

**La comète Hale-Bopp à l'interféromètre du
Plateau de Bure : étude de la distribution du
monoxyde de carbone**

Florence HENRY

Thèse préparée sous la direction de Dominique Bockelée-Morvan

ARPEGES - LESIA



- ⑥ Les comètes
- ⑥ L'interférométrie millimétrique
- ⑥ Les observations
- ⑥ Le modèle
- ⑥ Analyse des résultats
- ⑥ Conclusions et perspectives

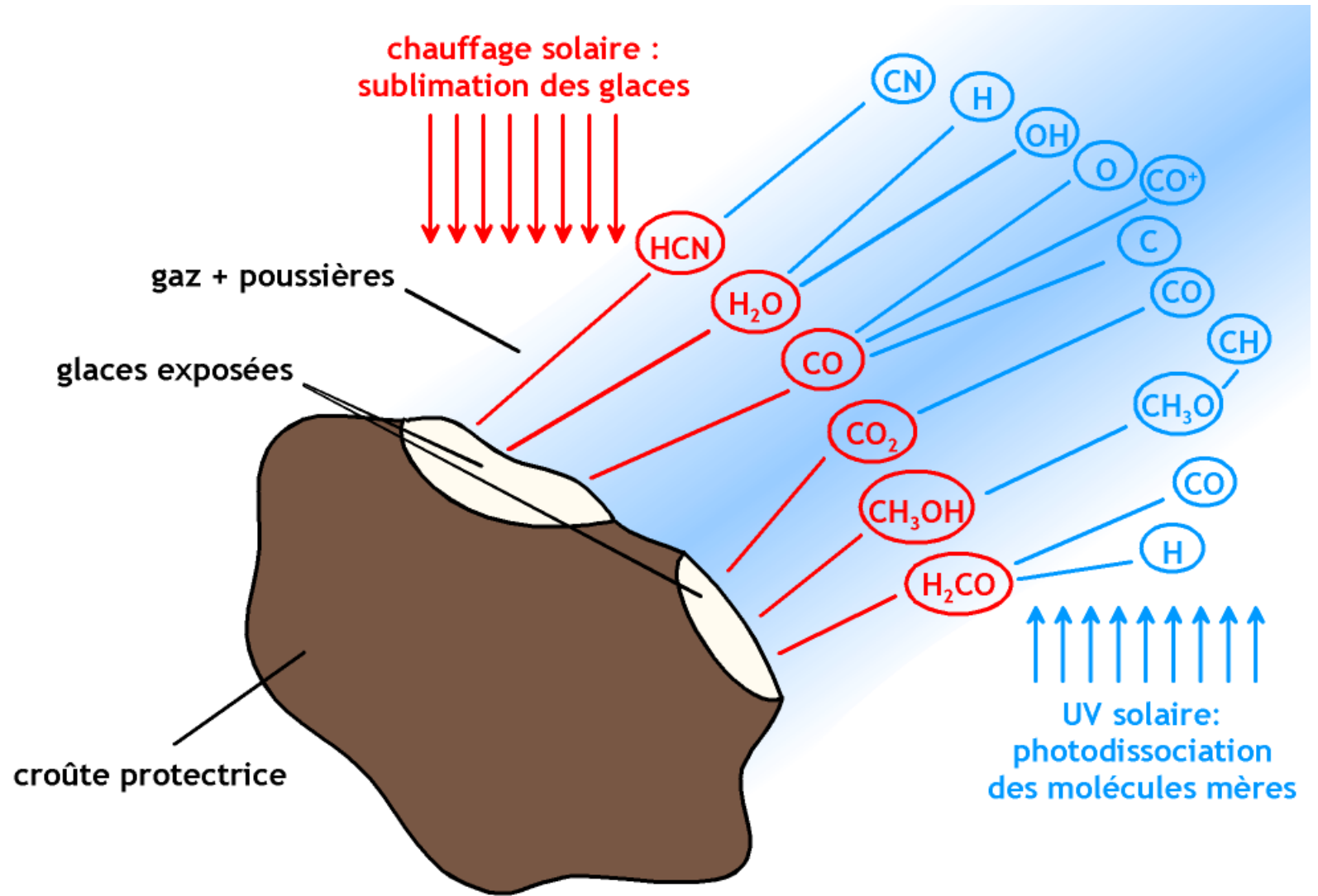
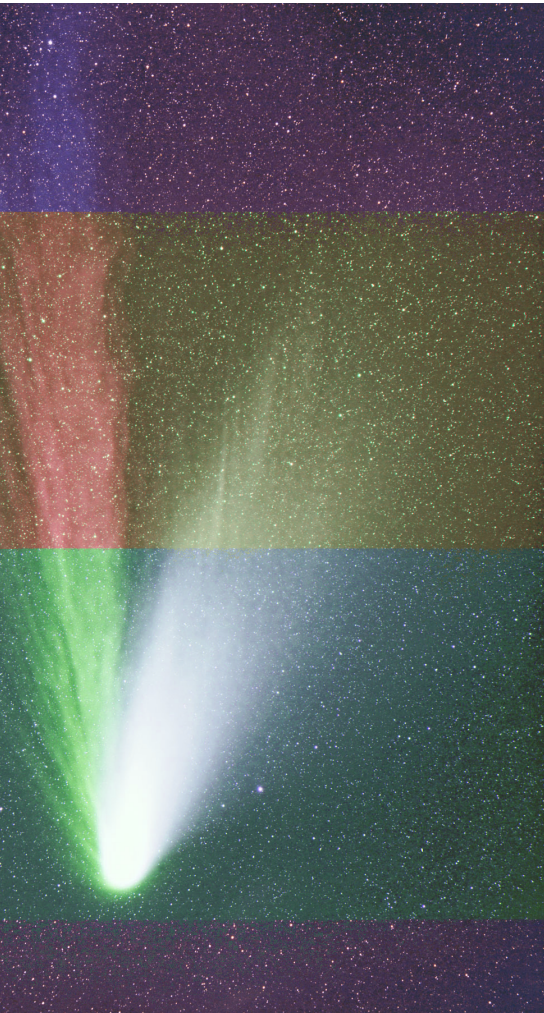




Les comètes



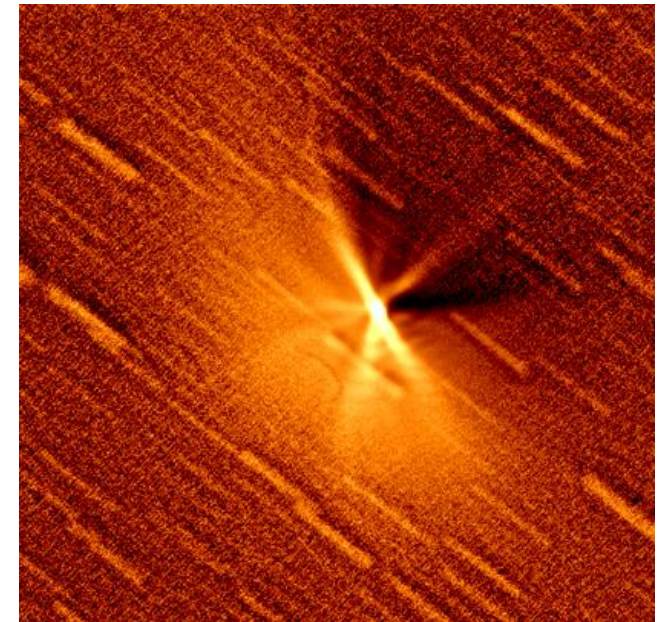
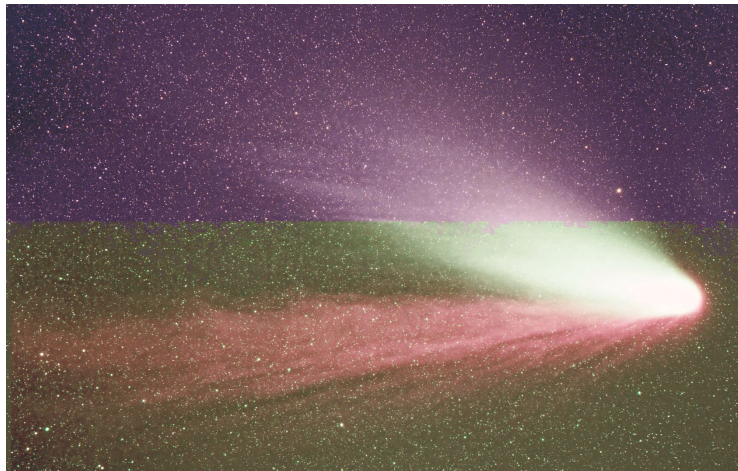
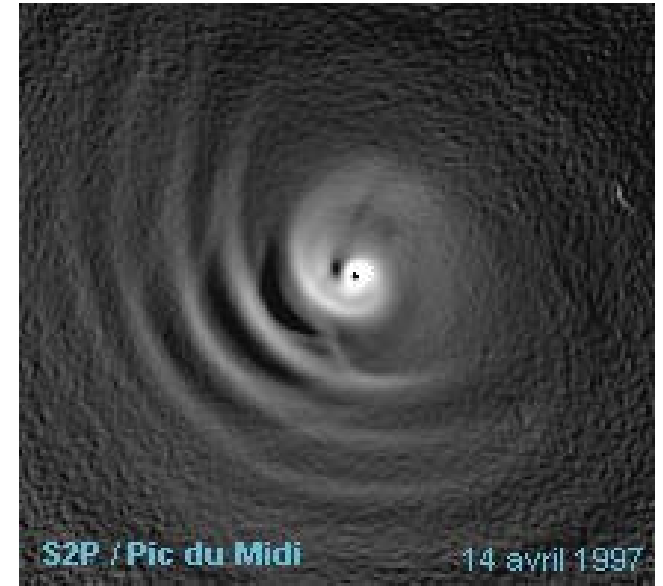
Qu'est-ce qu'une comète ?



La comète C/1995 O1 Hale-Bopp

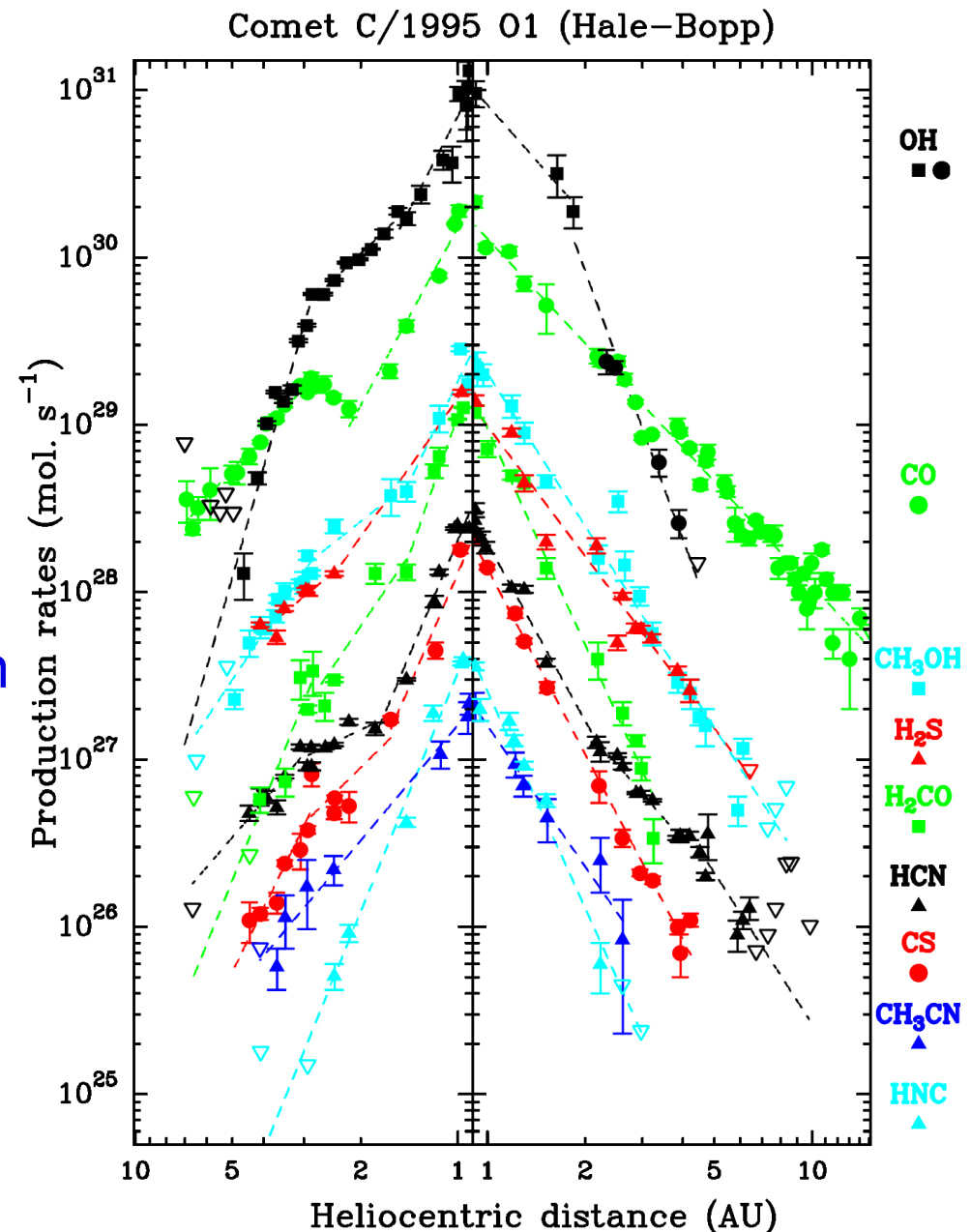


- ⑥ Activité : 10^{31} mol/s, soit ~ 300 tonnes/s
- ⑥ Taille : ~ 40 km de rayon
- ⑥ Composition : H_2O , CO (23%), CO_2 (6%), CH_3OH (2.4%), H_2S (1.5%), H_2CO (1.1%) + autres molécules organiques, soufrées, azotées
- ⑥ Jets : de multiples jets de gaz et de poussières
- ⑥ Rotation : période de 11.35h



La campagne d'observations de la comète Hale-Bopp

- ⑥ Suivi de l'activités des espèces moléculaires : OH, CO, CS, H₂S, H₂CO, HCN, CH₃OH, CH₃CN et HNC (Biver *et al.*, EMP, 2002) → → → →
- ⑥ Recherche de nouvelles molécules cométaires : SO, SO₂, HC₃N, NH₂CHO, HCOOH et HCOOCH₃ (Bockelée-Morvan *et al.*, A&A, 2000)
- ⑥ Observations en interférométrie millimétrique : CO, HCN, H₂CO, CS, CH₃OH, HNCO, HNC, H₂S et SO (Wink *et al.*, EMP, 1999)





L'interférométrie millimétrique



Principe de l'interférométrie millimétrique



- ⑥ Un interféromètre mesure, pour chaque couple d'antennes, le produit de corrélation des signaux reçus par chacune des deux antennes.
- ⑥ Échantillonnage de la Transformée de Fourier (TF) \mathcal{V} de la distribution de brillance \mathcal{B} sur la plan du ciel : **les visibilités**.

$$\mathcal{V} = \text{TF}(\mathcal{B}) \quad (1)$$

- ⑥ Effectuer la TF inverse pour obtenir la carte de la distribution de brillance.

$$\mathcal{B} = \text{TF}^{-1}(\mathcal{V}) \quad (2)$$



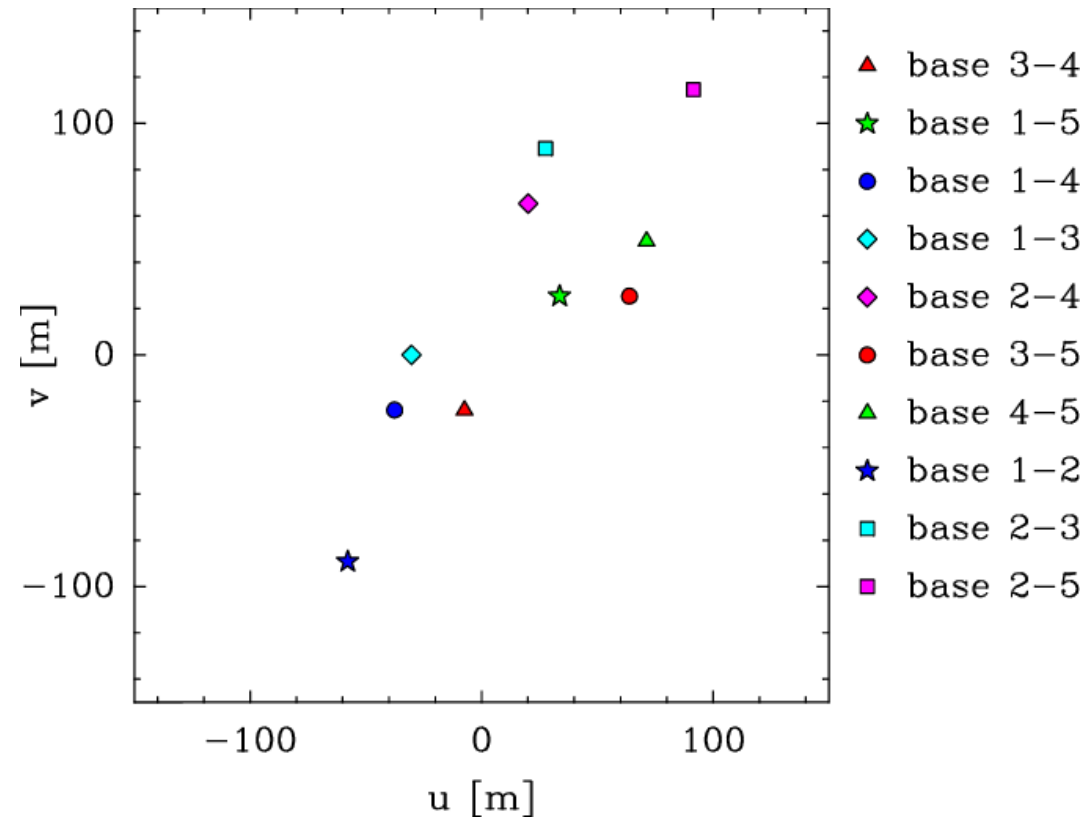


- ⑥ chaque couple d'antenne permet de mesurer 1 visibilité de coordonnées (u, v) par séquence d'observation.
- ⑥ n antennes $\Rightarrow \frac{n}{2}(n - 1)$ points mesurés par séquence.
- ⑥ la rotation de la Terre augmente la couverture du plan de Fourier.
- ⑥ propriété de symétrie de la TF.



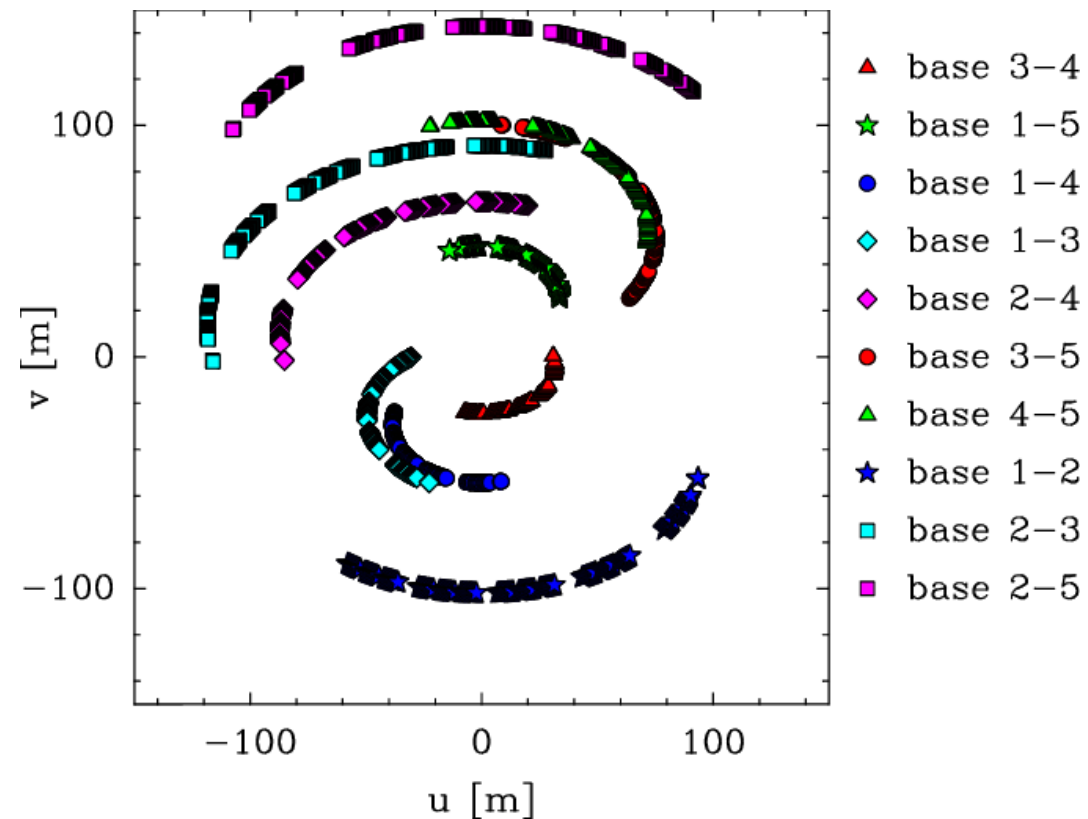
Échantillonnage du plan de Fourier

- ⑥ chaque couple d'antenne permet de mesurer 1 visibilité de coordonnées (u, v) par séquence d'observation.
- ⑥ n antennes $\Rightarrow \frac{n}{2}(n - 1)$ points mesurés par séquence.
- ⑥ la rotation de la Terre augmente la couverture du plan de Fourier.
- ⑥ propriété de symétrie de la TF.



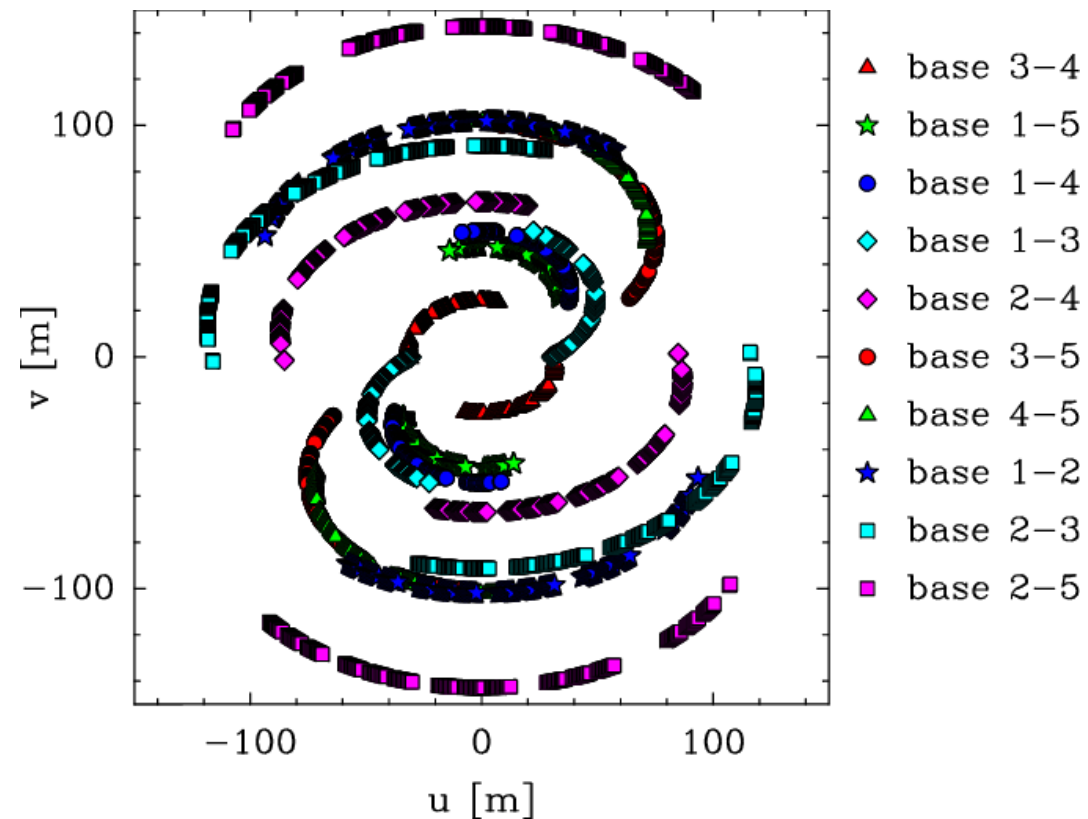
Échantillonnage du plan de Fourier

- ⑥ chaque couple d'antenne permet de mesurer 1 visibilité de coordonnées (u, v) par séquence d'observation.
- ⑥ n antennes $\Rightarrow \frac{n}{2}(n - 1)$ points mesurés par séquence.
- ⑥ la rotation de la Terre augmente la couverture du plan de Fourier.
- ⑥ propriété de symétrie de la TF.



Échantillonnage du plan de Fourier

- ⑥ chaque couple d'antenne permet de mesurer 1 visibilité de coordonnées (u, v) par séquence d'observation.
- ⑥ n antennes $\Rightarrow \frac{n}{2}(n - 1)$ points mesurés par séquence.
- ⑥ la rotation de la Terre augmente la couverture du plan de Fourier.
- ⑥ propriété de symétrie de la TF.



L'échantillonnage des visibilitées est discret donc :

1. il faut interpoler les visibilitées pour estimer les valeurs manquantes
2. la brillance ne s'obtient pas directement par TF^{-1} des visibilitées :

$$\mathcal{B}^D = \text{TF}^{-1} (\mathcal{V} \cdot S) \quad (3)$$

$$= \underbrace{\text{TF}^{-1} (\mathcal{V})}_{\mathcal{B}} \otimes \underbrace{\text{TF}^{-1} (S)}_{\text{lobe sale}} \quad (4)$$

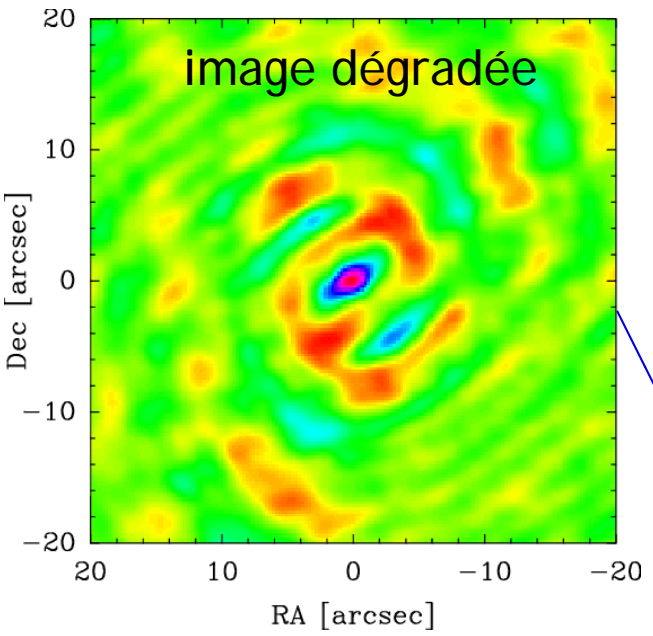
\mathcal{B}^D est l'image dégradée de la distribution de brillance et S est la fonction d'échantillonnage des visibilitées.

Problème : la déconvolution par $\text{TF}^{-1}(S)$ est une étape délicate qui peut introduire des artefacts.

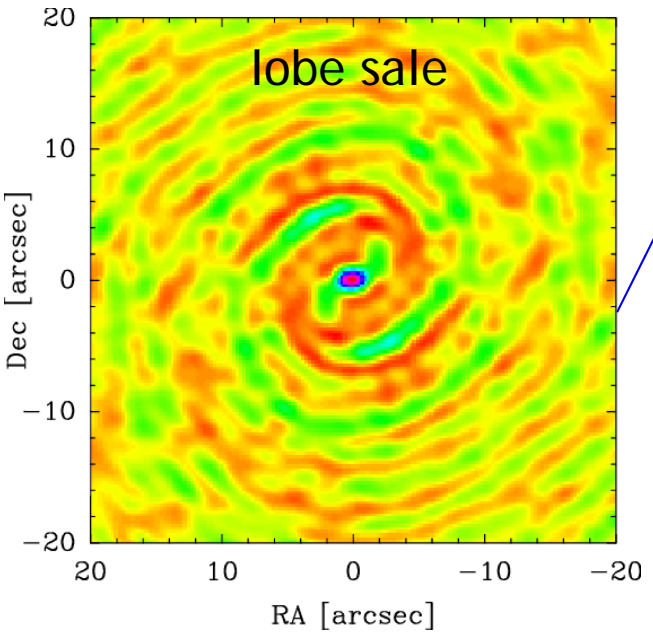




$$\nu \cdot S \xrightarrow{TF^{-1}}$$

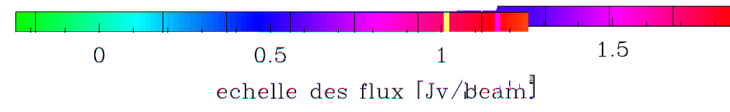
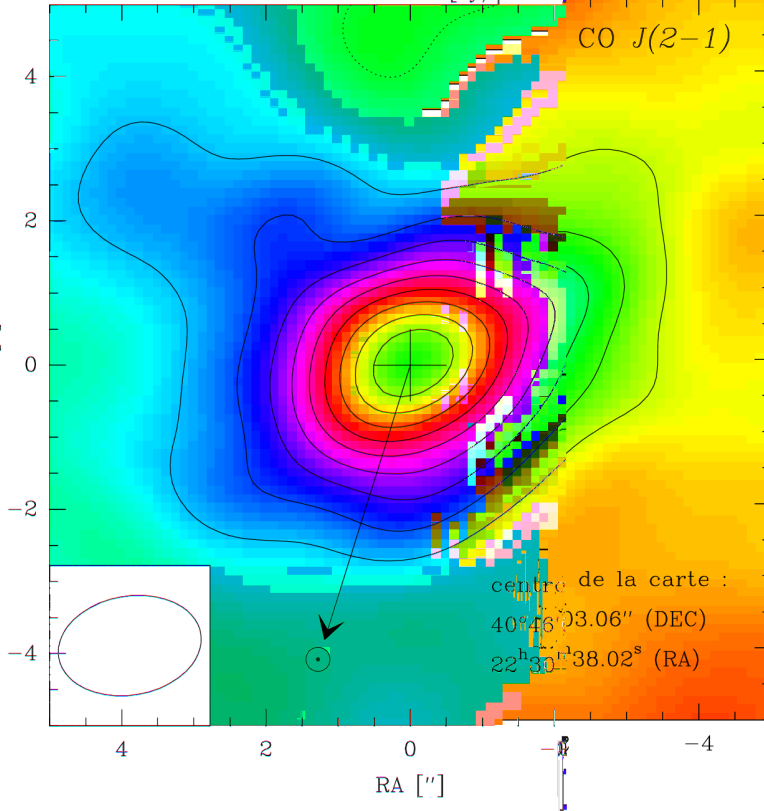


$$S \xrightarrow{TF^{-1}}$$



déconvolution

CLEAN





Les observations



Les observations au Plateau de Bure



⑥ Quand ?

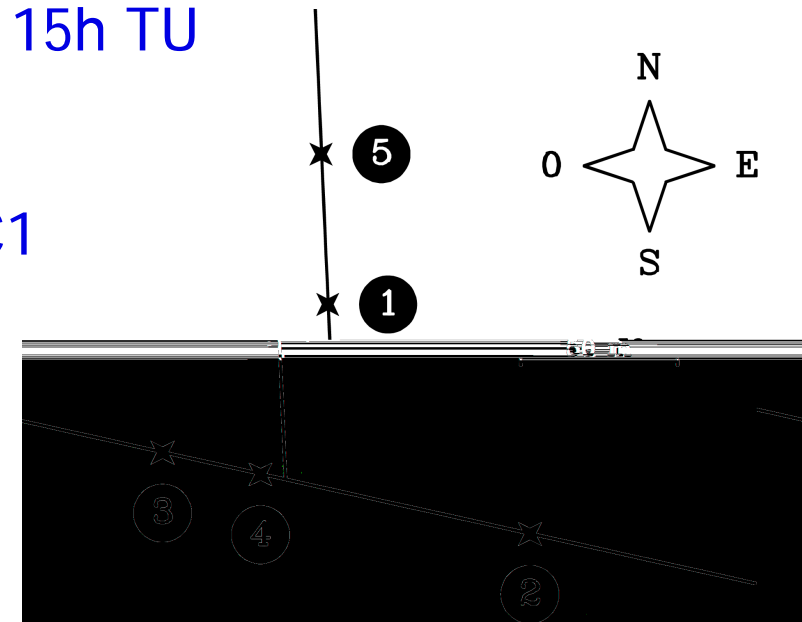
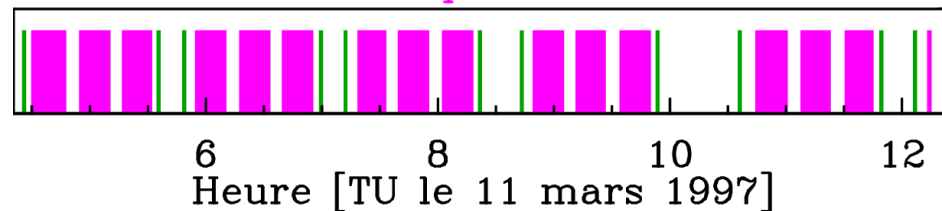
- △ du 6 au 22 mars 1997
- △ observation des transitions $J(2-1)$ (230 GHz) et $J(1-0)$ (115 GHz) de CO le 11 mars de 4h à 15h TU

⑥ Comment ?

- △ 5 antennes de 15m dans la configuration C1
- △ 10 lignes de base de 25m à 150m

Mode antenne unique (on-off)

Mode interférométrique



-> Résolution spatiale : $\sim 1.5''$ à 230 GHz et $\sim 3.5''$ à 115 GHz

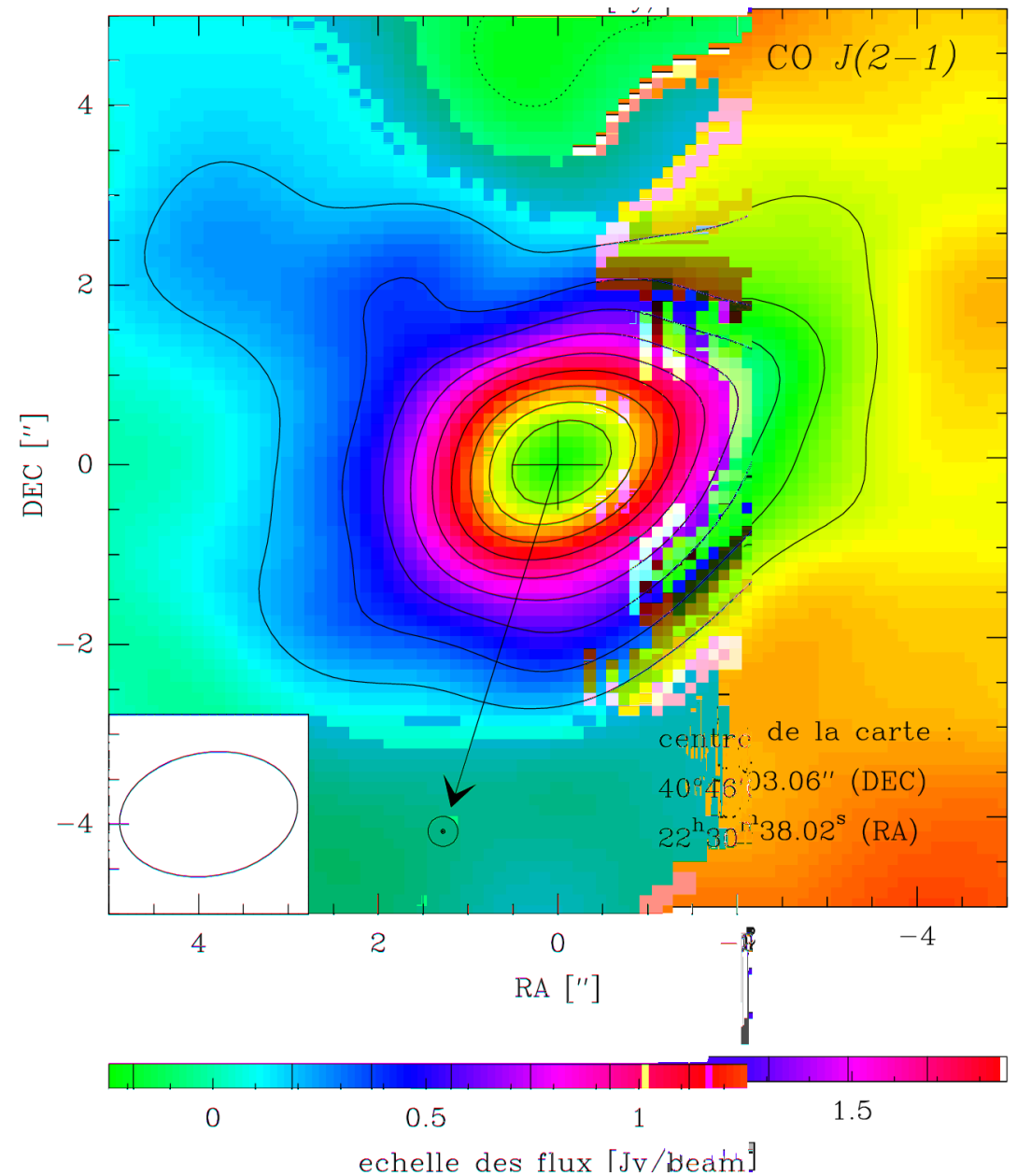
-> Résolution spectrale : 0.1 km/s pour les 2 fréquences



Les cartes interférométriques

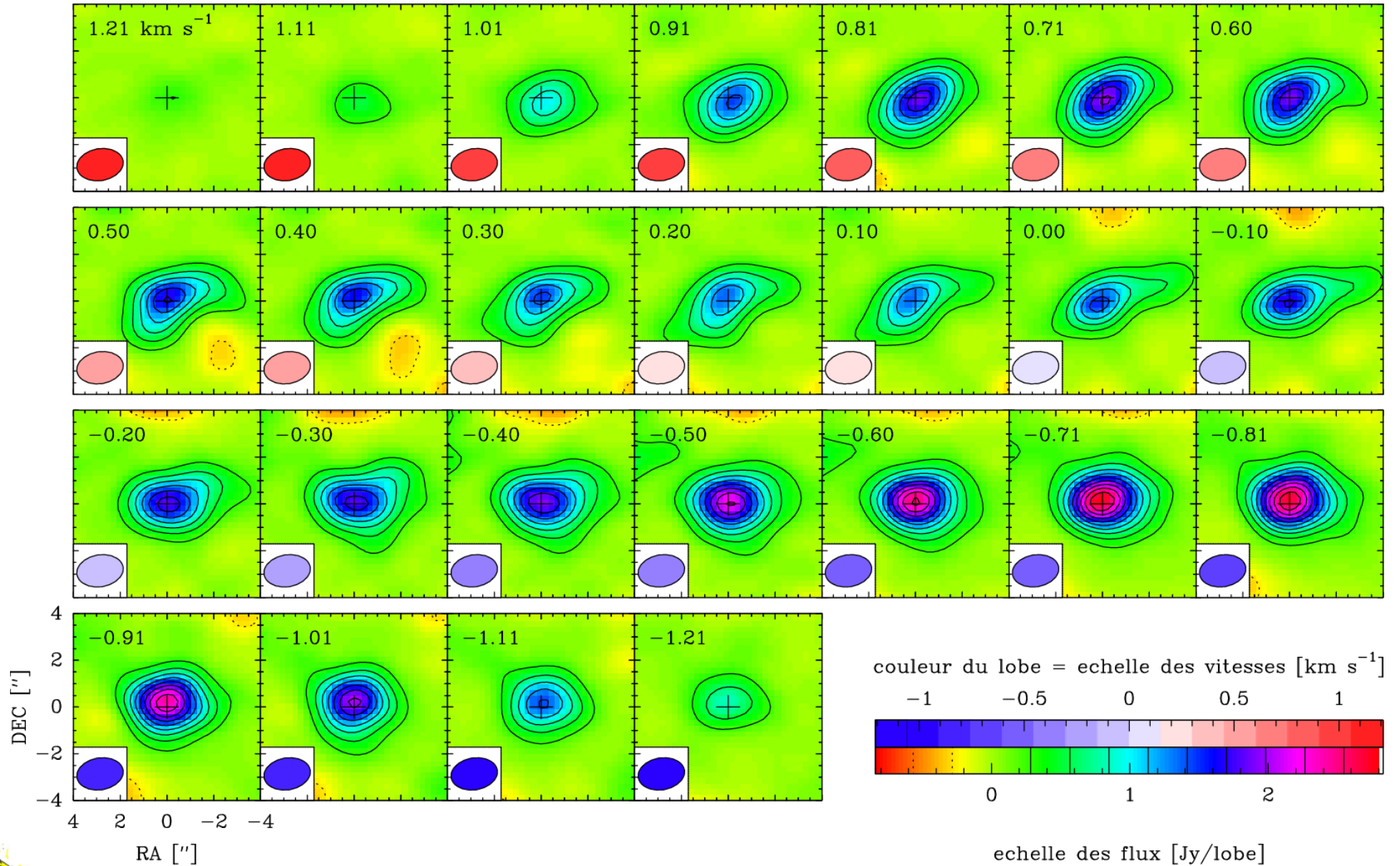


- ⑥ CO $J(2-1)$ dans la comète Hale-Bopp le 11 mars 1997
- ⑥ carte moyennée
 - △ sur la journée
 - △ sur les 25 canaux de vitesse

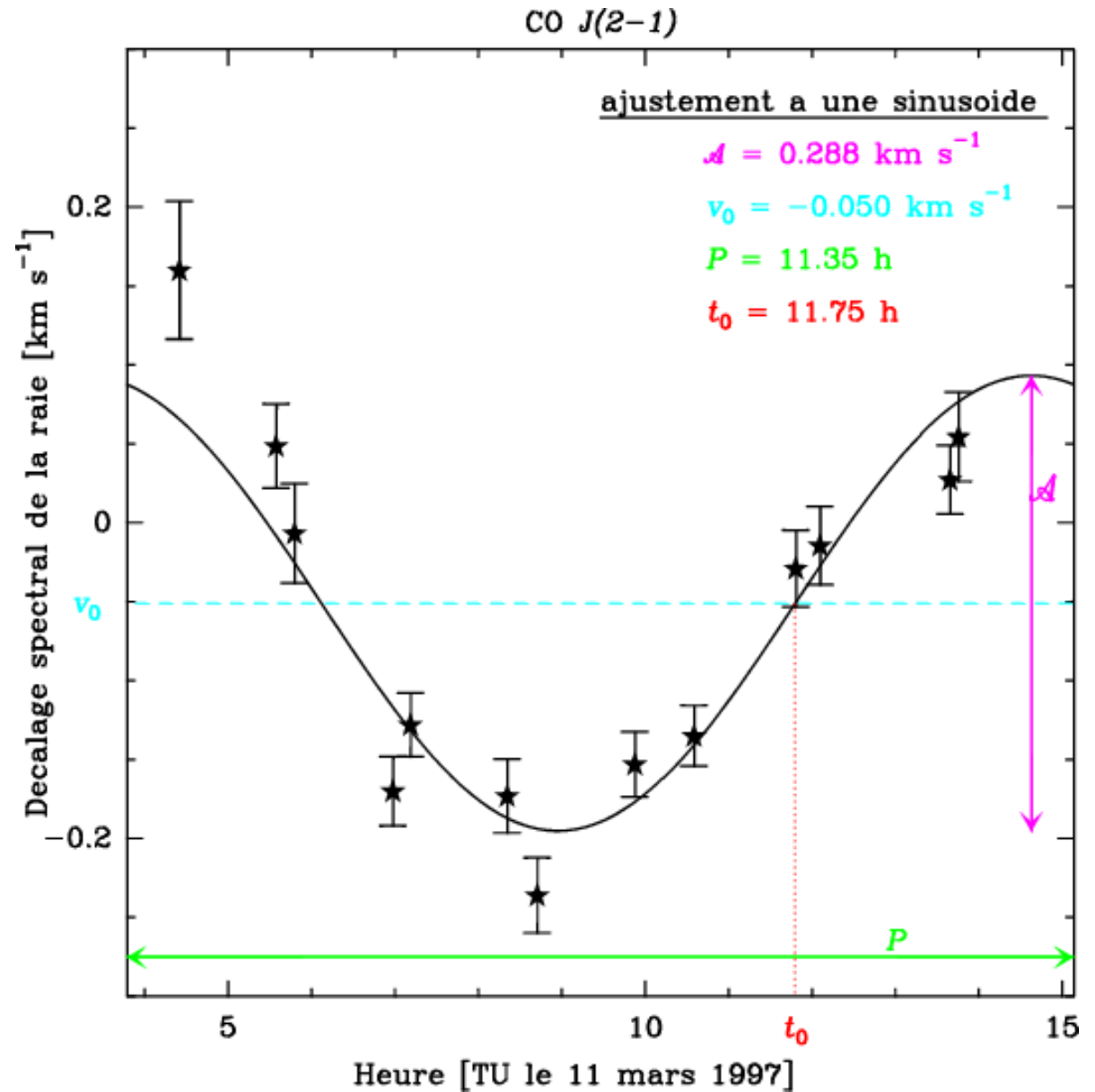
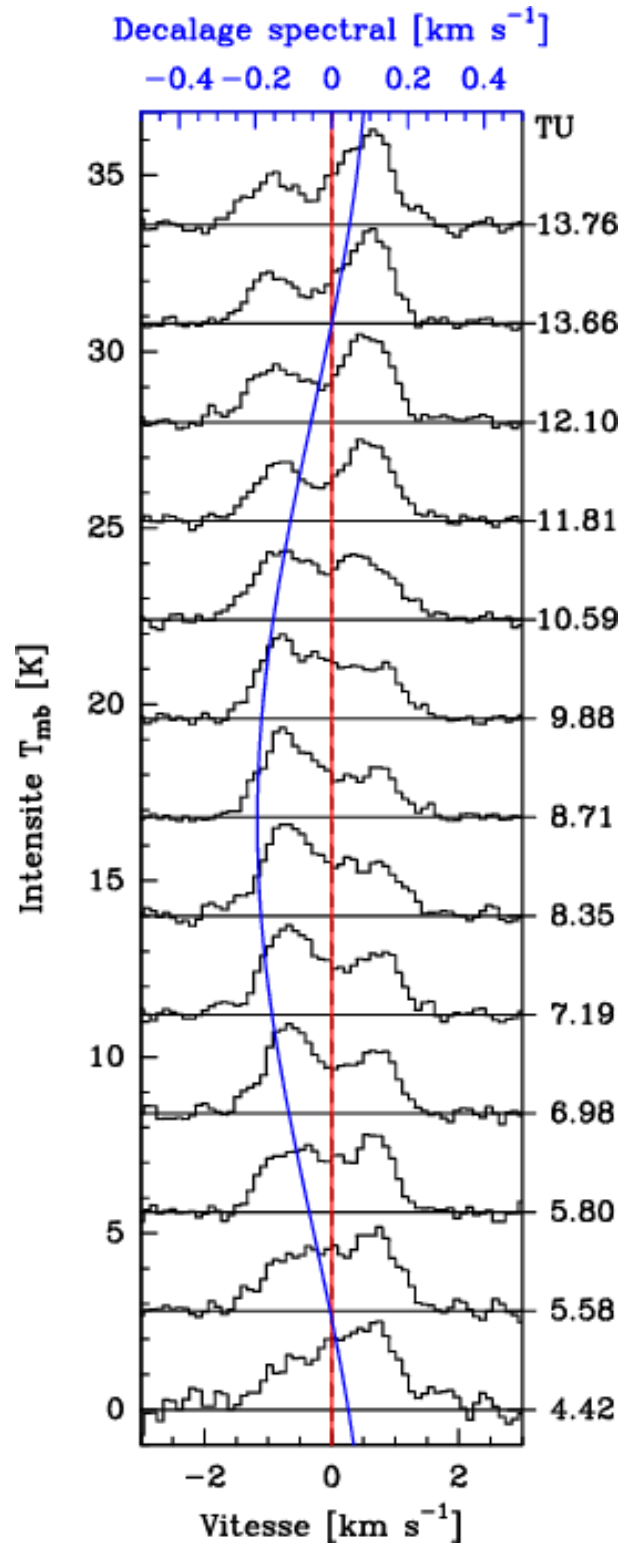


Les cartes spectrales interférométriques

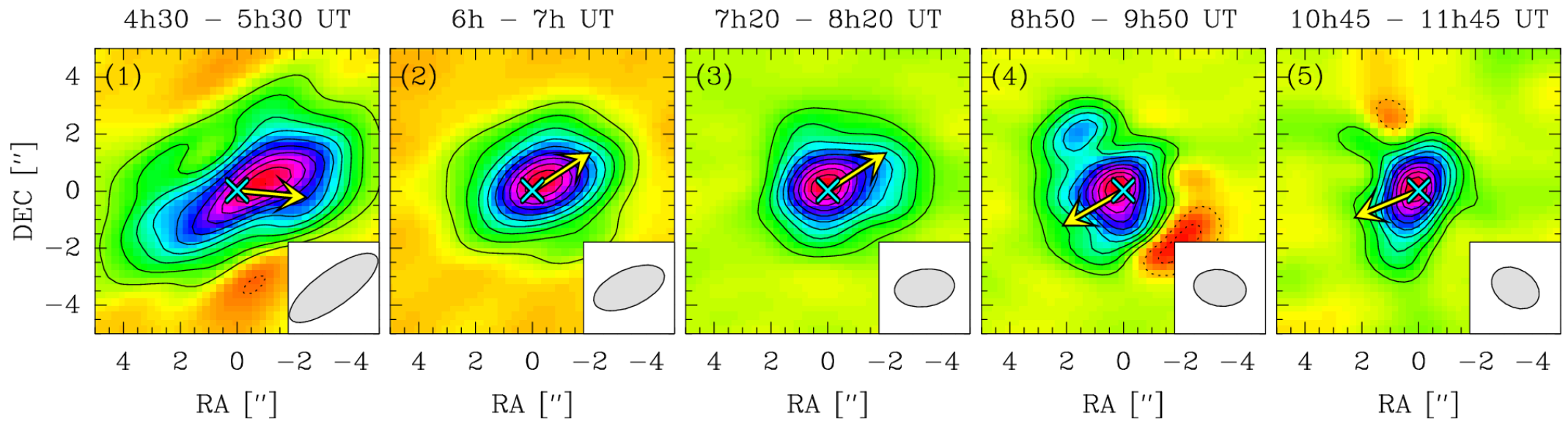
CO $J(2-1)$



Les spectres on-off

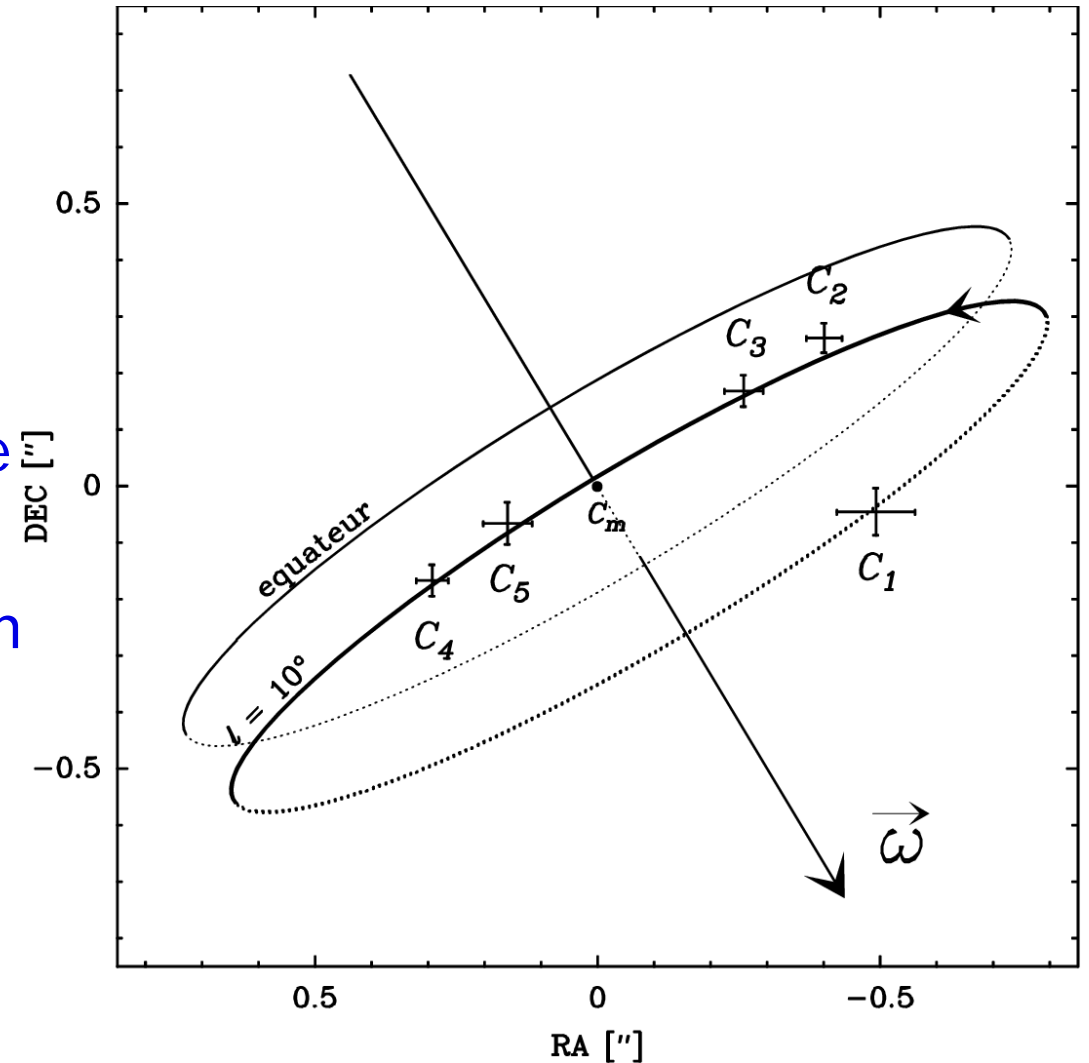


Évolution temporelle des cartes interférométriques



Évolution temporelle des cartes interférométriques

- ⑥ les centres photométriques C_i semblent tourner selon une ellipse dont le 1/2 grand axe est perpendiculaire à l'axe de rotation $\vec{\omega}$ du noyau de la comète



Existence d'un jet de CO en rotation ?



- ⑥ anisotropies spatiales et spectrales de la distribution de brillance
- ⑥ variation temporelle du décalage spectral avec une période égale à celle de la rotation du noyau
- ⑥ évolution temporelle des maxima de brillance autour d'une position centrale selon une direction perpendiculaire à l'axe de rotation du noyau

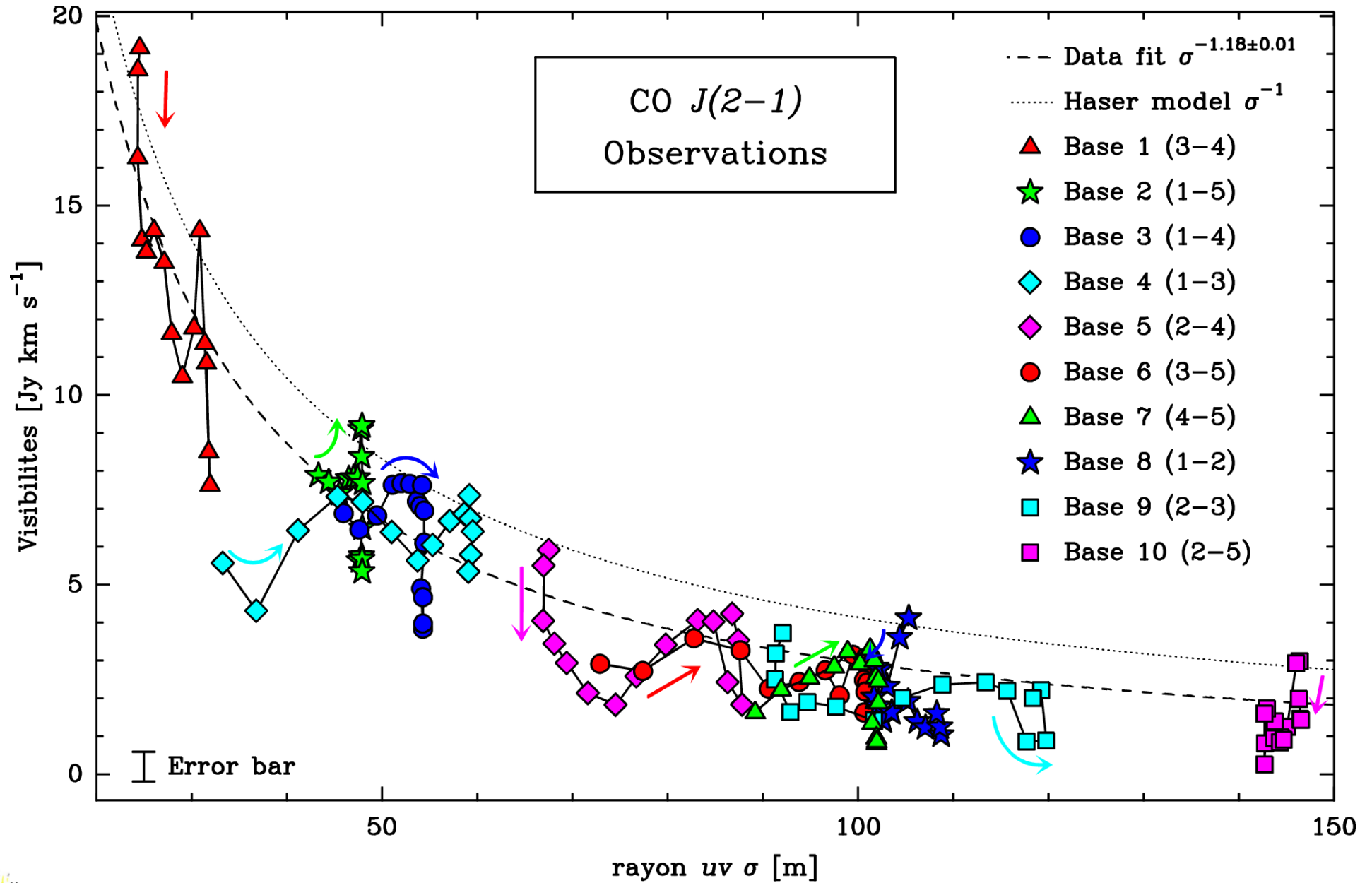
Mais

- ⑥ rapport signal/bruit limité pour les cartes d'évolution temporelle
- ⑥ couverture uv insuffisante
- ⑥ rotation de la forme du lobe

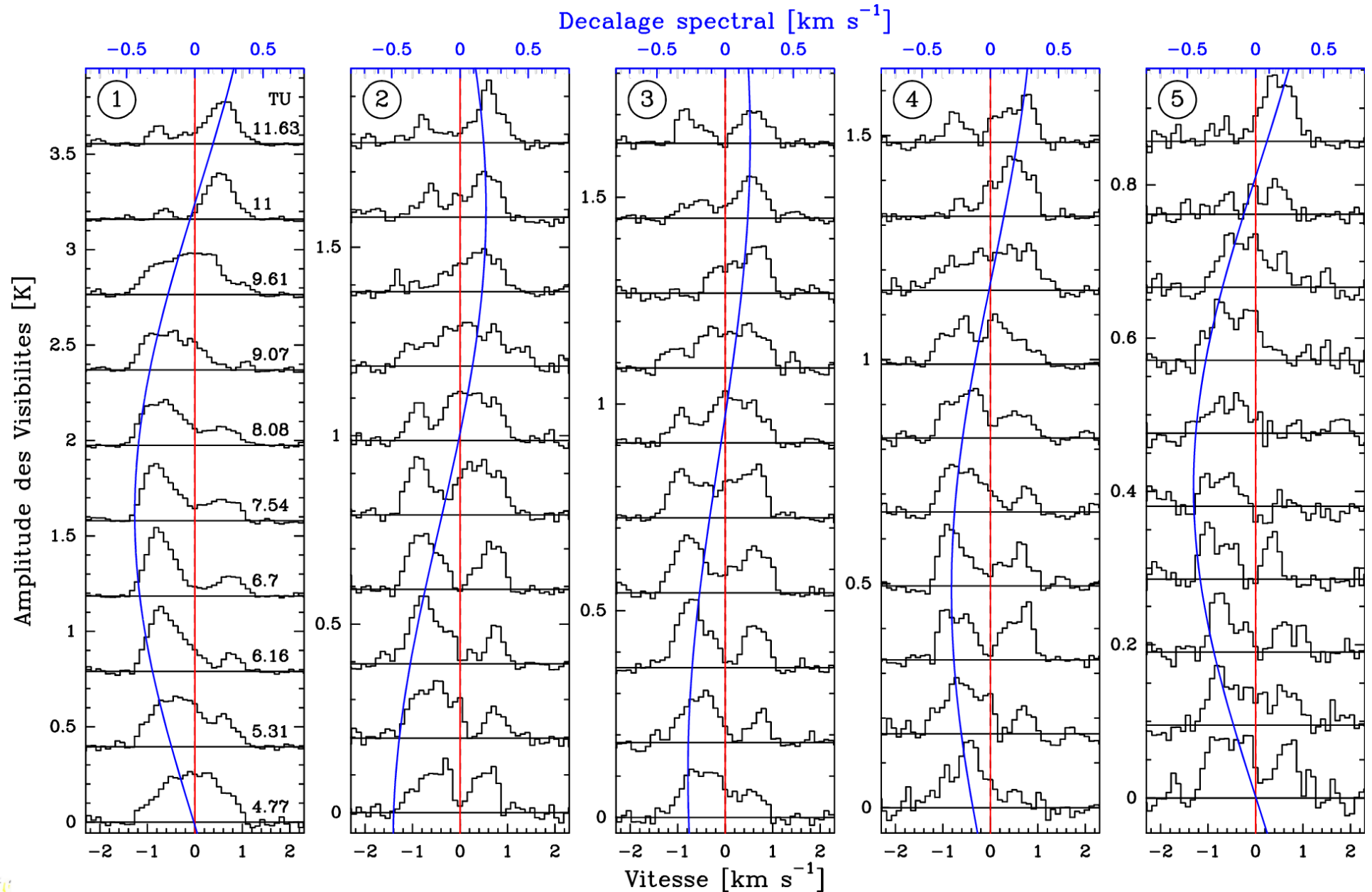
-> étudier directement les visibilitées



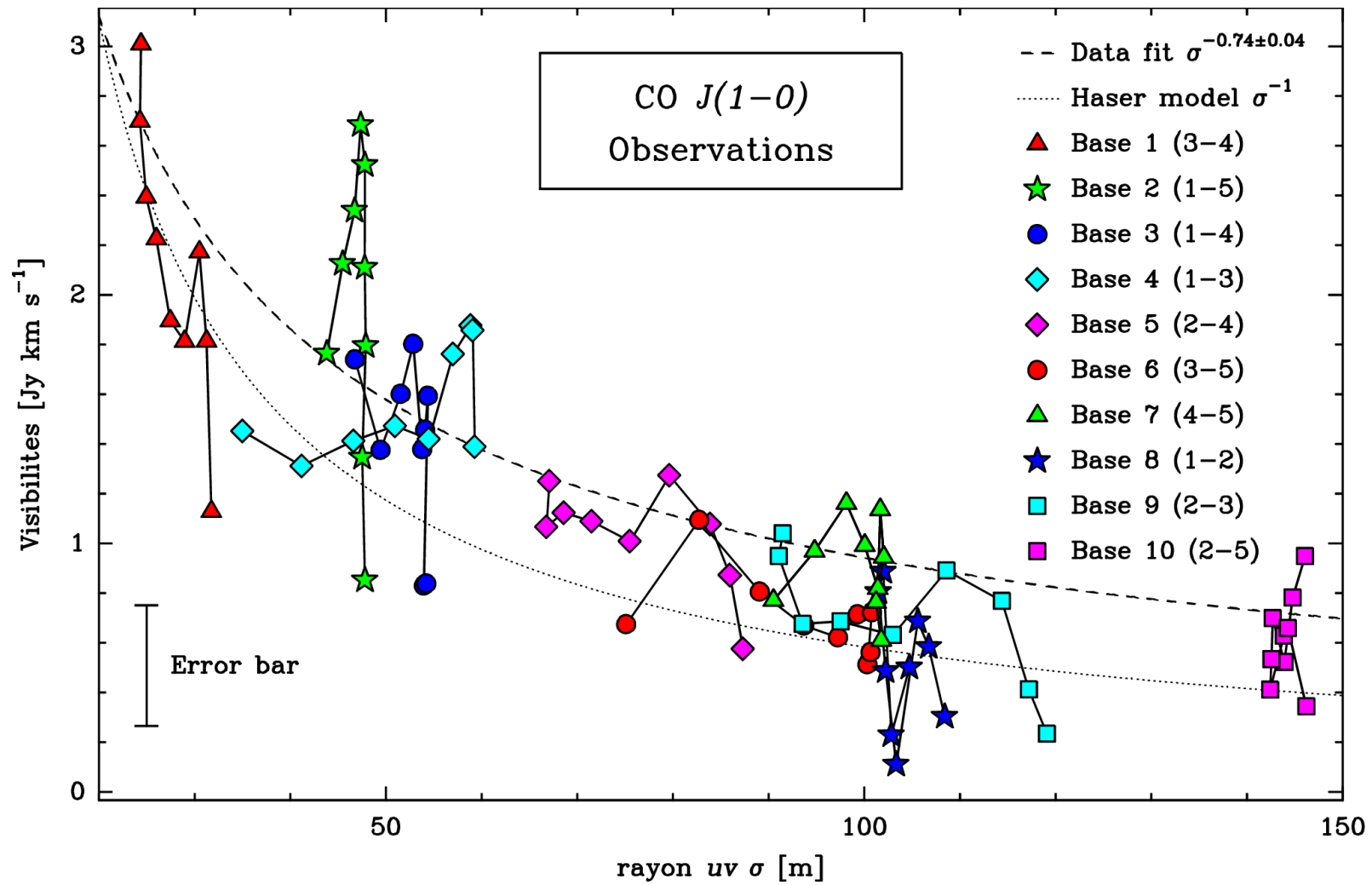
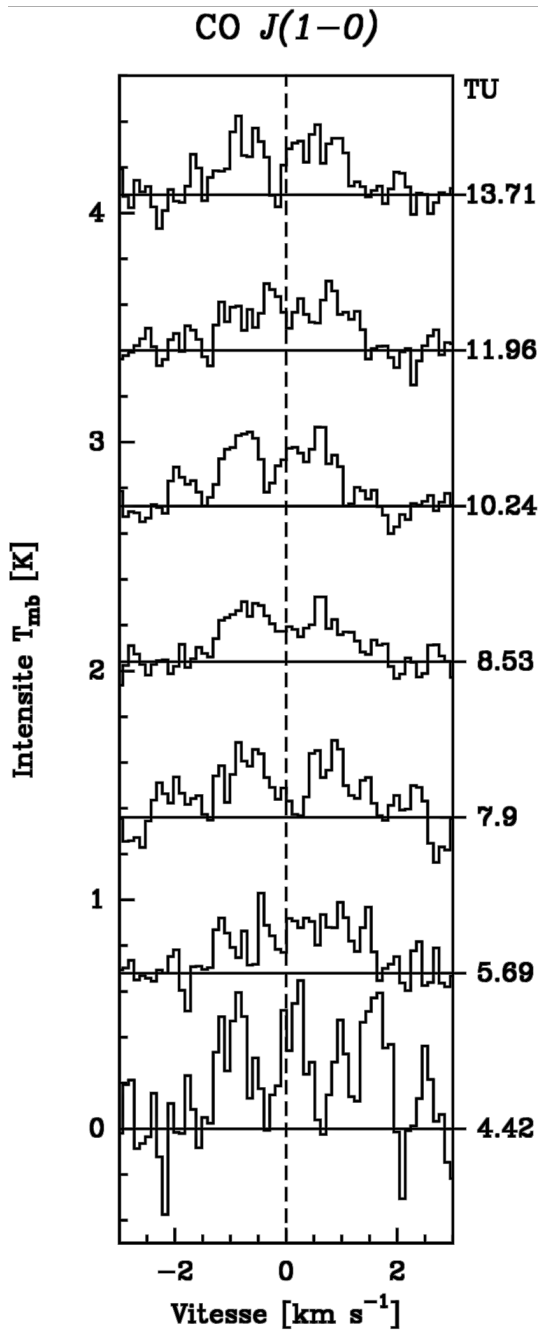
Évolution temporelle des visibilités



Les spectres interférométriques



Les données de la raie CO $J(1-0)$



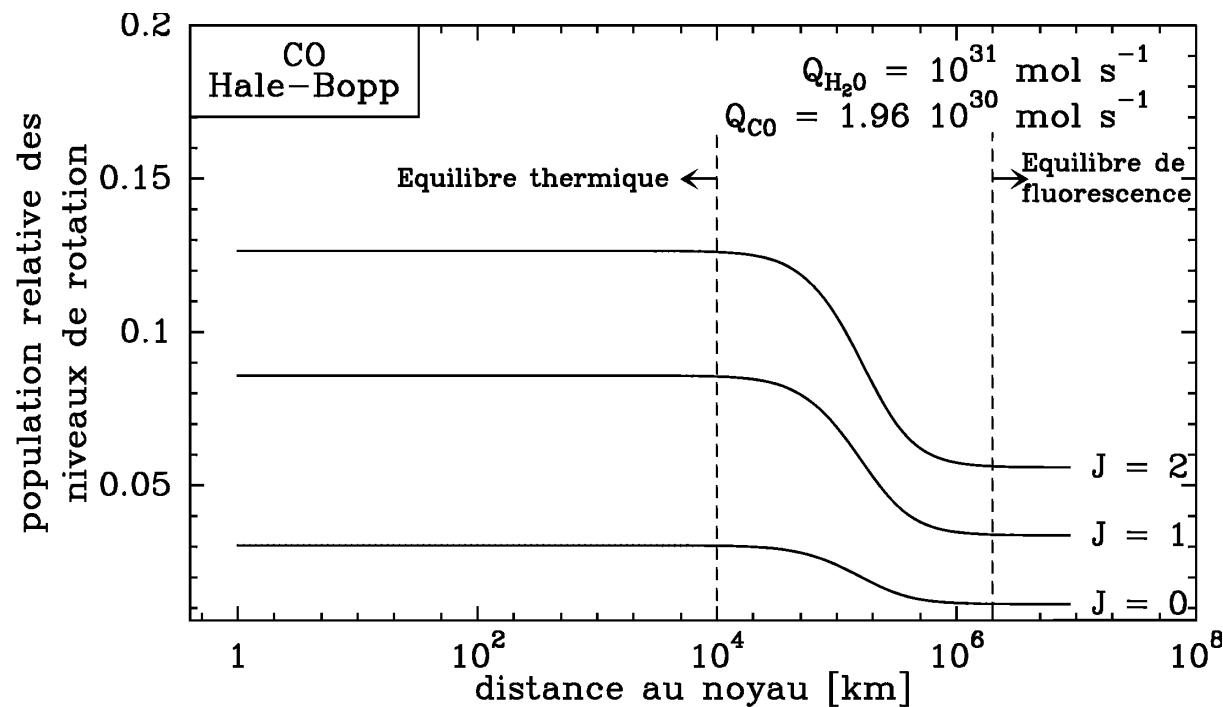


Le modèle



Modélisation 3-d de l'atmosphère cométaire

- ⑥ modèle de Haser pour une molécule mère : vitesse d'expansion constante, distribution en $1/r^2$
- ⑥ modèle d'excitation (Biver, thèse, 1997) :

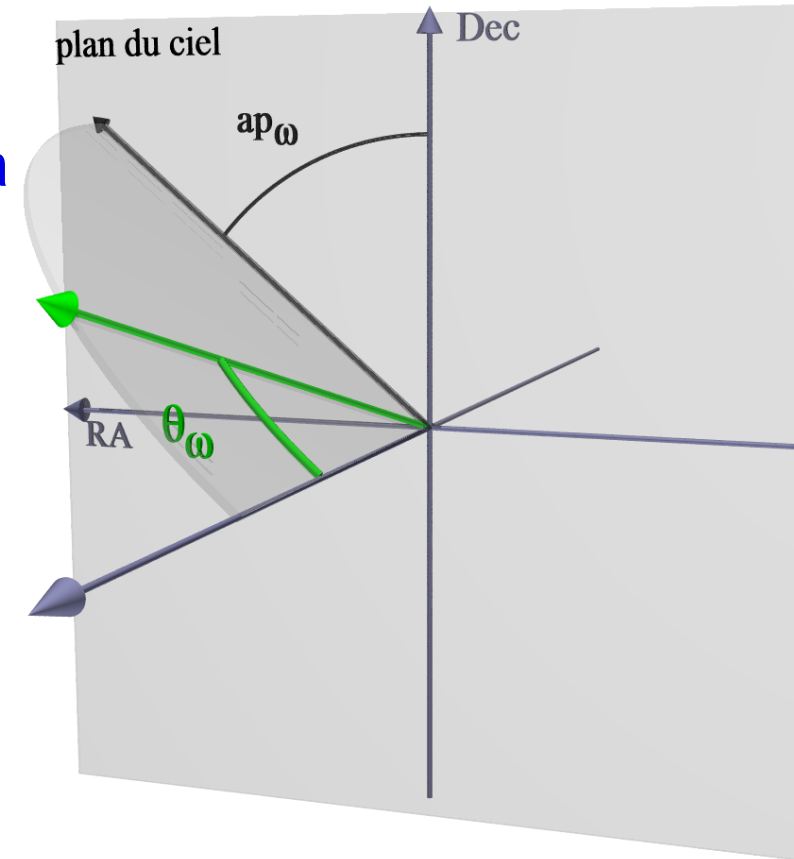


- ⑥ transfert du rayonnement optiquement mince



Principe et paramètres du modèle

- ⑥ une composante isotrope
- ⑥ un jet de forme conique
 - △ apportant une fraction f_{co} du CO de la coma
 - △ d'ouverture Ψ
 - △ émis depuis la latitude ℓ
- ⑥ rotation du noyau caractérisée par
 - △ une période $P = 11.35h$ (Jorda *et al.*, EMP, 1999)
 - △ l'angle d'aspect $\theta_{\omega} = 80^{\circ} \pm 10^{\circ}$ *
 - △ l'angle de position $ap_{\omega} = 210^{\circ} \pm 10^{\circ}$ *



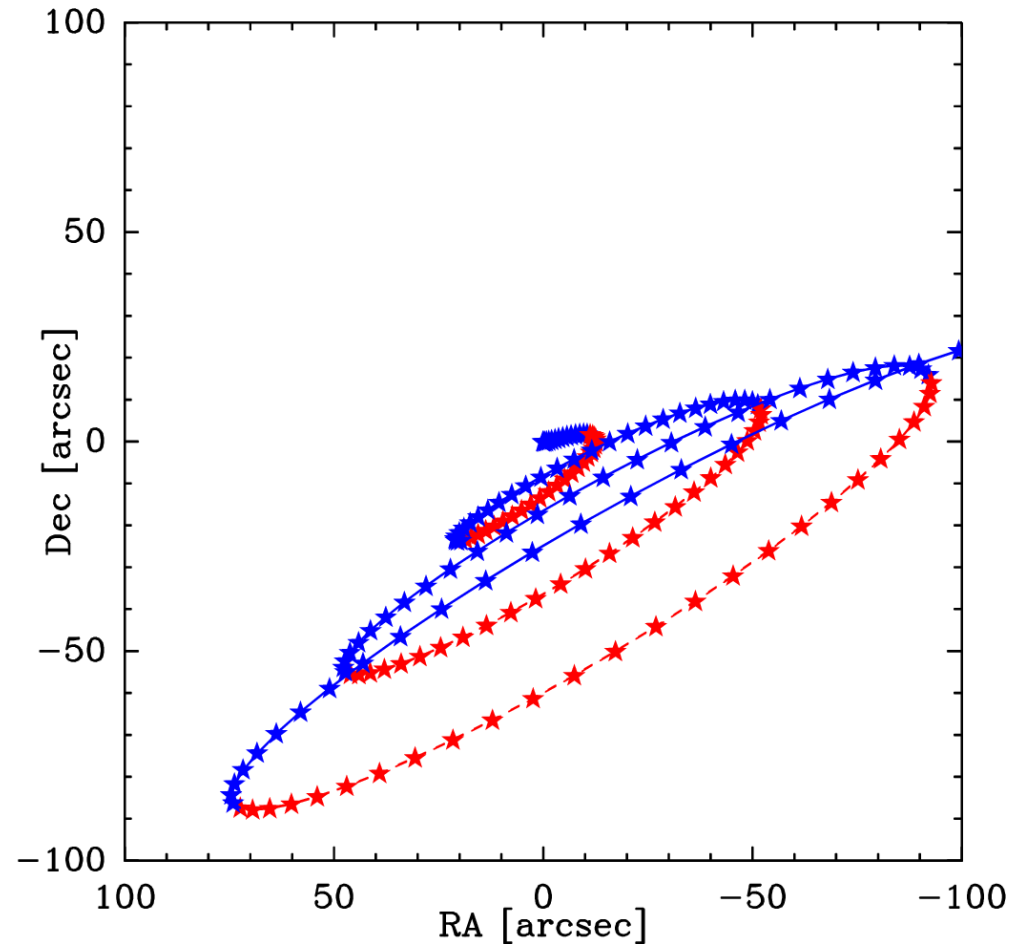
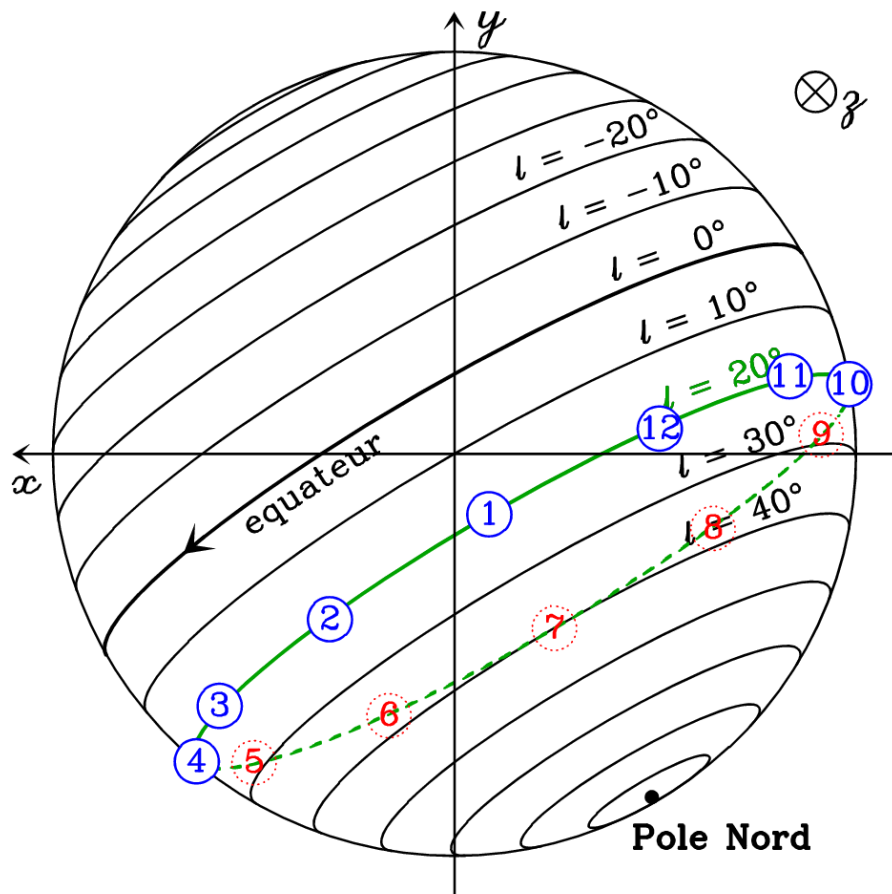
*valeurs moyennes trouvées dans la littérature



Principe et paramètres du modèle

Paramètres de l'axe de rotation : $\theta_\omega = 80^\circ$, $ap_\omega = 210^\circ$

Latitude du jet : $\ell = 20^\circ$





- ⑥ simuler les observations du CO du 11 mars
 - △ les spectres on-off
 - △ les spectres interférométriques
 - △ les visibilités
- ⑥ comprendre le comportement et reproduire leurs évolutions temporelles





Analyse des résultats

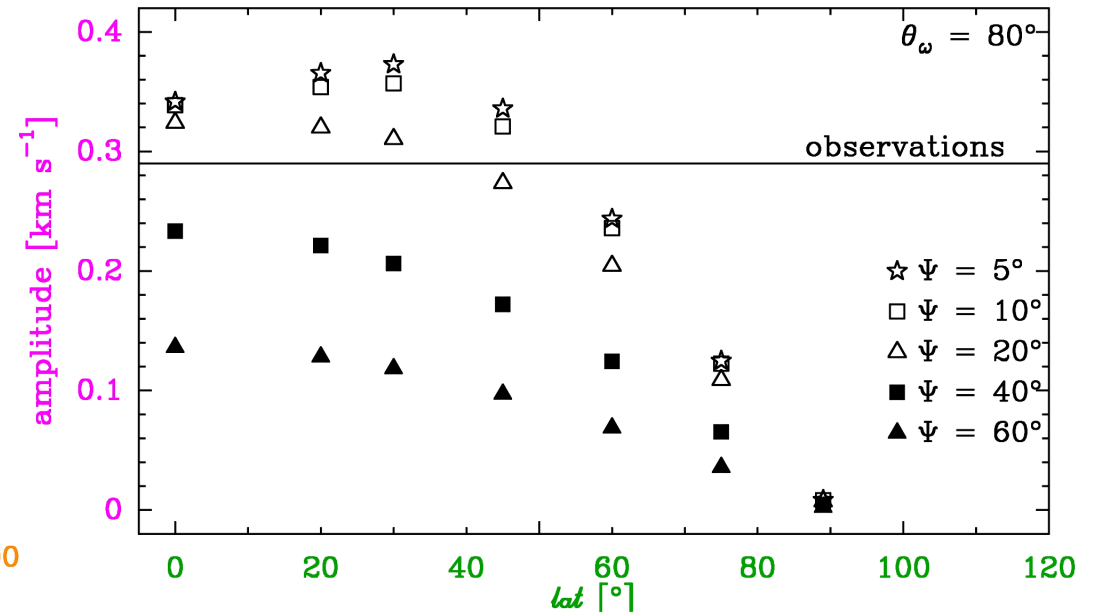
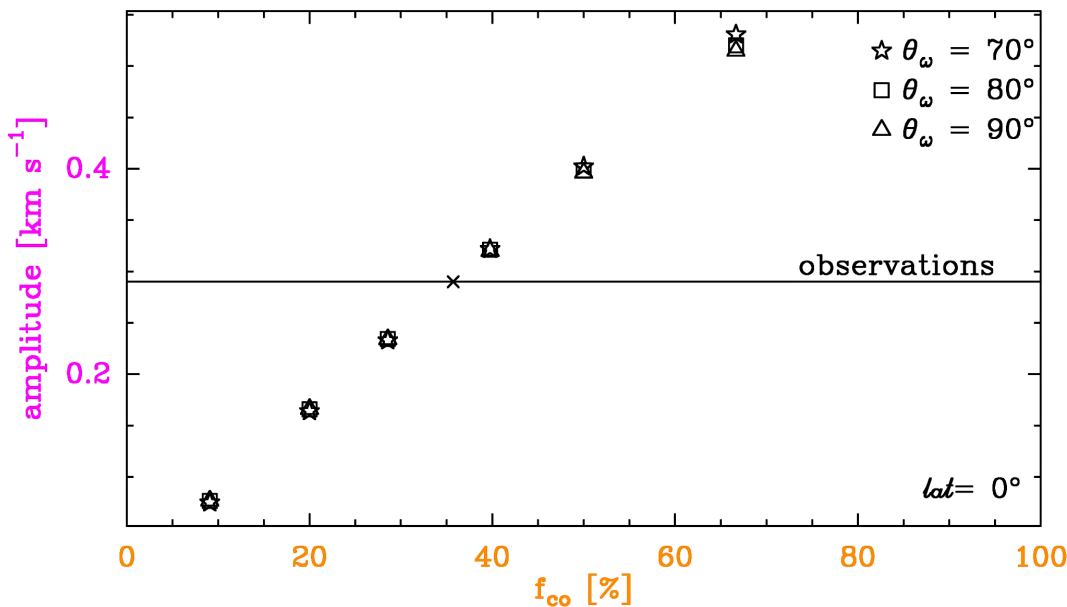
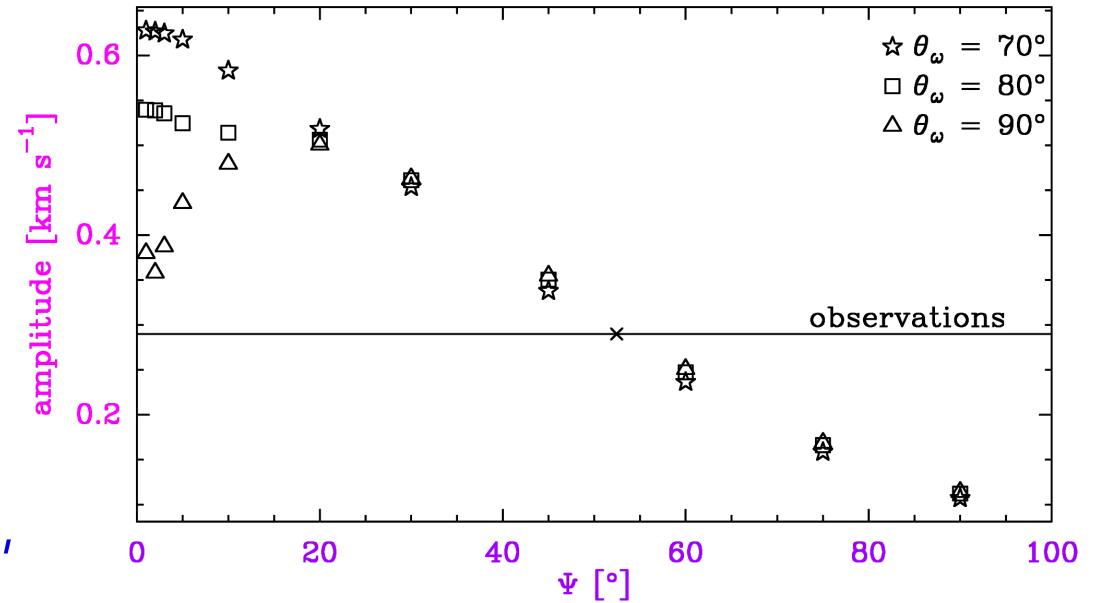


Ajustement de l'évolution temporelle des décalages spectraux on-off

Ajustement à une sinusoïde :

$$\Delta v(t) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{P}(t - t_0)\right) + v_0$$

- t_0 est influencé uniquement par la longitude initiale du jet
- A augmente lorsque f_{co} augmente, Ψ diminue ou $|\ell|$ diminue

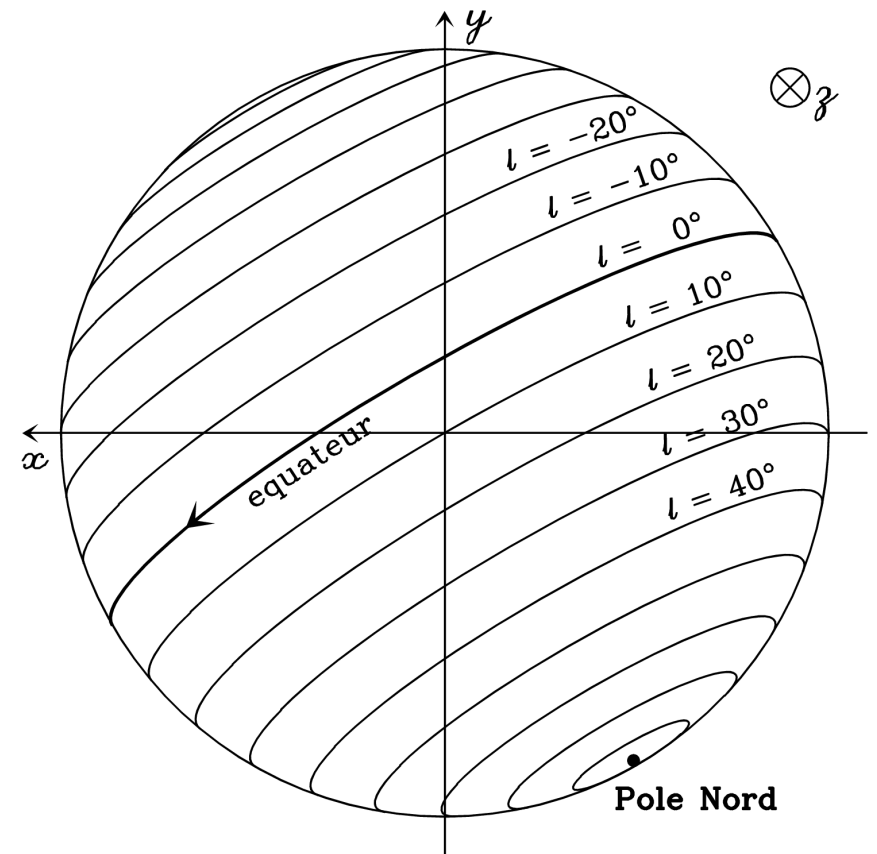
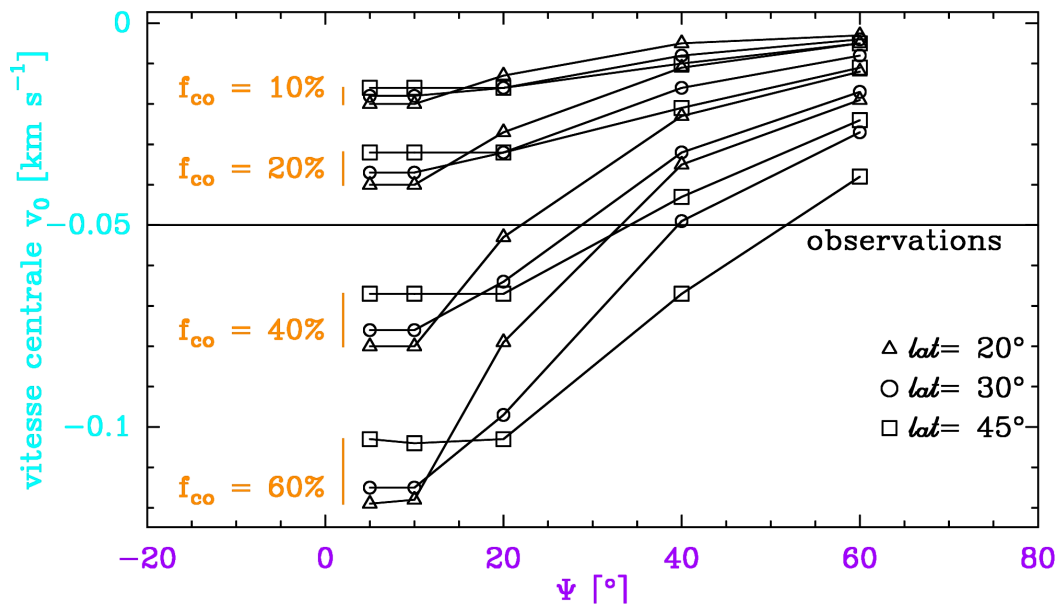


Ajustement de l'évolution temporelle des décalages spectraux on-off

- le signe de v_0 est déterminé par l et θ_ω :

$$l > 0^\circ \text{ et } \theta_\omega < 90^\circ \Rightarrow v_0 < 0$$

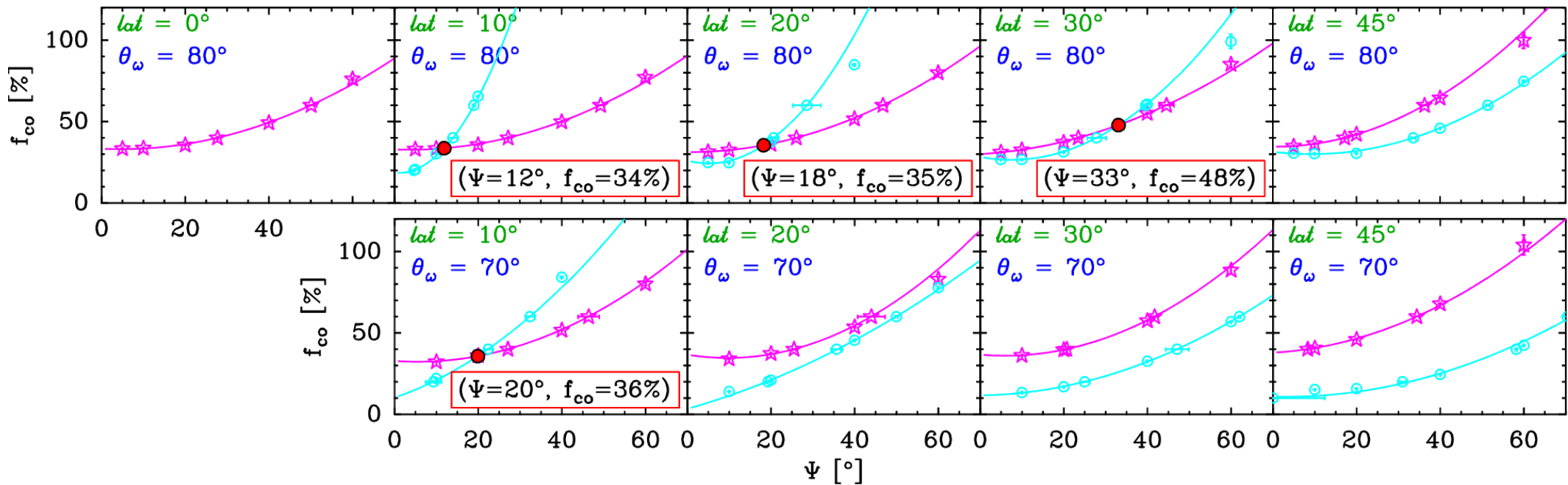
$|v_0|$ augmente de la même façon que A



- ap_ω n'a aucune influence sur les paramètres A , v_0 et t_0

Détermination des couples (f_{co}, Ψ) potentiels

- Compétition entre f_{co} et Ψ pour \mathcal{A} et v_0 .
- Pour chaque couple (θ_ω, ℓ) , il existe un couple (f_{co}, Ψ) qui reproduit simultanément v_0 et \mathcal{A} .



$$f_{co} > 20\% \quad \left\{ \begin{array}{ll} 0^\circ < \ell < 45^\circ & \text{si } \theta_\omega = 80^\circ \\ 0^\circ < \ell < 20^\circ & \text{si } \theta_\omega = 70^\circ \end{array} \right.$$



Détermination des couples (f_{co}, Ψ) potentiels

Jeux de paramètres reproduisant la courbe d'évolution temporelle des décalages spectraux on-off :

$$\begin{array}{l} \theta_{\omega} = 80^{\circ} \\ \ell = 10^{\circ} \\ \Psi = 12^{\circ} \\ f_{co} = 34\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \theta_{\omega} = 80^{\circ} \\ \ell = 20^{\circ} \\ \Psi = 18^{\circ} \\ f_{co} = 35\% \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \theta_{\omega} = 80^{\circ} \\ \ell = 30^{\circ} \\ \Psi = 33^{\circ} \\ f_{co} = 48\% \end{array}$$

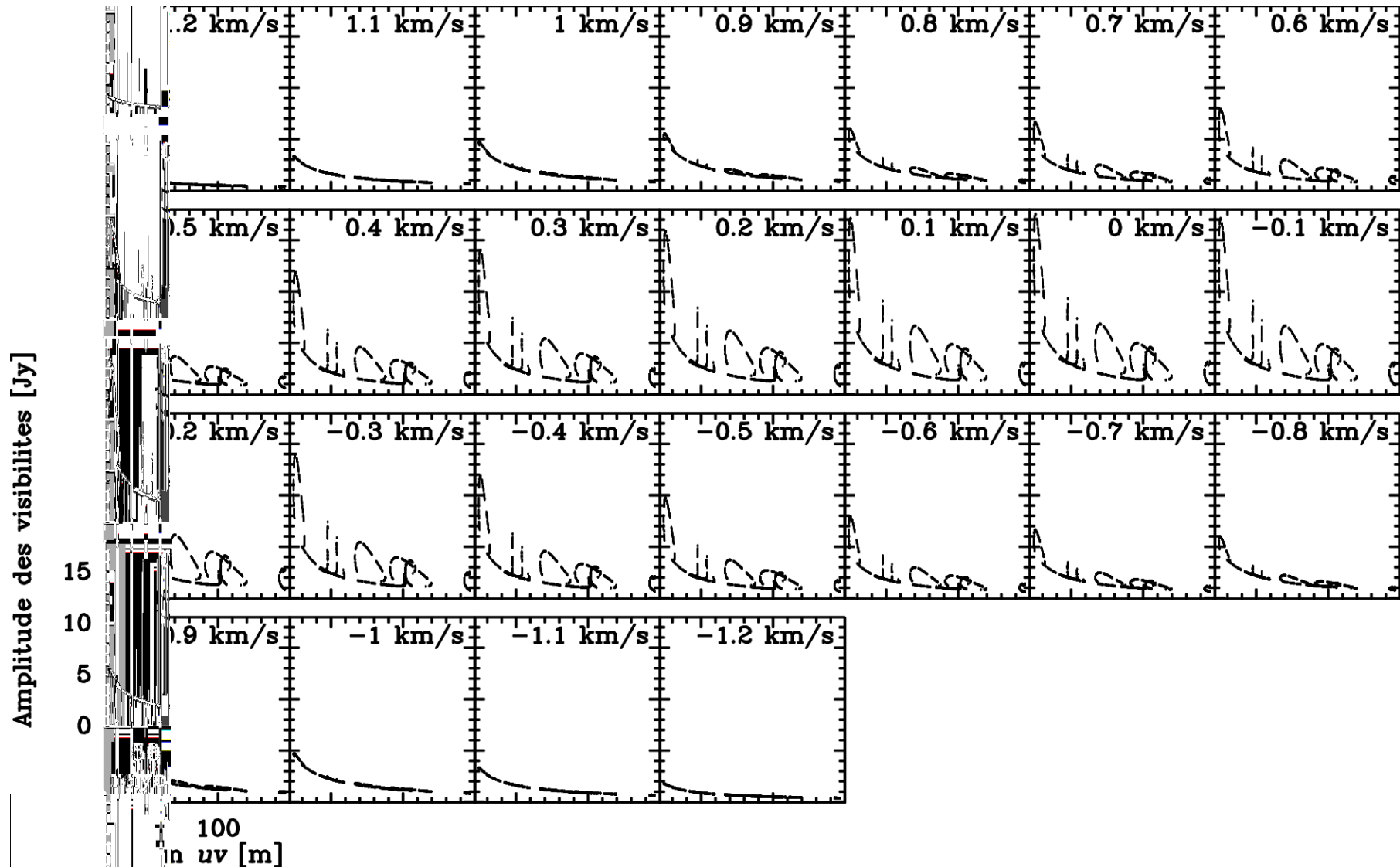
$$\begin{array}{l} \theta_{\omega} = 70^{\circ} \\ \ell = 10^{\circ} \\ \Psi = 20^{\circ} \\ f_{co} = 36\% \end{array}$$

→ Contraindre d'avantage les paramètres par les autres observations



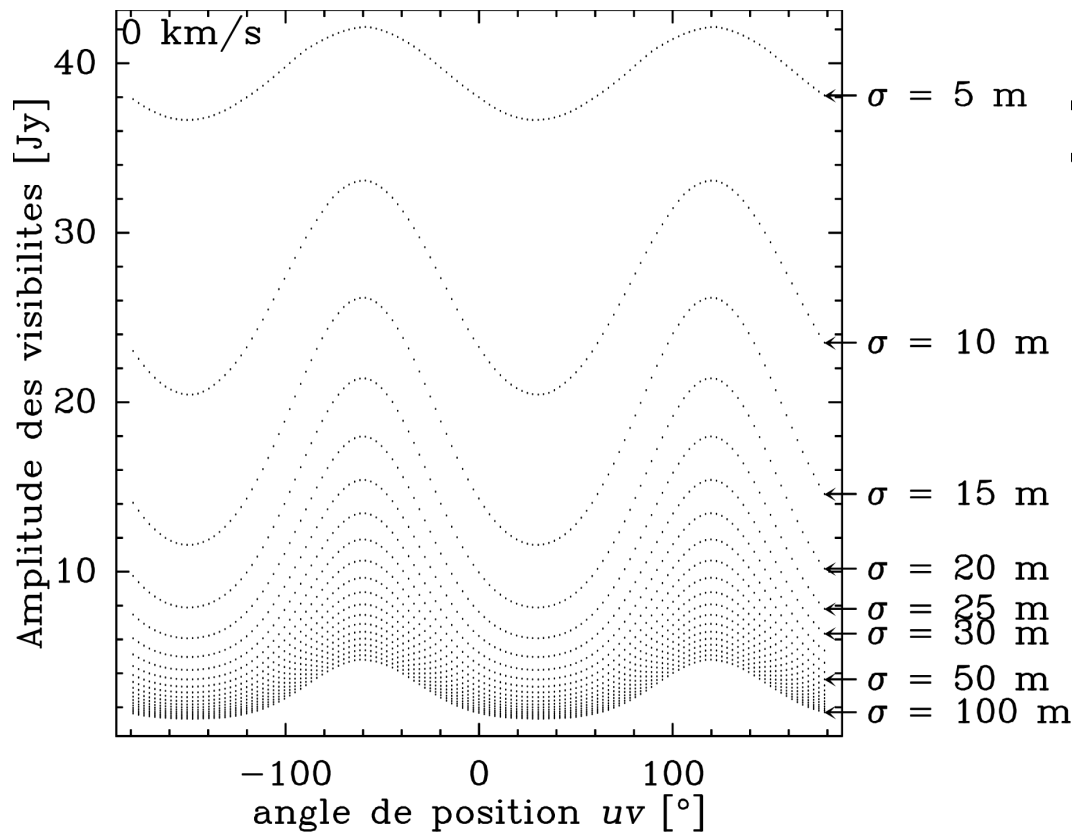
Étude de cas simplifiés : visibilités de jets dans le plan du ciel

Visibilités obtenues pour un jet rectiligne :

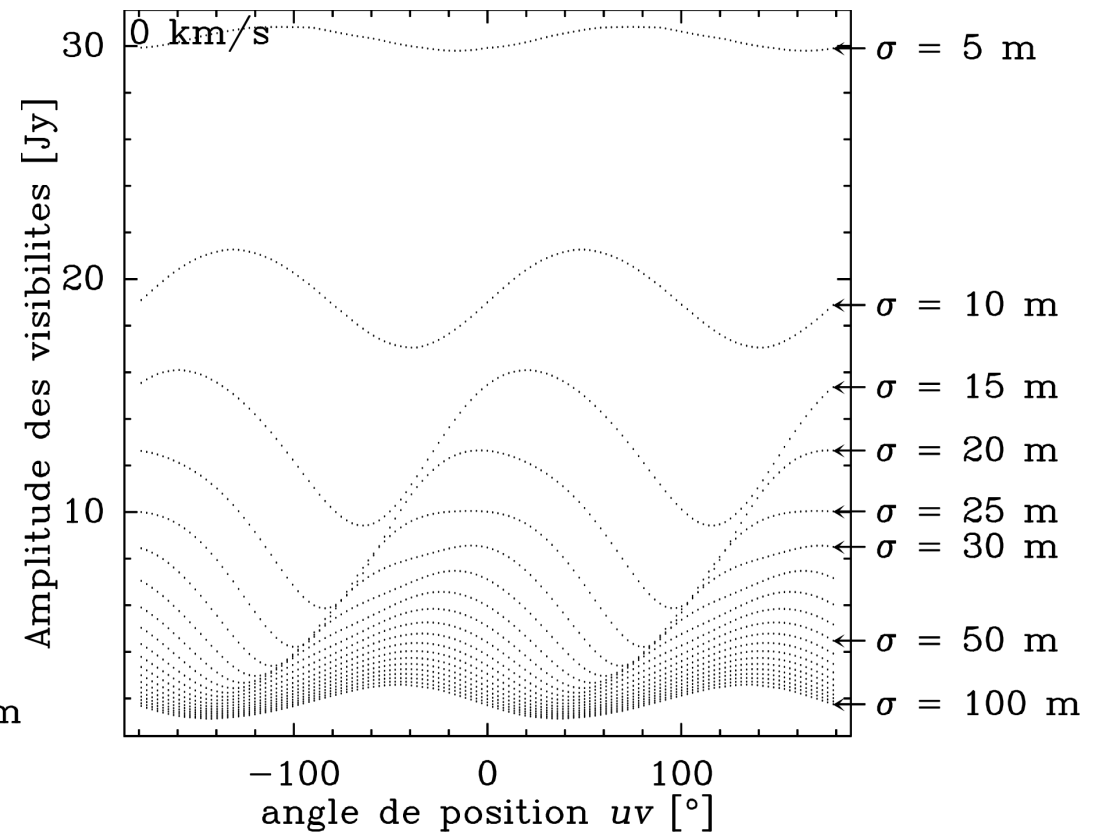


Étude de cas simplifiés : visibilité de jets dans le plan du ciel

jet rectiligne



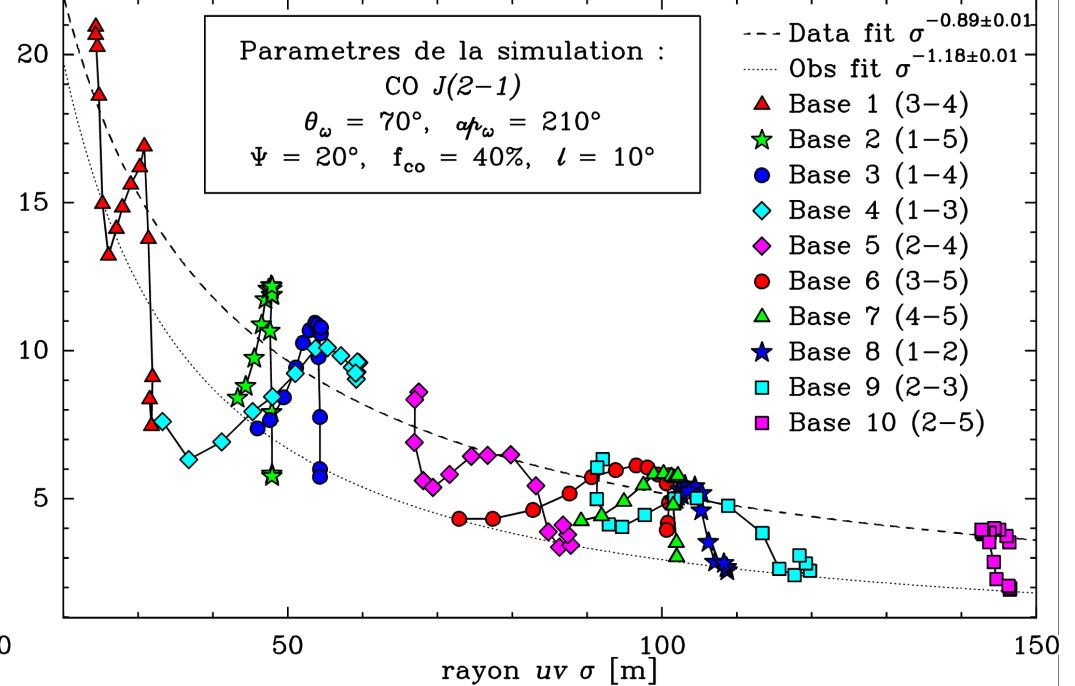
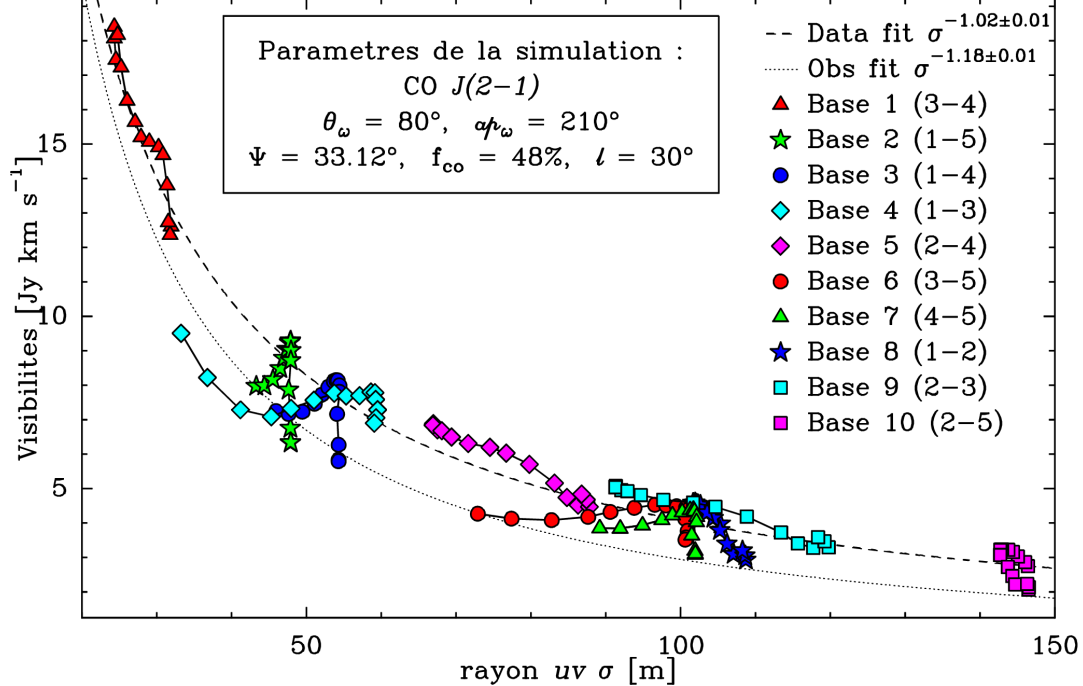
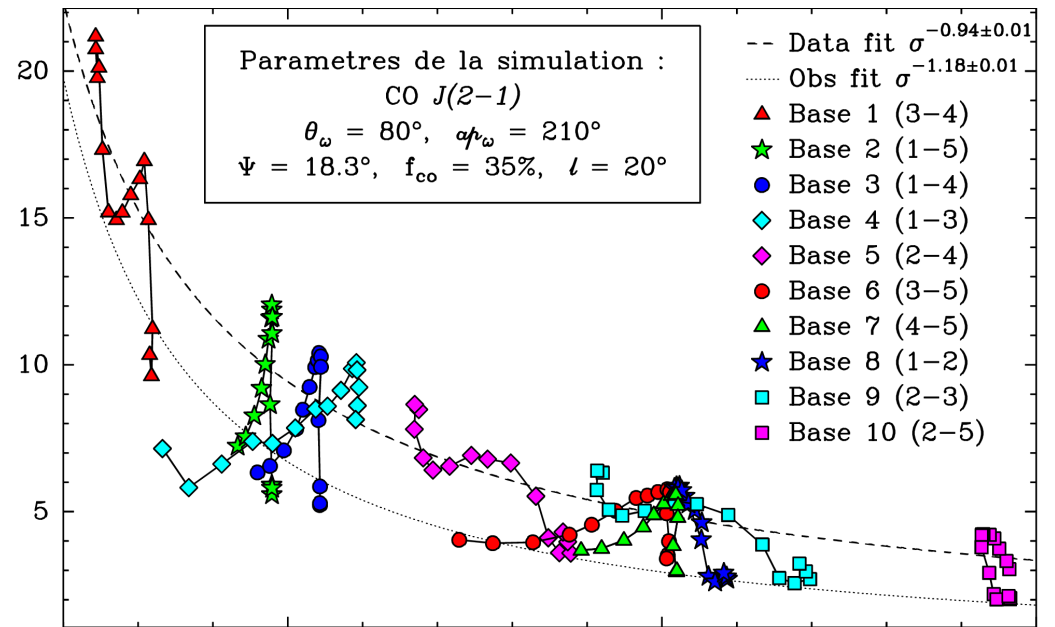
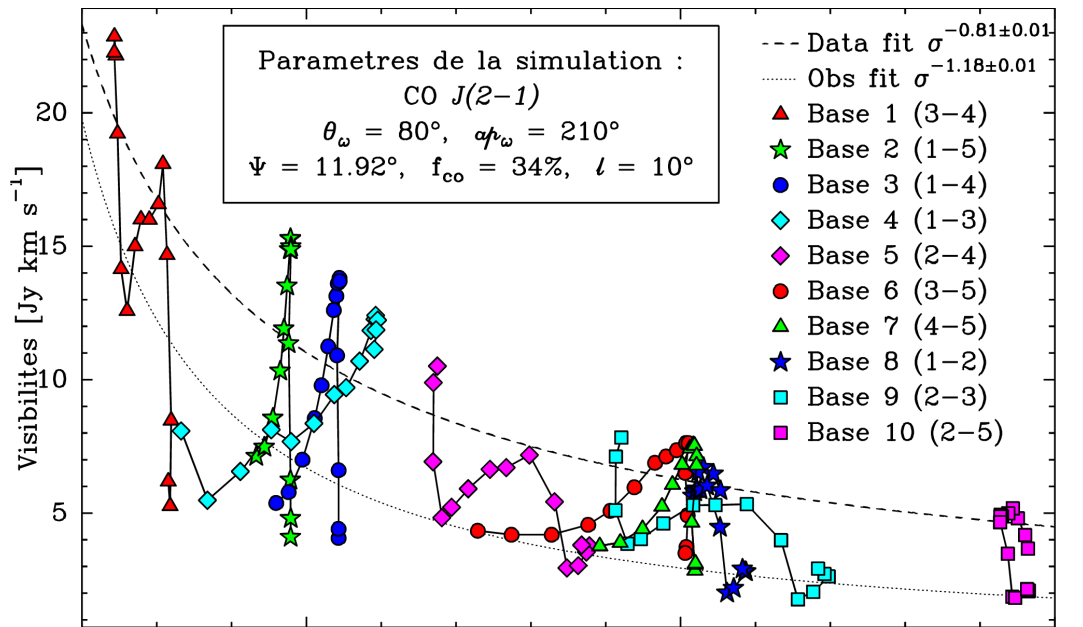
jet en rotation



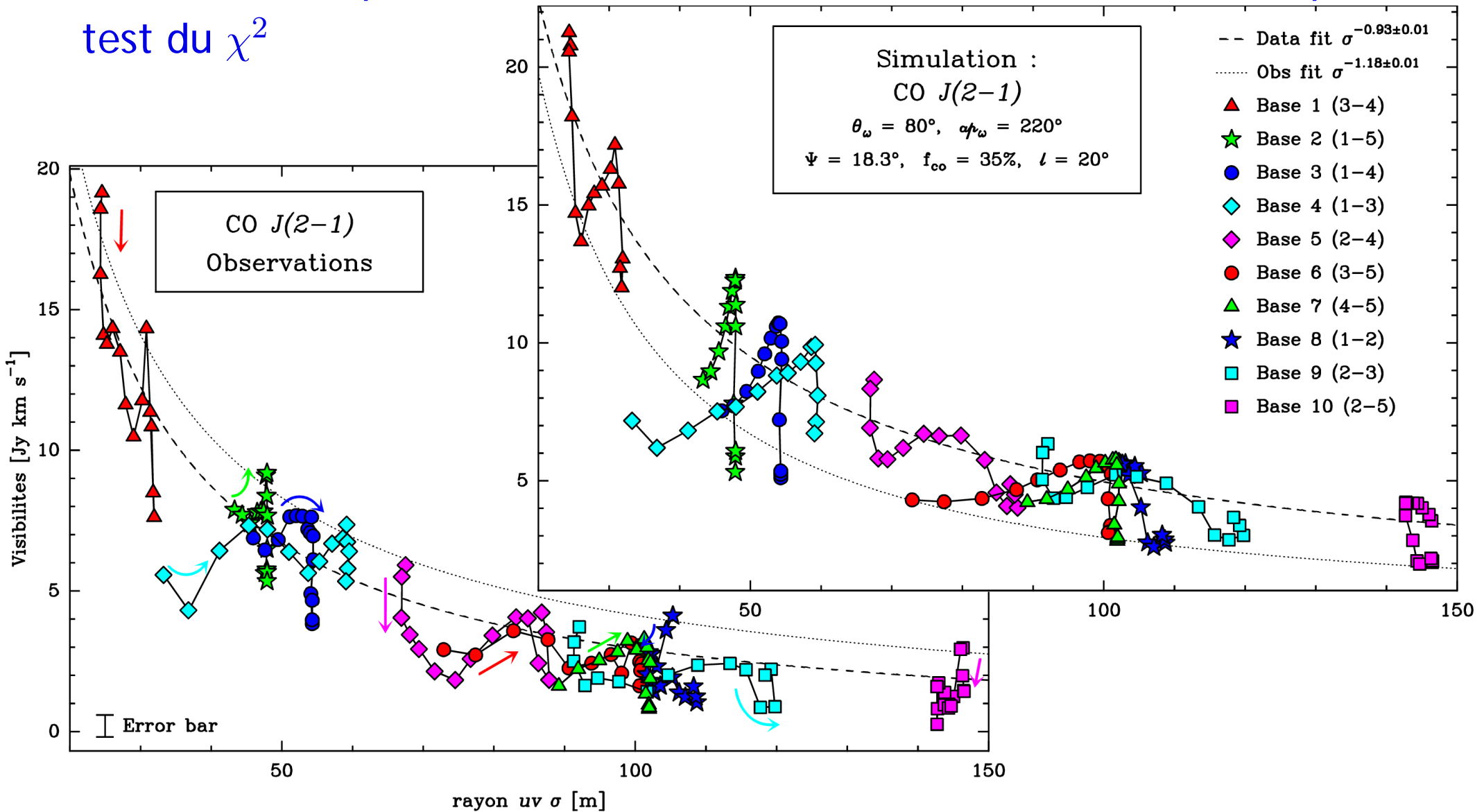
-> les longues lignes de base sondent les régions internes de la spirale et les petites les régions plus externes



Visibilités des modèles potentiels



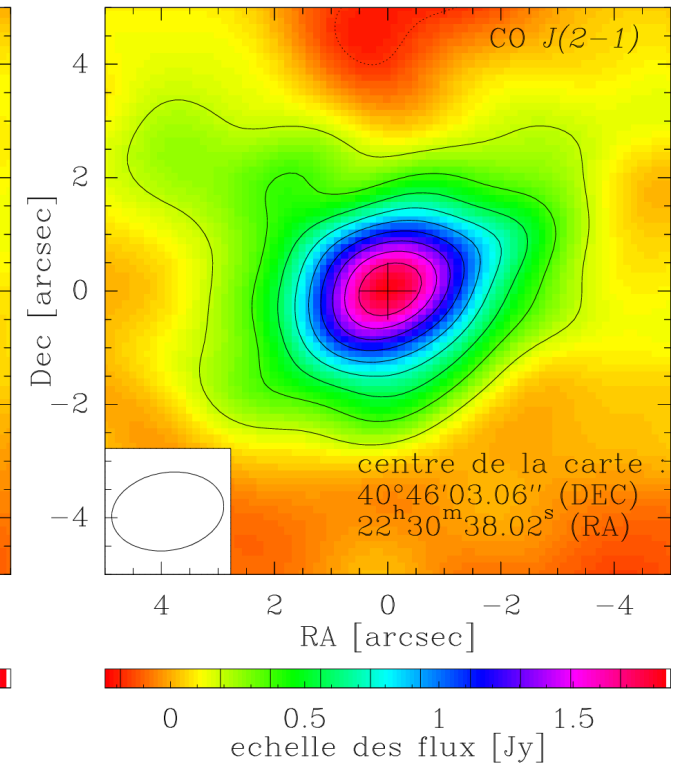
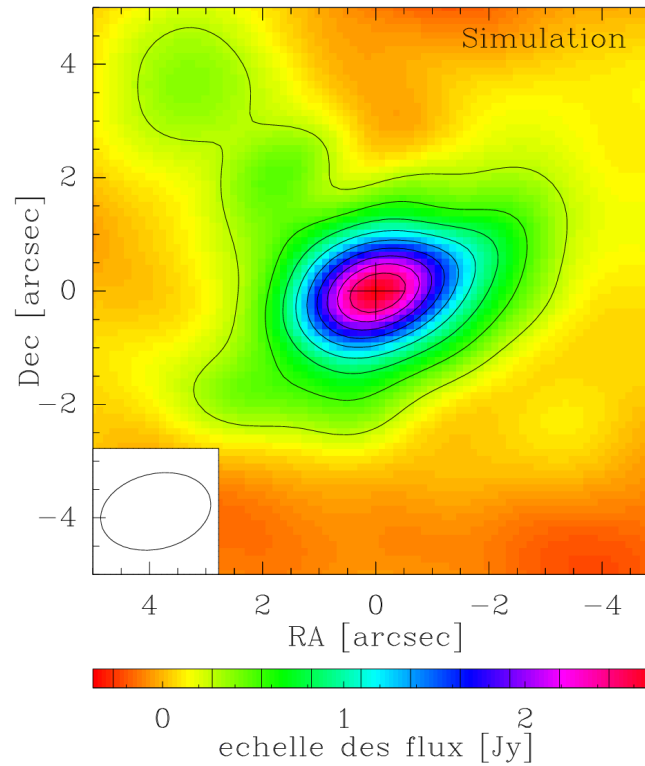
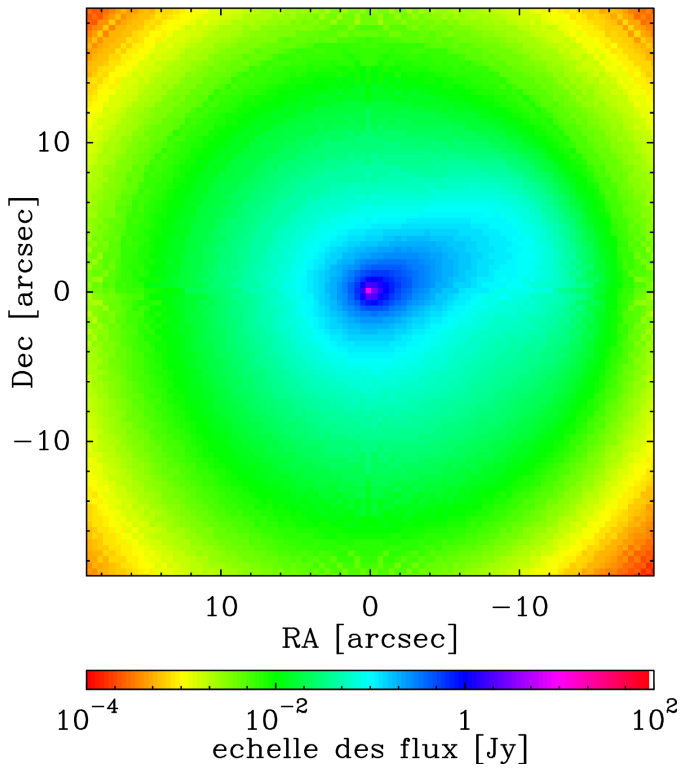
- ⑥ profil en $\sigma^{-1.18 \pm 0.01}$ non reproduit par les modèles
- ⑥ modulations reproduites. la meilleure simulation est déterminée par un test du χ^2



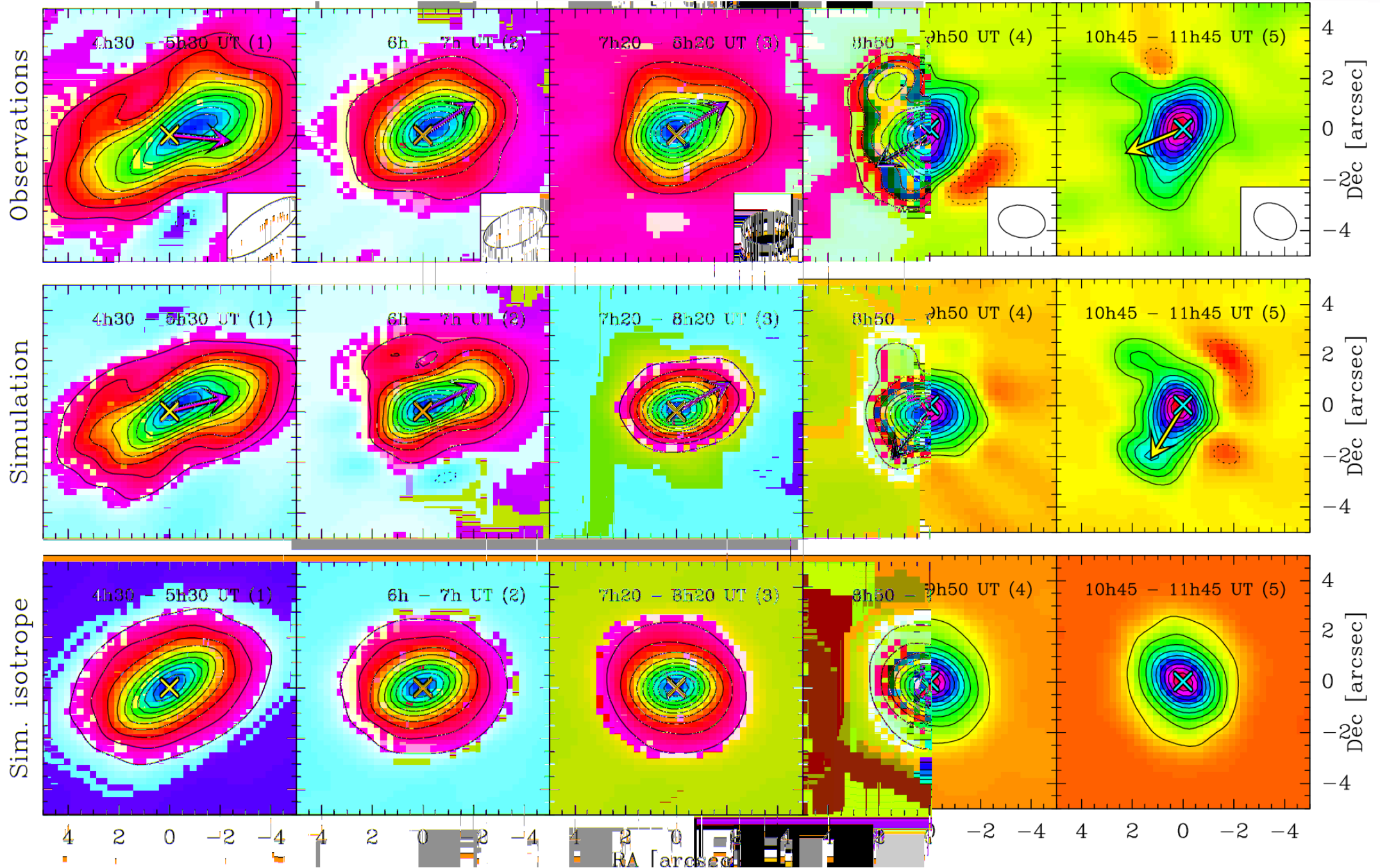
Modèle retenu : comparaison des cartes interférométriques



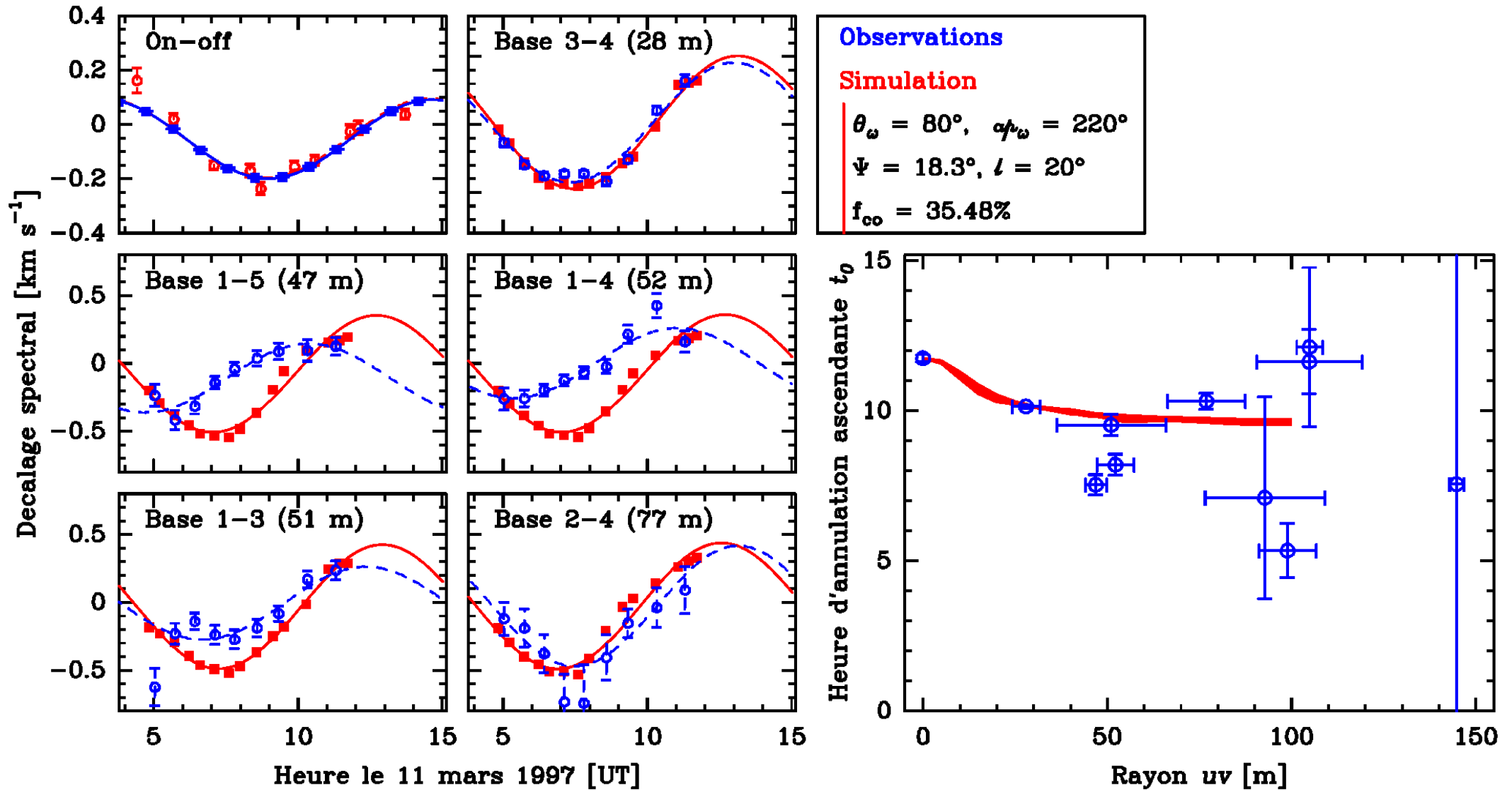
$$\ell = 20^\circ, \Psi = 18^\circ, f_{CO} = 35\%, \theta_\omega = 80^\circ, ap_\omega = 220^\circ$$



Modèle retenu : comparaison des cartes interférométriques temporelles



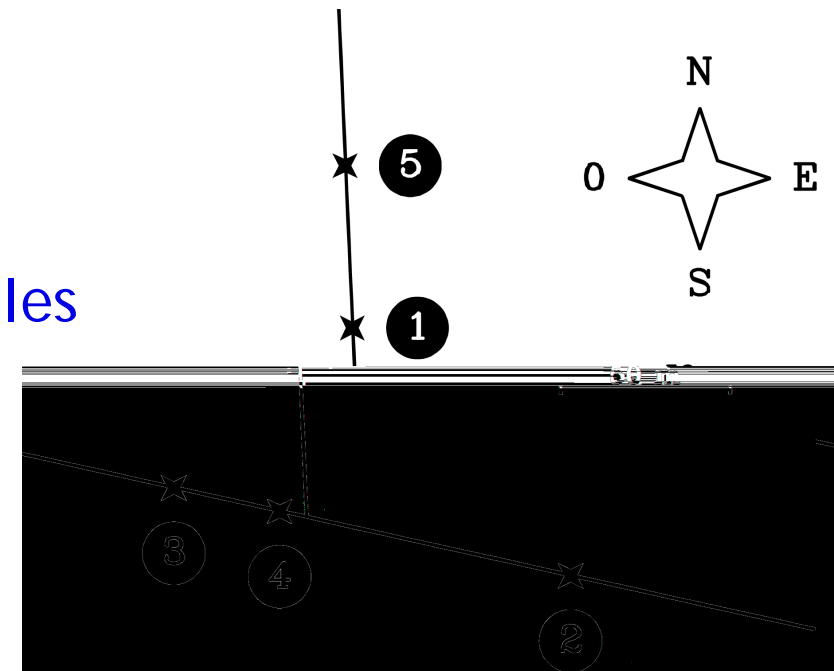
Simulation des décalages spectraux interférométriques



Simulation des décalages spectraux interférométriques



- ⑥ Accord pour les lignes de base 3-4 et 2-4, désaccord pour 1-5, 1-4 et 1-3.
- ⑥ Désaccord au niveau des amplitudes
 - > une vitesse plus grande dans le jet réduit les différences
- ⑥ Désaccord au niveau des t_0
 - > gradient de vitesse dans le jet ?
 - > jet conique et/ou structure en spirale trop simplistes ?





- ⑥ CO dans Hale-Bopp : $\ell = 20^\circ$, $\Psi = 18^\circ$, $f_{CO} = 35\%$, $\theta_\omega = 80^\circ$, $ap_\omega = 220^\circ$
- ⑥ autres molécules observées au Plateau de Bure dans la comète Hale-Bopp :
 - △ HCN : $\Delta v < 0$, opposition de phase avec CO
 - △ H₂CO : $\Delta v < 0$, en phase avec CO pour la partie diurne
 - △ CS : déphasé par rapport aux autres, actif jour et nuit
- ⑥ Jorda *et al.*, 1999 : 2 jets à hautes latitudes
- ⑥ Vasundhara & Chakraborty, 1999 : jets à des latitudes de $+65^\circ$, $+5^\circ$ et -5°
- ⑥ Lederer & Campins, 2002 : jets de OH, CN et C₂ à des latitudes multiples

} poussières

-> ces différences sont-elles normales ?

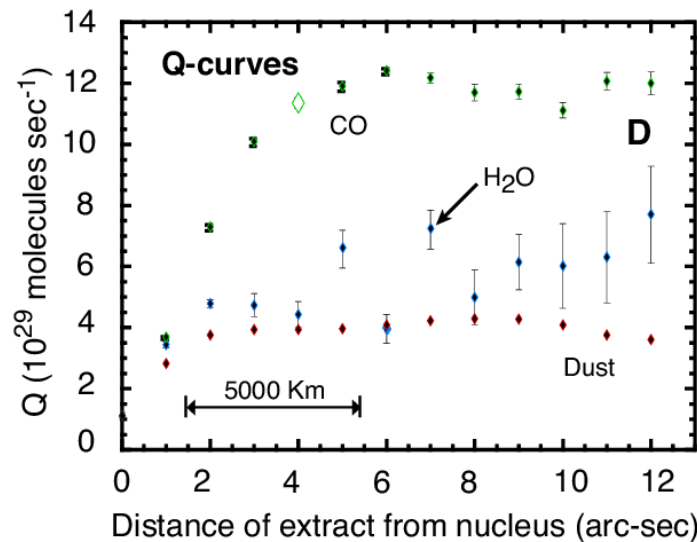
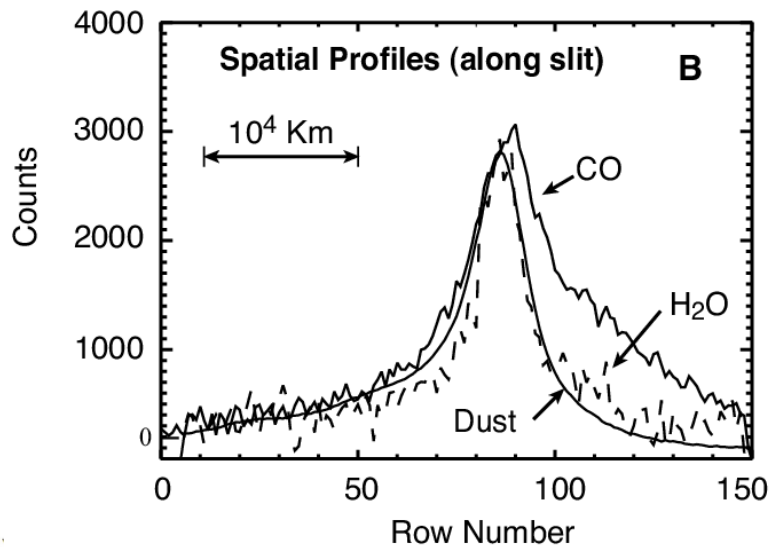
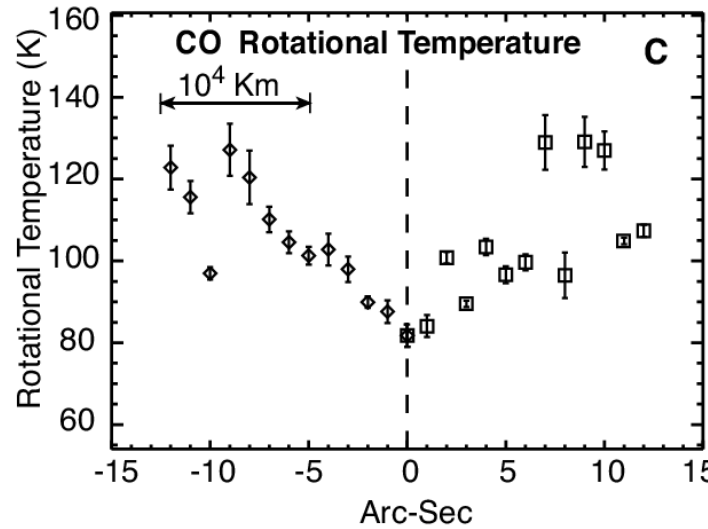
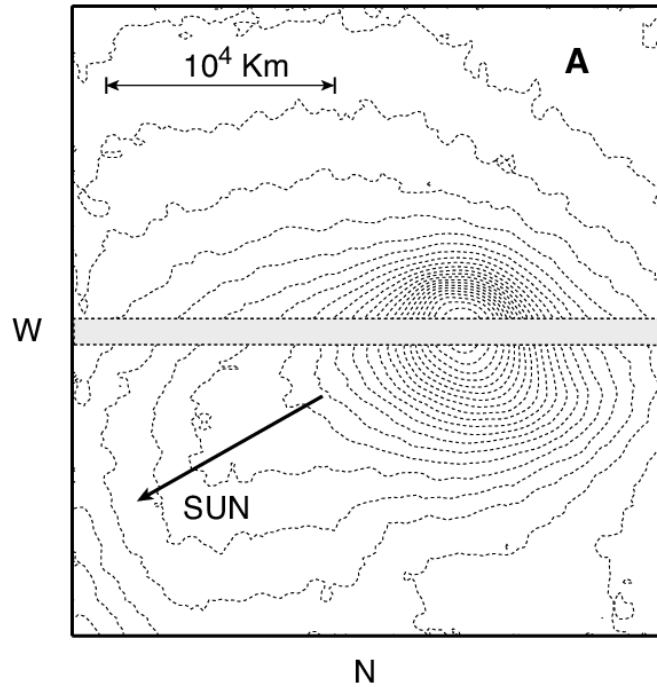


Nature de CO dans la comète Hale-Bopp

C/1995 O1 Hale-Bopp
UT 1997 May 01.2

DiSanti *et al.*, *Icarus*,
 2001 :

- ⊗ 50% nucléaire
- ⊗ 50% étendu
- ⊗ longueur d'échelle
 du parent
 ~5000 km



Modèle dans le cas d'une source étendue

Modèle isotrope pour :

- ⑥ transfert de rayonnement optiquement mince
- ⑥ \neq températures cinétiques
- ⑥ \neq contributions de la source étendue au CO de la coma
- ⑥ \neq longueurs d'échelle du parent de CO

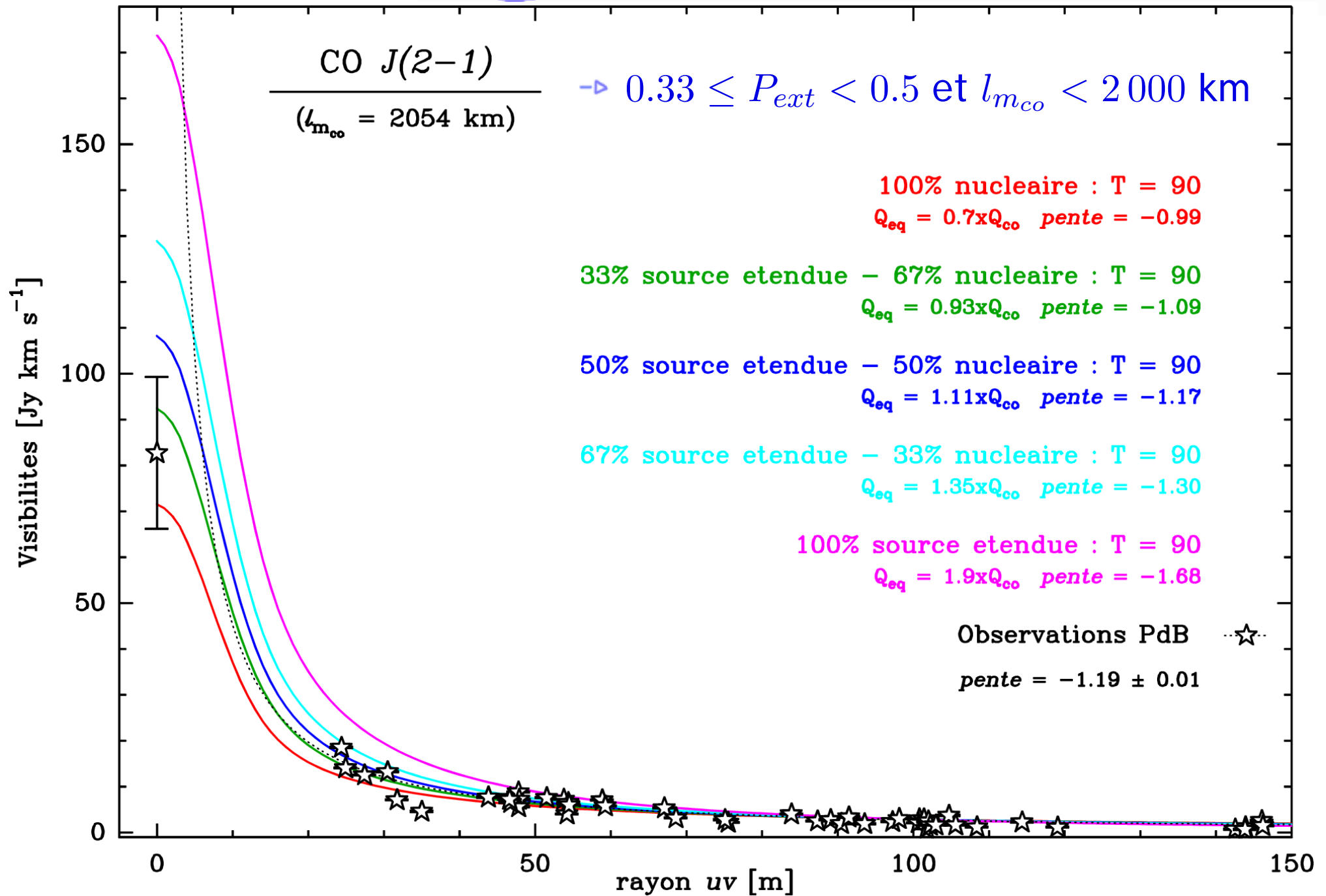
2 contraintes :

- ⑥ la pente en $\sigma^{-1.18 \pm 0.01} \rightarrow$

- ⑥ la position du point on-off sur la courbe d'évolution des visibilitéés

P_{ext}	longueur d'échelle du parent à 1 UA.		
	2 000 km	4 000 km	10 000 km
0.00	-1.00	-1.00	-1.00
0.33	-1.09	-1.05	-1.02
0.50	-1.17	-1.10	-1.04
0.67	-1.30	-1.21	-1.10
1.00	-1.67	-1.74	-1.79

Modèle dans le cas d'une source étendue



Modèle dans le cas d'une source étendue

Mais :

- ⑥ CO $J(1-0)$ uniquement compatible avec CO nucléaire à 100% (pente $\sigma^{-0.78 \pm 0.05}$)
- ⑥ effets d'opacité sur la raie CO $J(2-1)$ négligés
 - > source nucléaire uniquement ?

- ⑥ identification d'un jet spiral de CO
- ⑥ calcul des paramètres tels que la position, l'ouverture et l'intensité
- ⑥ améliorations à apporter :
 - △ prise en compte des effets d'opacité
 - △ variation de la vitesse dans la coma
 - △ variation de la forme du jet
 - △ intégration des modèles hydrodynamiques de Crifo *et al.*
- ⑥ futur : méthode d'analyse développée ici utilisable avec ALMA jusqu'en 2007 au moins.



ALMA at Chajnantor
(Courtesy NAOJ)

ESO PR Photo 14/01 (6 April 2001)

© European Southern Observatory





FIN

