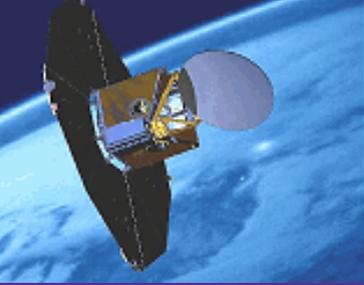
- Grains : Meilleure résolution spatiale : MAMBO + é
- Grains : Meilleure résolution spatiale : MAMBO + é
- Etude d'autres traceurs moléculaires
- Etude de la cinématique du nuage (traceurs t



# Plan de présentation

1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basse température et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

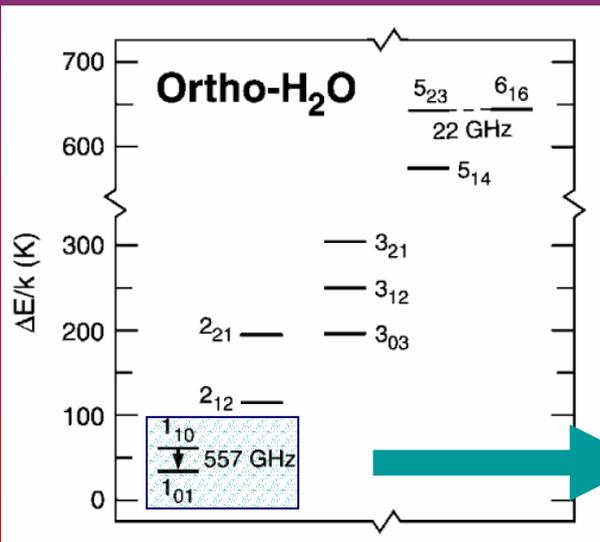
# 5.1. Le satellite ODIN



**Objectifs scientifiques : Aéronomie/Astronomie**

- Comètes/ Atm. planétaires
- Physico-chimie des régions de formation stellaires

**Espèces clés étudiées liées au processus de refroidissement des cœurs pré-stellaires :  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $Cl$  et  $NH_3$**   
⇒ *transitions fondamentales*



**Étude de la raie  $o-H_2O$ , AOS**

➤ Ø Télescope = 1.1m

➤ Récepteurs :

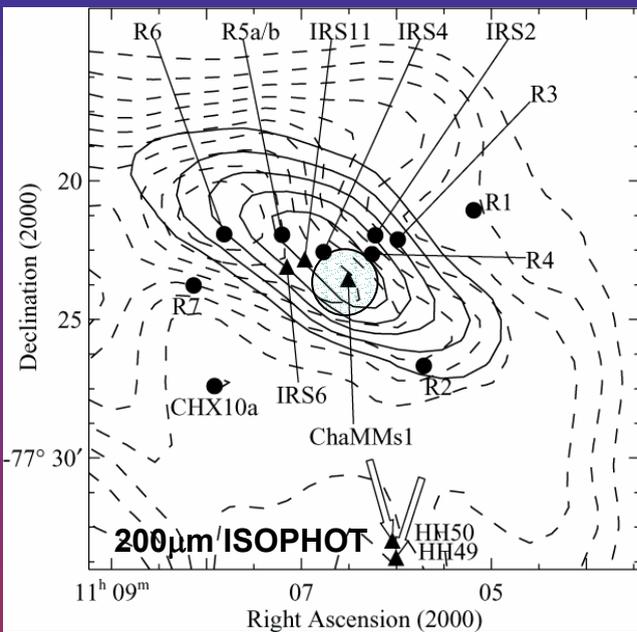
4 Submm 486-581GHz  
+ 118.75GHz ( $O_2$ )

➤ 3 spectromètres :

- acousto-optique (AOS)
- 2 autocorrélateurs

$\Delta v \sim 0.08 - 1 \text{ km/s}$

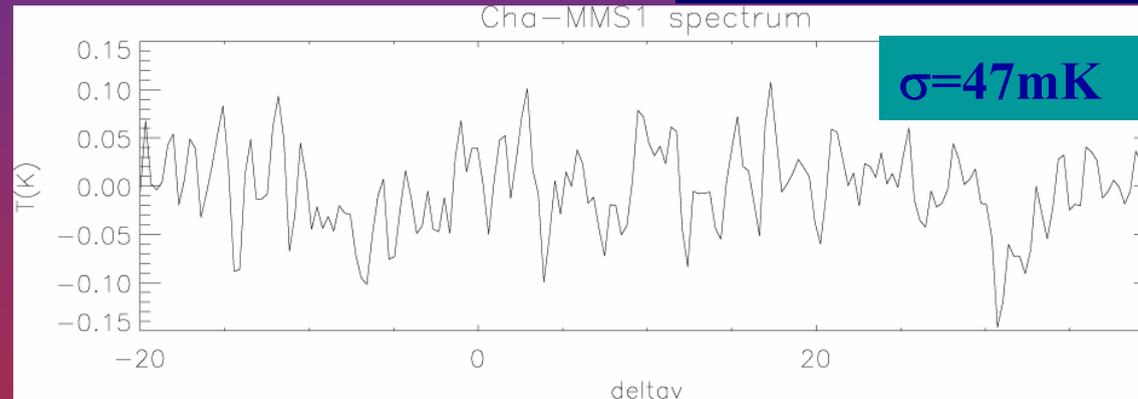
# 5.2. Emission o-H<sub>2</sub>O (1<sub>10</sub>→1<sub>01</sub>) de la source Cha-MMS1



*Boudet et al., en prép.*

**Cha-MMS1 : nuage dense du complexe du Chamæleon qui contiendrait une proto-étoile de classe 0**

**Nb d'h. d'observation : 9h**



**Limite sup. o-H<sub>2</sub>O (557Ghz) à 5σ :**

$$X(\text{o-H}_2\text{O}) / X(\text{H}_2) \leq [2.7 \cdot 10^{-8} - 5.5 \cdot 10^{-8}]$$

**Phénomène de désorption non efficace ?**

**Poursuite de l'analyse de cœurs froids et denses avec TMC1, MBM7, ρ-OphB1 ..**

**→ limite supérieure à la détection de l'eau sur des objets denses vus par ODIN**

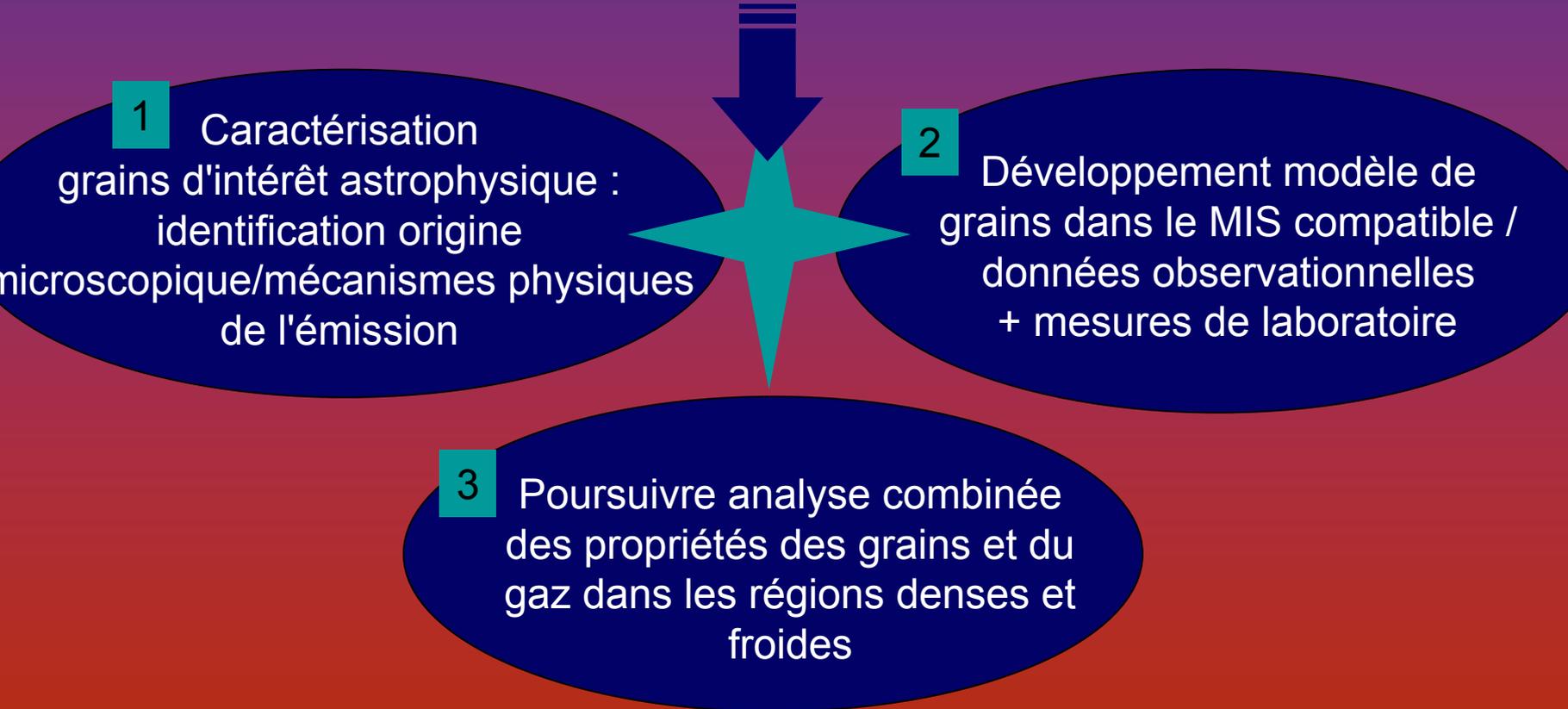
# Plan de présentation

1. Contexte de recherche
2. Étude théorique de l'émission de grains amorphes
3. Étude en laboratoire de l'absorption des grains silicatés à basses températures et dans le domaine submillimétrique
4. Gaz et grains dans une condensation froide du Taureau
5. Etude de l'eau, molécule clé du refroidissement des régions pré-stellaires, par son émission dans le submillimétrique, grâce au satellite ODIN
6. Conclusions et perspectives

# 6. 1. Conclusions & Perspectives

Modèle TLS + mesures labo. → forte  $\Delta^\circ$  propr. émission des grains avec T et v  
⇒ **Besoin d'un Nouveau Modèle de grains du MIS**

Préparation PLANCK et HERSCHEL : connaissance émission des grains /  
soustraction des avant-plans galactiques & cond. physico-chimiques du gaz



# 6. 2. Perspectives

1

Caractérisation  
grains d'intérêt astrophysique :  
identification origine  
microscopique/mécanismes physiques  
de l'émission

ent du champ des matériaux étudiés :  
de des échantillons silicatés  
matériaux carbonés et de glaces

égation des particules sur leur spectre  
d'absorption

- ❖ Identifier et préciser les défauts ou le type de désordre :
  - Influence du degré d'amorphisation
  - Relation avec modèle TLS +Schlömann

**Futures mesures en laboratoire : Iéna, CESR , IAS**

# 6. 3. Perspectives

2 Développement modèle de grains dans le MIS compatible / données observationnelles + mesures de laboratoire

❖ Approfondissement du modèle TLS-Schlömann : DIRBE/PRONAOS/Archeops/MAP & mesures de laboratoire paramètres d'ajustement ...

→ Impact sur la détermination des masses MIS diffus

❖ + agrégation des grains / interaction gaz-grains

❖ modèle TLS, couplé aux observations : informations sur propriétés physiques intrinsèques des poussières

❖ Couplage données SPITZER, HERSCHEL- PLANCK : étude statistique  $T - \beta \Rightarrow$  étape supplémentaire dans l'élaboration d'un nouveau modèle de grains

# 6. 4. Perspectives

3

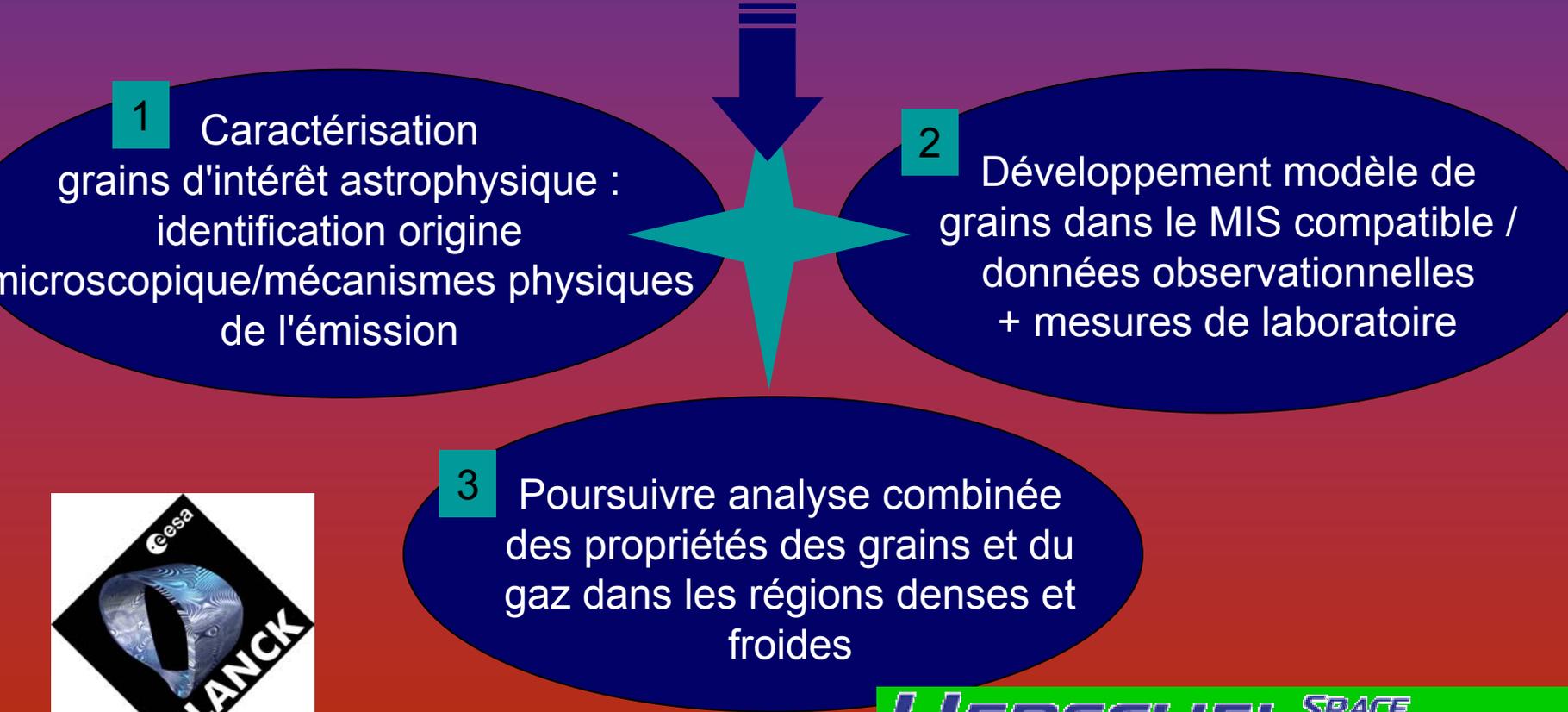
Poursuivre analyse combinée des propriétés des grains et du gaz dans les régions denses et froides

- ❖ Poursuite analyse  $H_2O$  des cœurs froids avec ODIN (TMC-1,  $\rho$  Oph B1, B2, L134N)
- ❖ Processus d'agrégation des grains (SPITZER, MAMBO, SCUBA...)
- ❖ Rôle des molécules  $H_2O$  accrétés sur les grains  
→ groupement OH dans le cadre du modèle TLS ?
- ❖ Etude combinée PLANCK/HERSCHEL de nuages froids

# 6. 5. Conclusions & Perspectives

Modèle TLS + mesures labo. → forte  $\Delta^\circ$  propr. émission des grains avec T et  $v$   
⇒ **Besoin d'un Nouveau Modèle de grains du MIS**

Préparation PLANCK et HERSCHEL : connaissance émission des grains /  
soustraction des avant-plans galactiques & cond. physico-chimiques du gaz

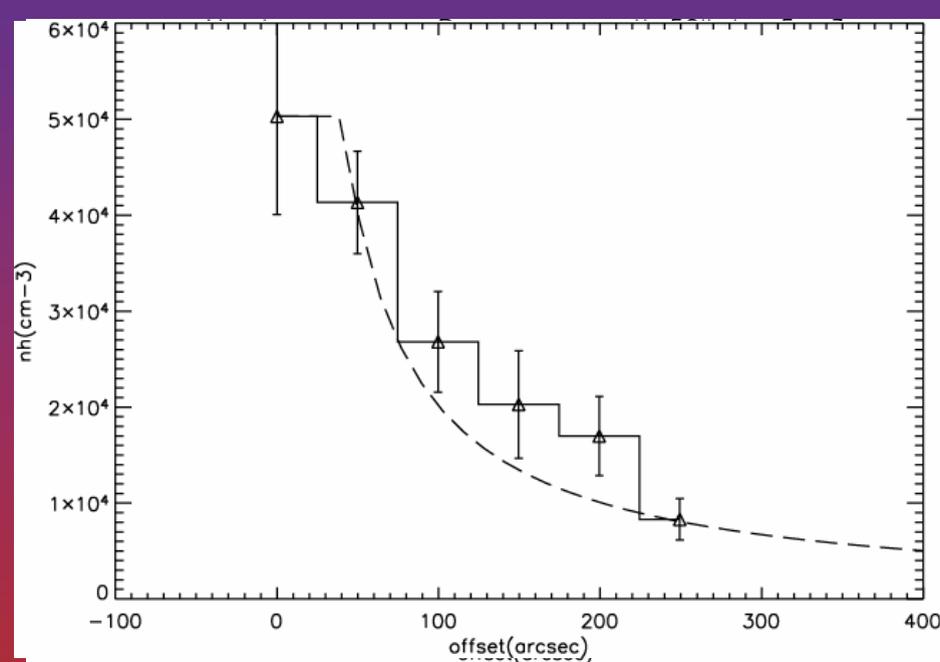
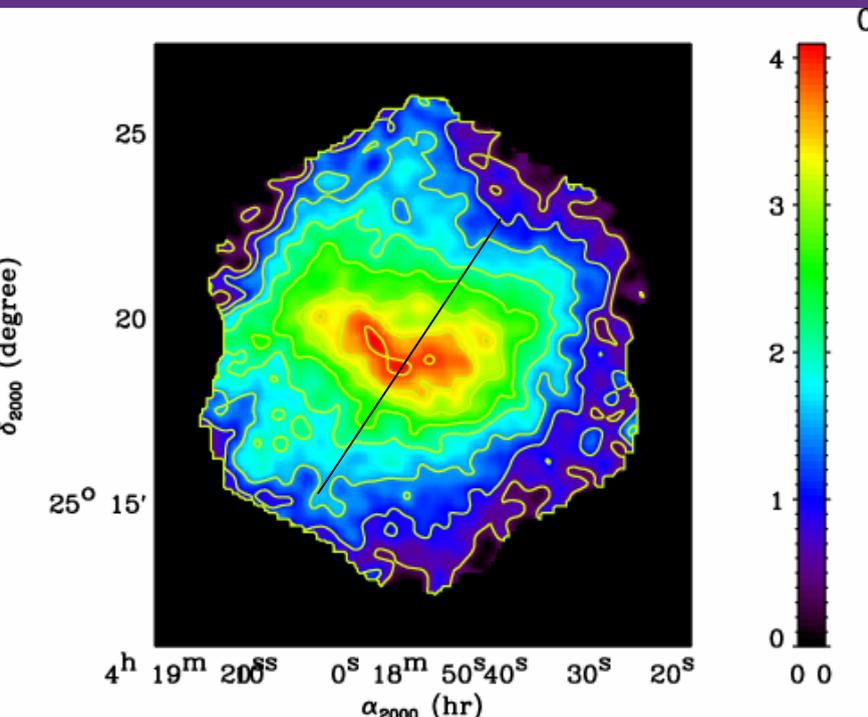


# De nouvelles contraintes sur la densité du milieu

Observations MAMBO (Nov. 2004) de l'émission continuum des poussières à 1.3mm

⇒ Connaissance de la densité du milieu

⇒ seul paramètre libre : abondance fractionnelle

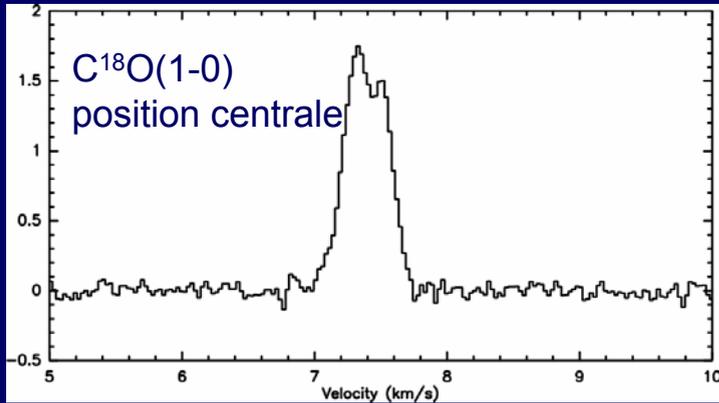


Modèle inversion linéaire

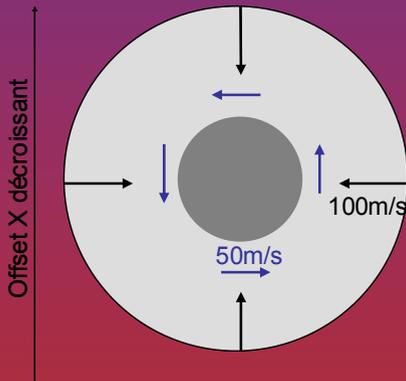
⇒  $r_c = 40''$  et décroissance en  $1/r$ ;  $n_0 = n_{\text{H}_2} = 2.5 \cdot 10^4$

Modélisation Monte-Carlo avec nouvelles contraintes sur la densité :  $X = 2e^{-7}$

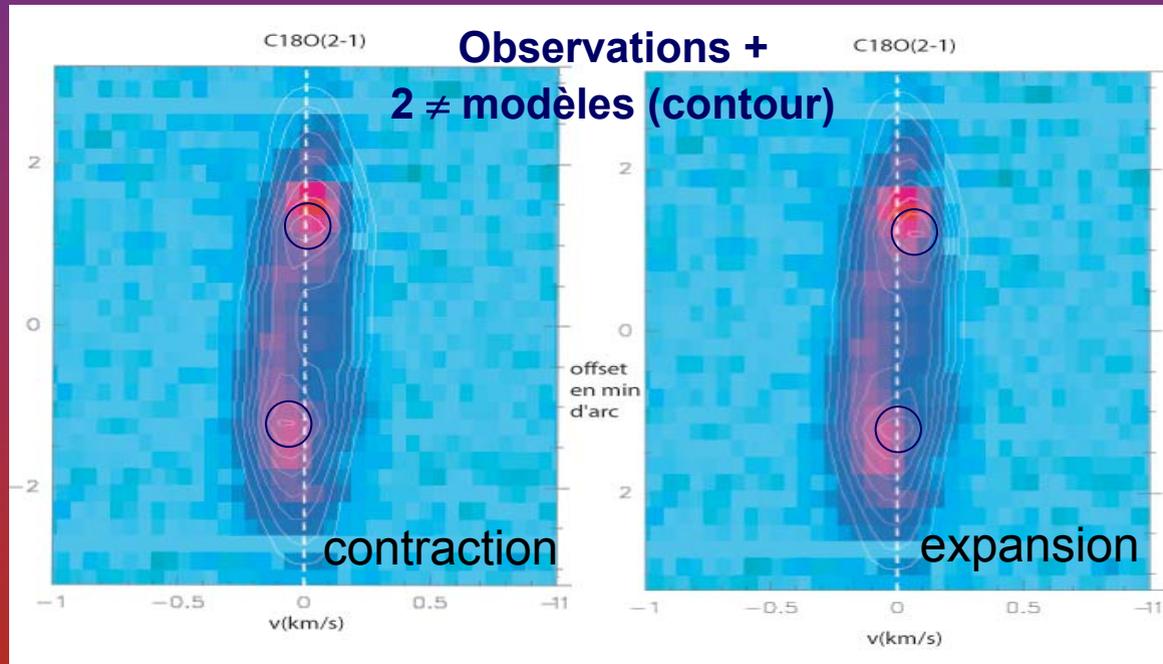
# Structure en vitesse de C<sup>18</sup>O



- Raies dédoublées au centre du filament : **expansion/contraction du nuage ?**
- Décalage des raies  $\Delta v \sim 0.1 \text{ km/s}$  : **rotation du nuage ?**

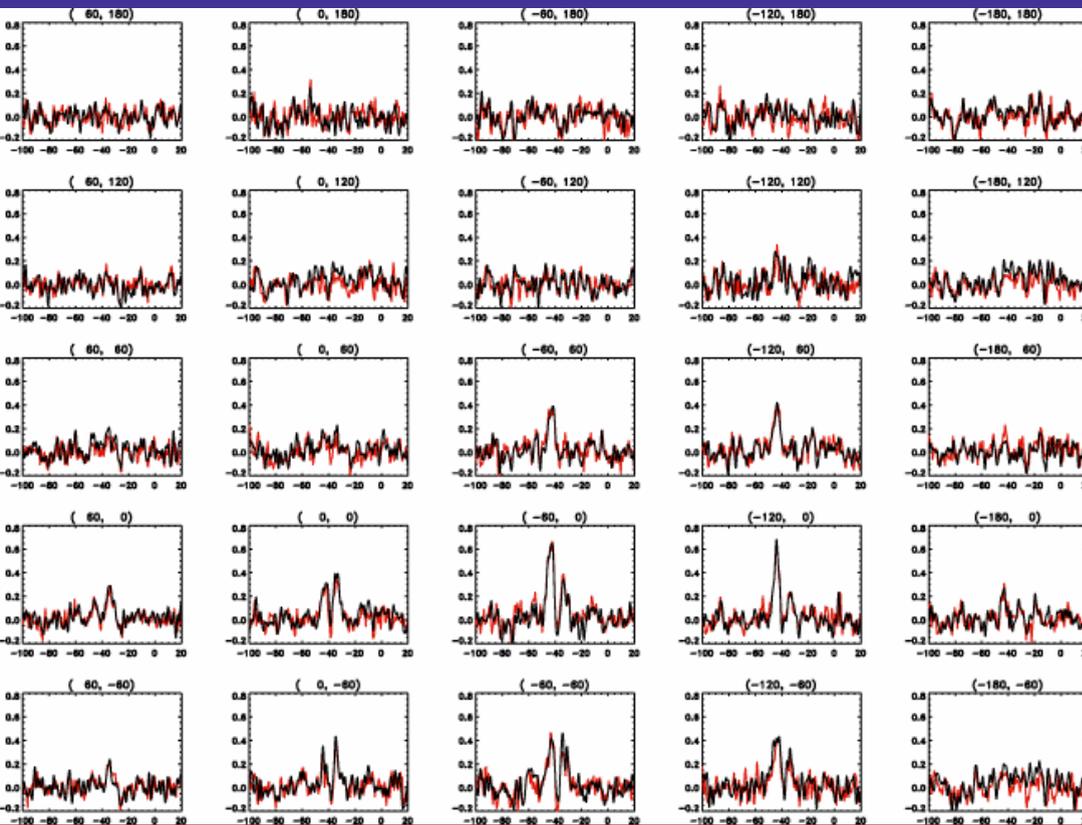


Rotation + mouvement radial  
des couches périphériques



⇒ Bonne coïncidence entre pics de vitesse  
pour nuage en contraction

# Emission o-H<sub>2</sub>O (1<sub>10</sub>→1<sub>01</sub>) de la source W3



W3 : région de formation  
d'étoiles

Serveur CNES ODIN

Chaîne de traitement des  
données AOS  
de niveau 0

Carte 5'×5'

*Wilson, Mason ... Boudet & al., A&A, 2003*

— Traitement données CCSR — Traitement données C. Wilson

Validation programmes informatiques de traitement des données

⇒ Utilisation pour l'analyse d'un cœur dense : Cha-MMS1

# Propriétés d'absorption et d'émission des grains

Loi de Kirchoff :  $e = Q_{\text{abs}}$

Propriétés d'absorption équivalentes aux propriétés d'émission des grains

Coeff d'absorption ( $\text{cm}^{-1}$ ) :  $T = \frac{(1 - R^2)e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}}$

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega}{c} \text{Im}\left(\sqrt{\varepsilon(\omega)}\right)$$

Coeff d'absorption massique ( $\text{cm}^2\text{g}^{-1}$ ) :

$$\kappa(\lambda, f) = \frac{\alpha(\lambda, f)}{\rho \cdot f}$$

Dans le submm :

$$\kappa_{\omega} = \frac{3}{4} \frac{1}{\rho} \frac{Q_{\text{abs}}}{a}$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{abs}}(\lambda_0) \cdot (\lambda / \lambda_0)^{-\beta}$$

Théorie de Mie :  $Q_{\text{abs}} \propto \omega \varepsilon'' / (\varepsilon')^2$ ,  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$

$\alpha$  prop.  $\omega \varepsilon'' / (\varepsilon')^{1/2}$ ,  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$

$\alpha$  propr. à  $Q_{\text{abs}}$  pour  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$  et  $\varepsilon' \sim \text{const.}$

$\kappa$ ,  $\alpha$  et  $Q_{\text{abs}}$  ont la même dépendance fréquentielle  $\beta$

# Processus de relaxation

Modulation de l'écart énergétique  $E(t)$  entre niveaux (d'pd de  $\mu$  moment dipolaire) avec un décalage de phase qui provoque une dissipation d'énergie

$$E(t) = \sqrt{(\Delta + \mu E_0 \cdot \cos \omega t)^2 + \Delta_0^2}$$

Redistribution des populations entre les niveaux énergie quand le système quitte l'état d'équilibre et lorsque  $E$  change.

Cette redistribution se fait avec un temps caractéristique  $\tau$  qui dépend de l'environnement

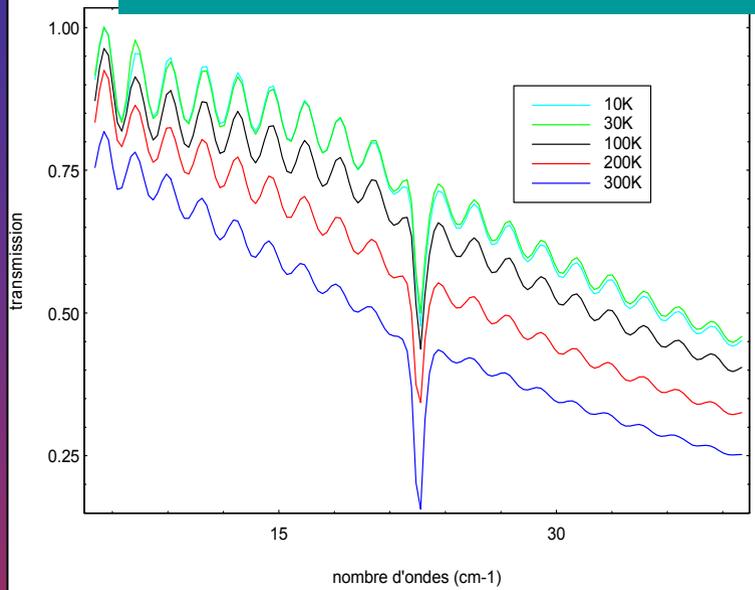
$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n - n_0(t)}{\tau(t)}$$

$$n_0(t) = [1 + \exp(2 \cdot E(t) / kT)]^{-1}$$

Provoque un chgt dans le moment dipolaire moyen qui est relié à la susceptibilité complexe. La partie imaginaire de la susceptibilité provoquera l'absorption de la lumière

# Transmission des échantillons

SiO<sub>2</sub> fumed avant correction



MgSiO<sub>3</sub> sol-gel

SiO<sub>2</sub> fumed avec correction

