



Observatoire **astronomique**

de Strasbourg | ObAS



Séminaire, Collège de France, 16 janvier 2023

Le grand relevé ALPINE

Matthieu Béthermin
ObAS / LAM



A la mémoire
d'Olivier Le Fèvre, PI
d'ALPINE



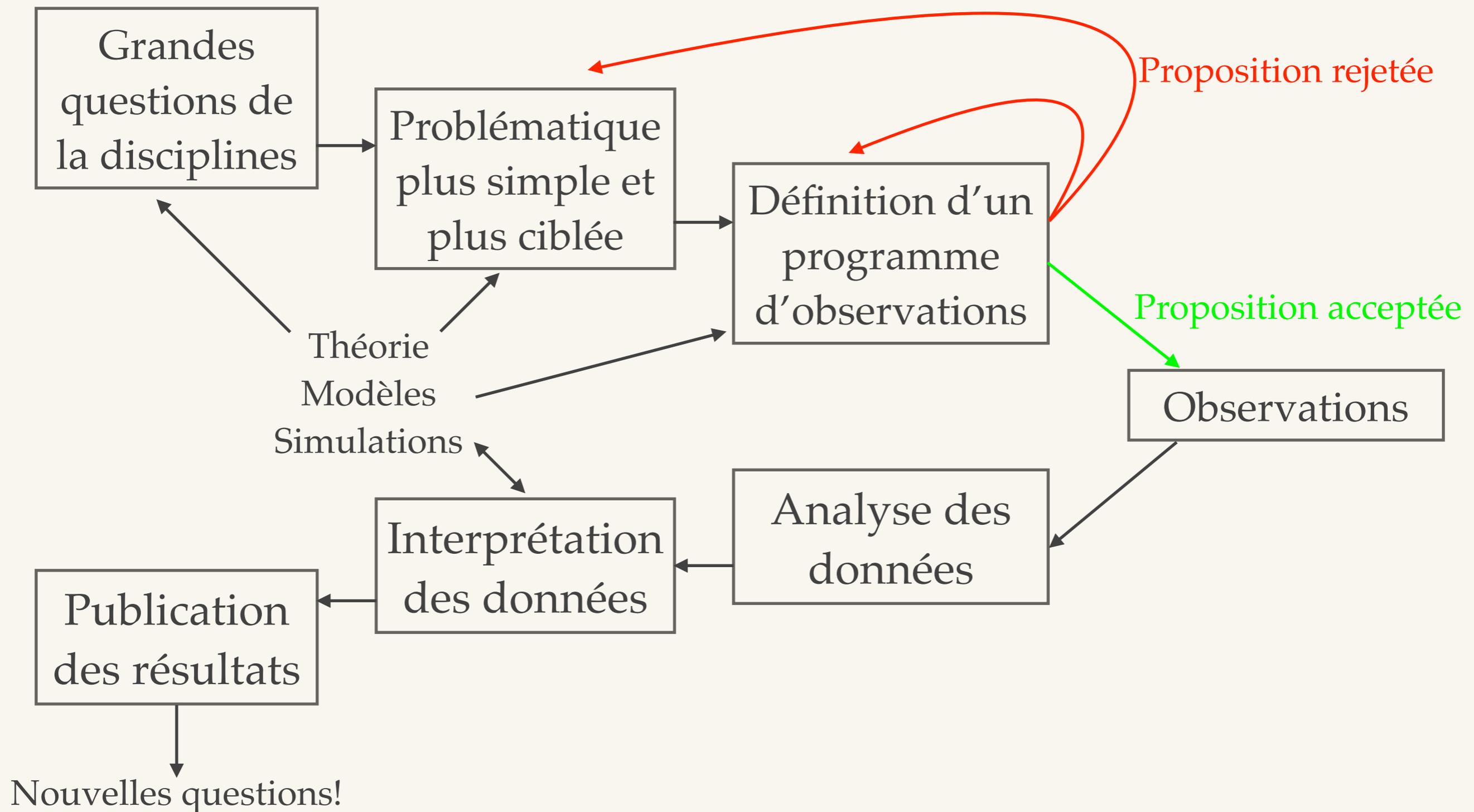
Explication du titre

- ❖ **Relevé de galaxies:** Observations systématiques et homogènes d'une région du ciel ou d'un échantillon d'objets sélectionnés selon des critères précis. Il peut s'agir de photométrie ou de spectroscopie.
- ❖ **ALPINE:** The Alma Large Program to INvestigate [CII] at Early times

Grand programme ALMA pour étudier [CII] à des époques précoces



Des questions fondamentales aux résultats



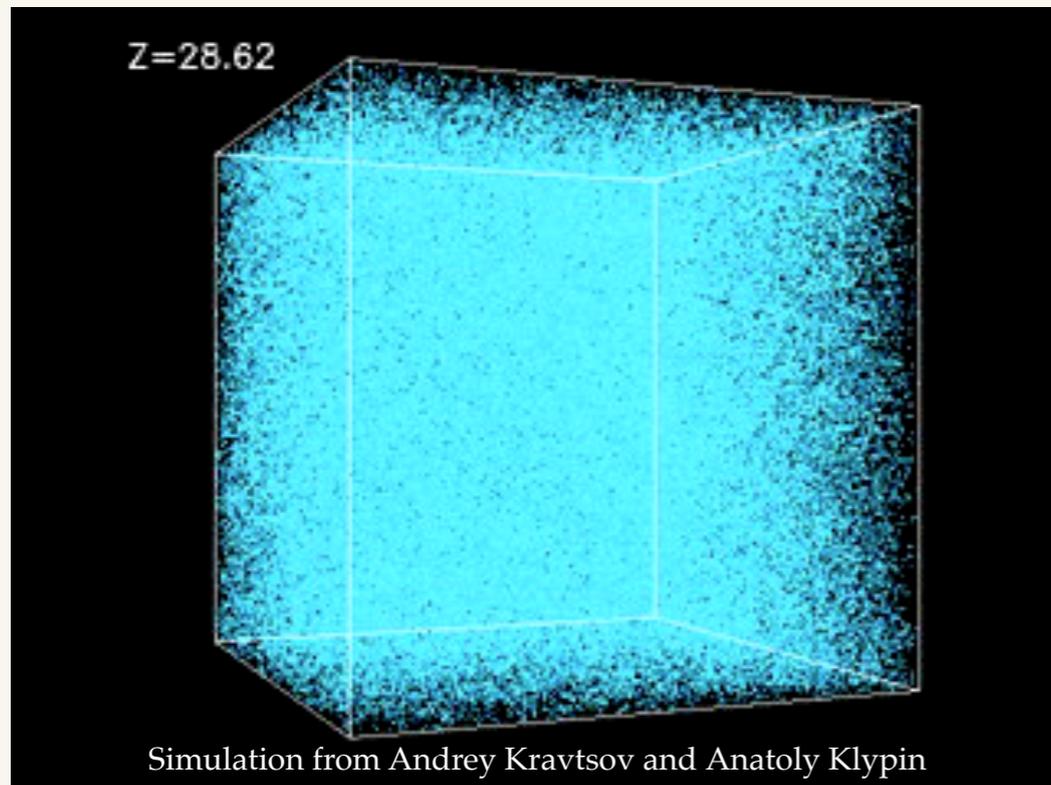
Structure de ce séminaire

1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. Construction du programme ALPINE
4. Observations et réduction des données
5. Interprétation et résultats principaux
6. Nouvelles questions et perspectives

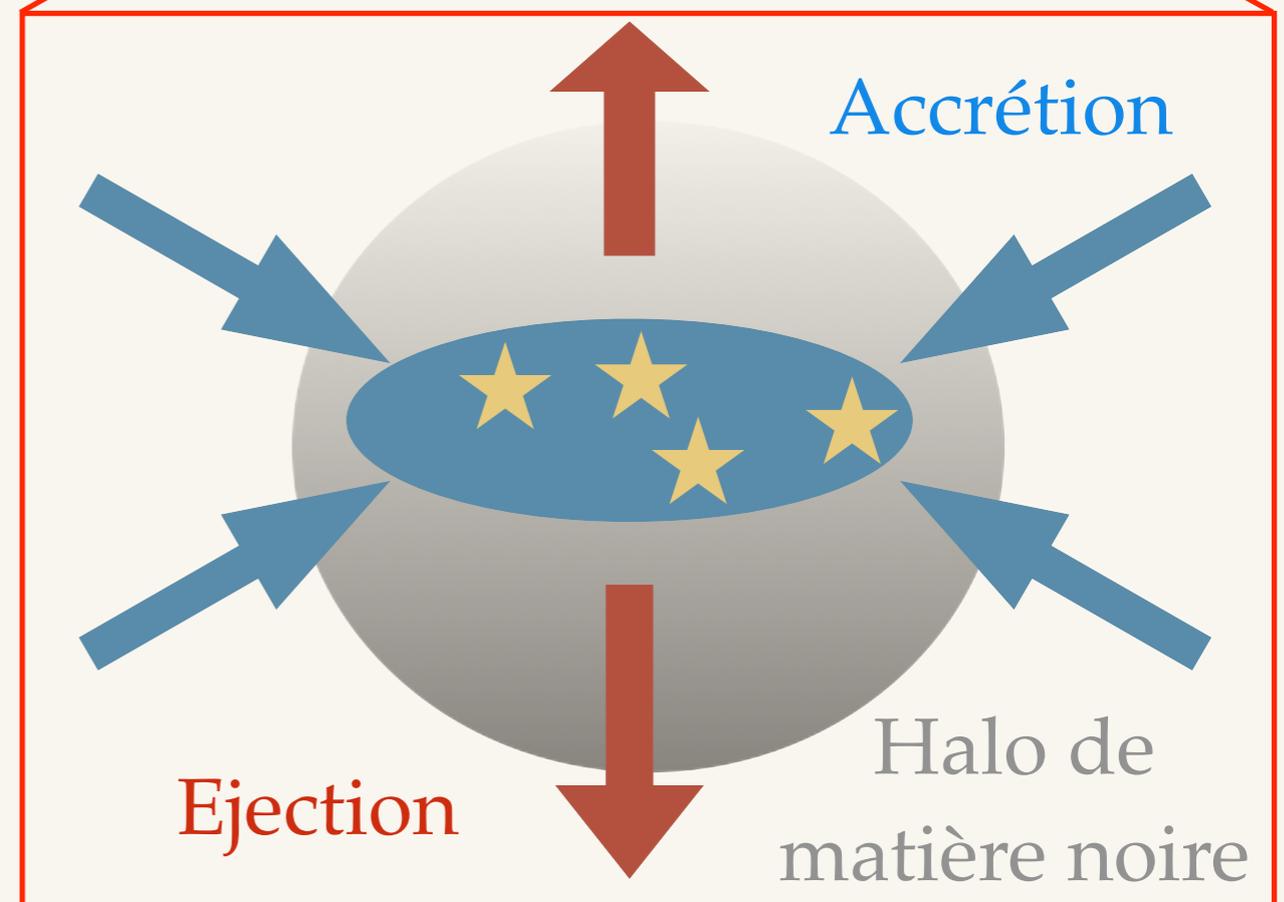
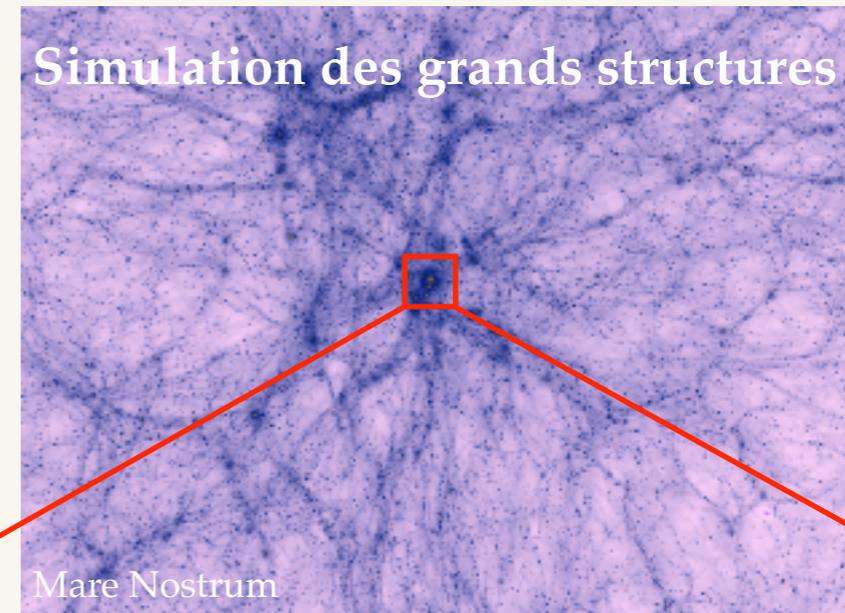
Structure de ce séminaire

1. **Contexte scientifiques avant ALPINE**
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. Construction du programme ALPINE
4. Observations et réduction des données
5. Interprétation et résultats principaux
6. Nouvelles questions et perspectives

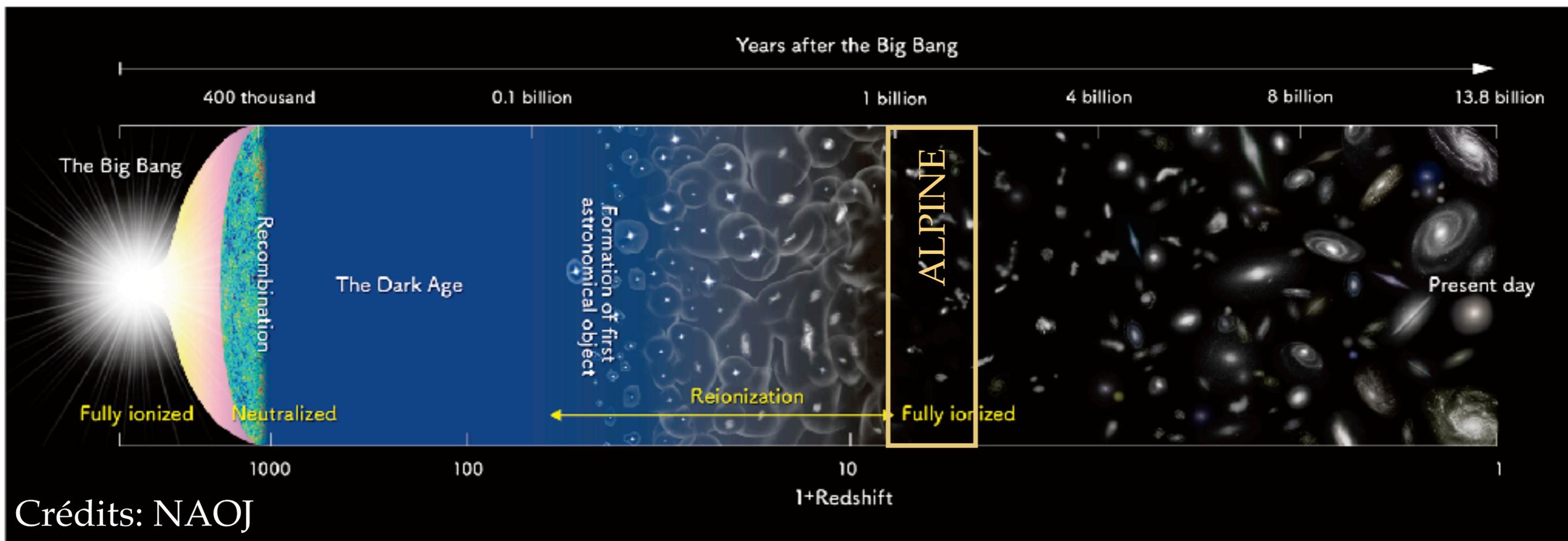
Comprendre la formation des galaxies



- ❖ L'effondrement des grandes structures de matière noire est relativement bien comprise.
- ❖ En revanche, les galaxies sont des systèmes plus complexes hébergeant de nombreux phénomènes physiques (formation d'étoiles, accrétion et éjection de gaz, noyaux actifs...)



Les galaxies à la fin de la réionisation



- ❖ Les galaxies se forment à partir des hétérogénéités de l'Univers primordiales qui croissent sous l'effet de la gravité
- ❖ ALPINE se concentre sur la fin de la période au cours de laquelle l'Univers a été réionisé par les premières galaxies (voir séminaire de Dominique Aubert)

Les galaxies à la fin de la réionisation

Notion de décalage vers le rouge

Le décalage vers le rouge (ou **redshift** en anglais) est causé par l'expansion de l'Univers entre l'émission et la réception d'un photon. On le note z :

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0}$$

Longueur d'onde observée
Longueur d'onde émise

Plus z est grand et plus on observe un objet dans le passé. Un z donné correspond à un temps précis dans le passé. Attention, ce n'est pas une relation linéaire.



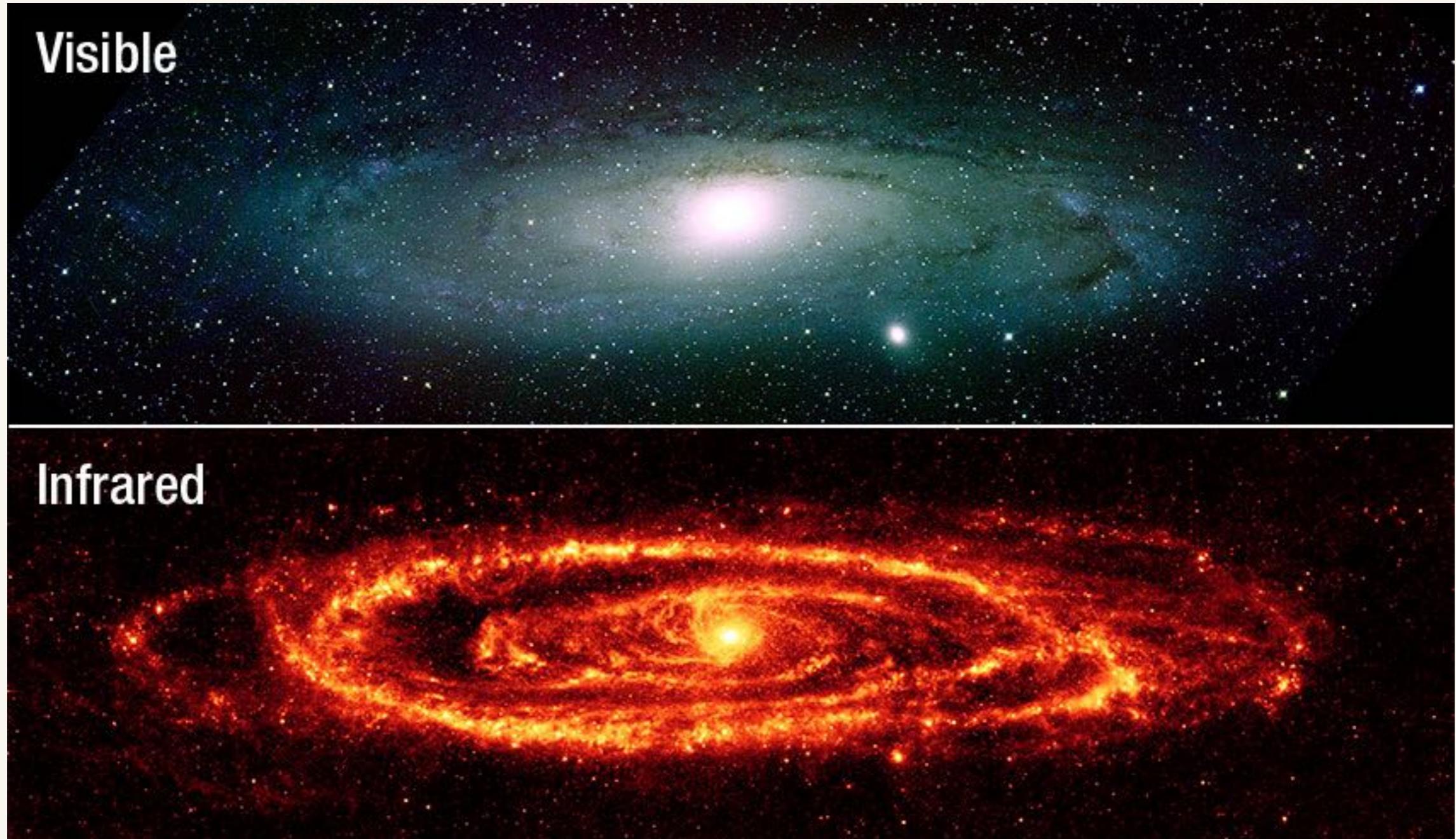
Crédits: NAOJ

- ❖ Les galaxies qui croissent
- ❖ ALPINE a été réionisée



mordiales
Univers a
ue Aubert)

Formation d'étoiles dans la poussière

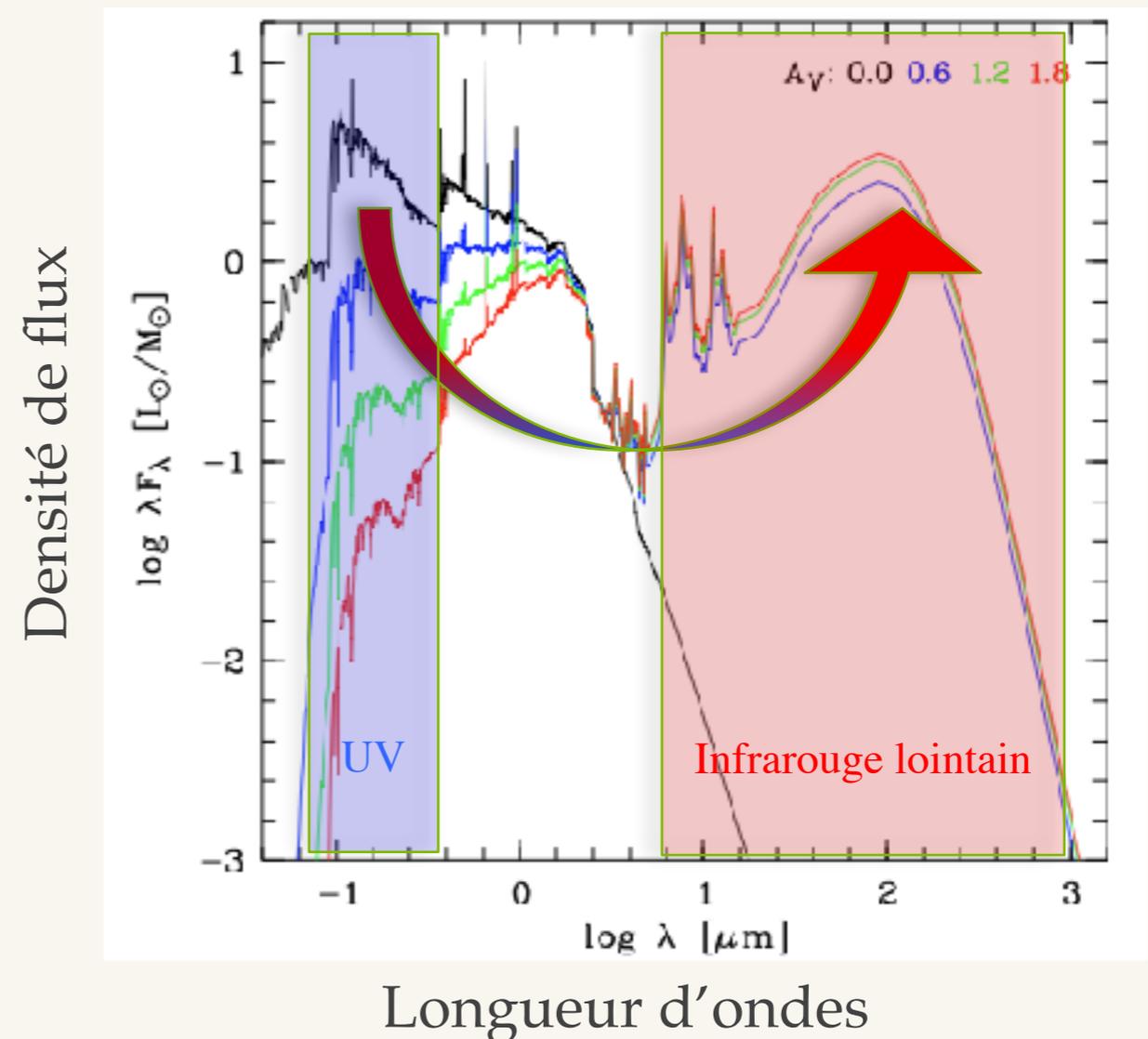


Credit: NASA / Spitzer

Formation d'étoiles dans la poussière

- ❖ L'émission UV des galaxies est dominée par les jeunes étoiles massives (à vies courtes)
=> traceur de formation d'étoiles récente
- ❖ MAIS, la poussière absorbe une partie de ce rayonnement et le ré-émet dans l'infrarouge lointain
- ❖ Il faut donc sommer les deux contributions pour avoir le taux de formation d'étoiles total (SFR en anglais):

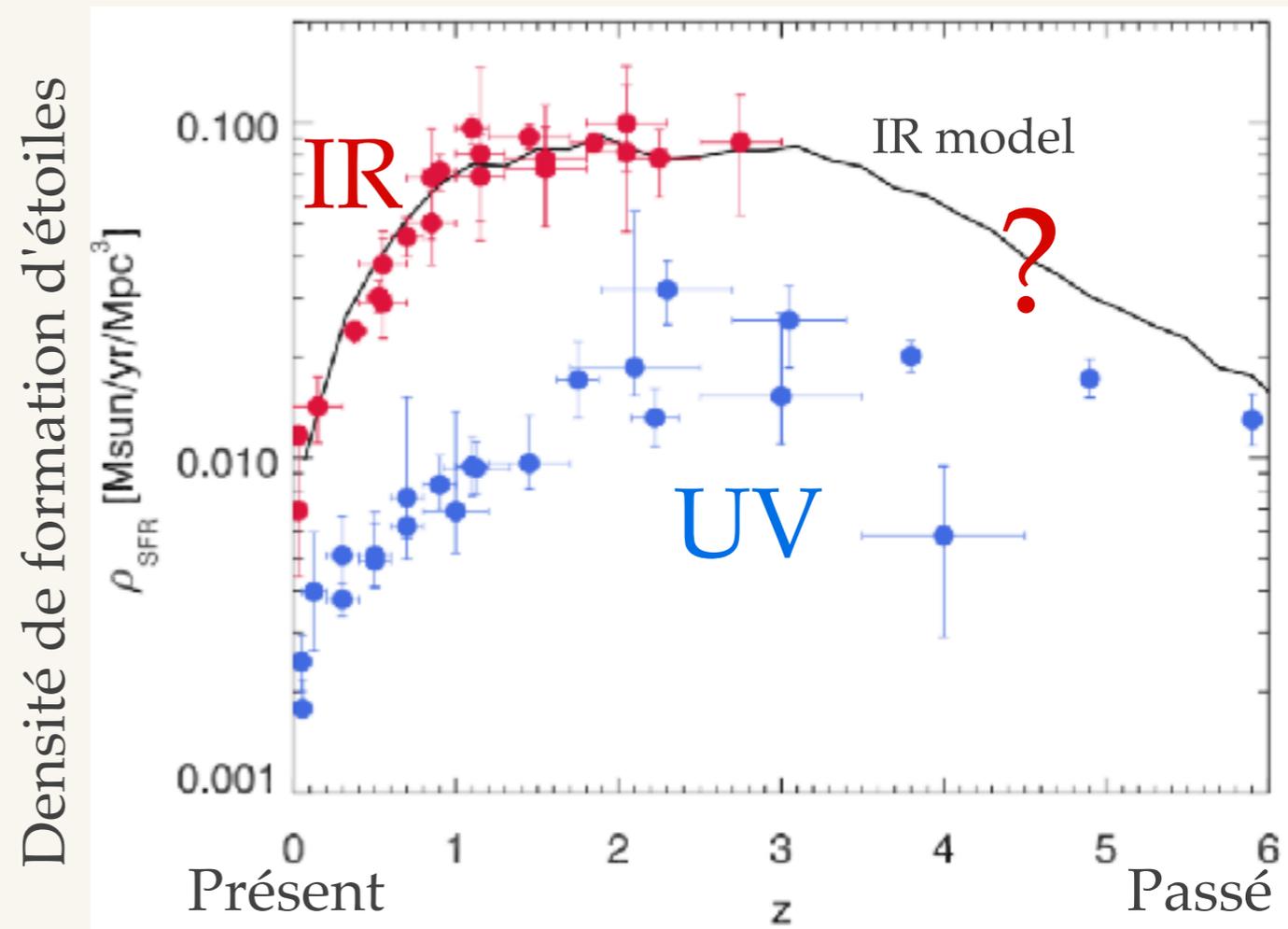
$$\text{SFR}_{\text{tot}} = \text{SFR}_{\text{IR}} + \text{SFR}_{\text{UV}} = k_{\text{IR}} L_{\text{IR}} + k_{\text{FUV}} L_{\text{FUV}}$$



Spectral energy distribution of a galaxy
(Noll+09)

Histoire de formation d'étoiles

- ❖ Le formation d'étoiles tracée par l'**infrarouge** est plus importante que l'**UV** depuis 12 milliards d'années
- ❖ La poussière a besoin d'éléments "lourds" formés par les étoiles pour se former.
- ❖ A partir de quand l'UV arrête de dominer le budget?
Manque-t-on une fraction importante de la formation d'étoiles?

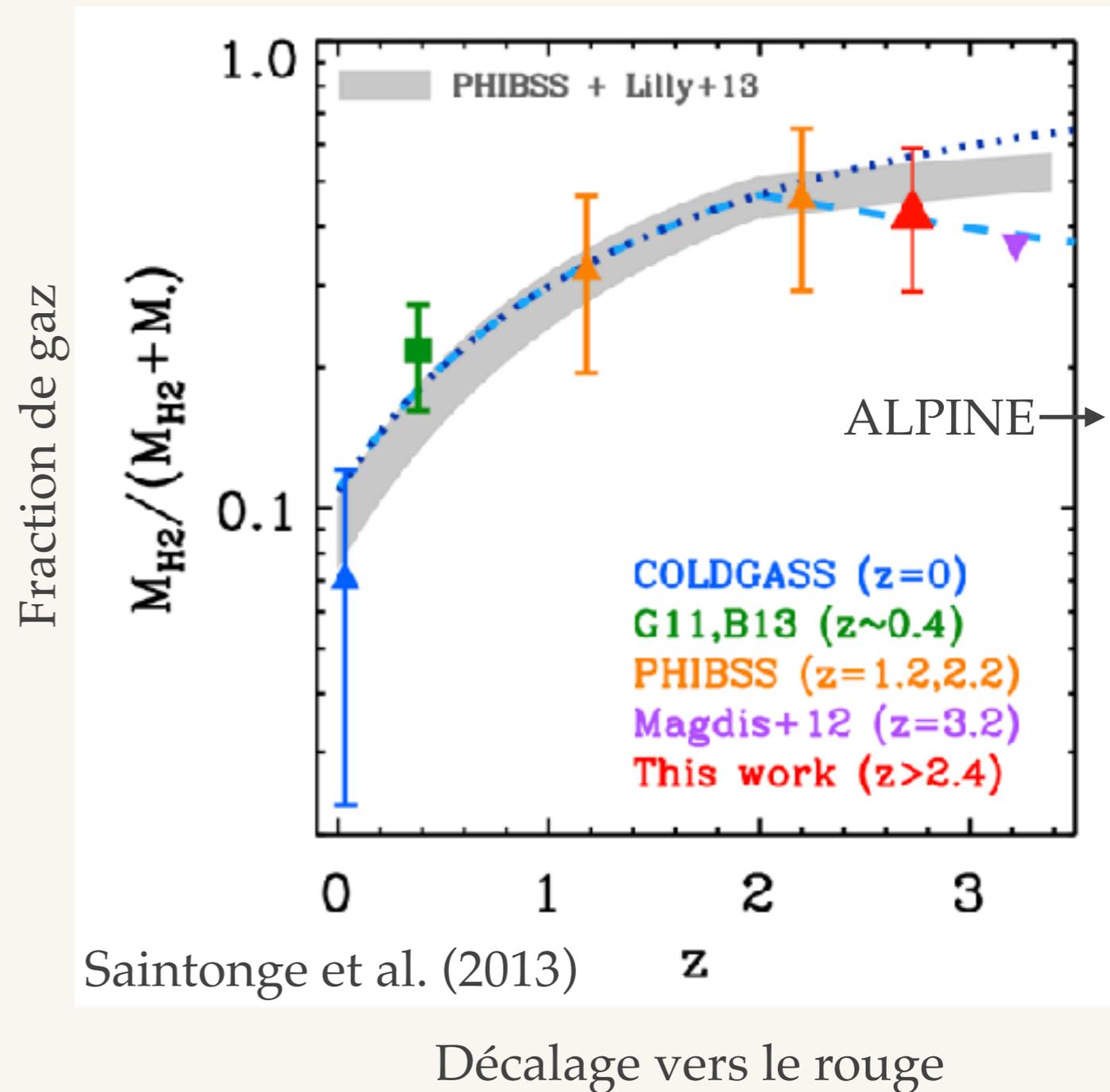


Décalage vers le rouge

Histoire de formation d'étoiles
(adapté de Madau & Dickinson 2014)

Réservoirs de gaz des galaxies

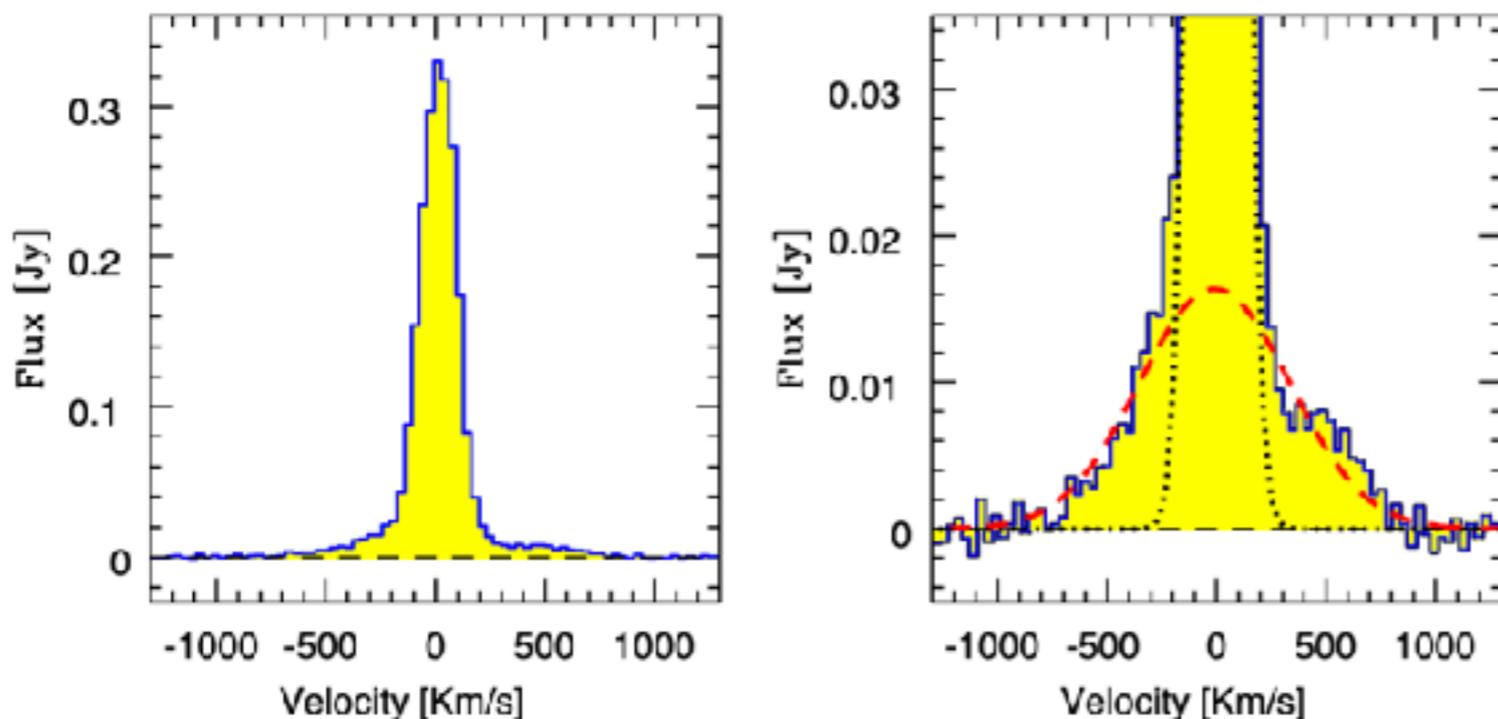
- ❖ Les galaxies observées à grand z forment beaucoup d'étoiles ($>100 M_{\odot}$ / an pour certaines)
- ❖ Est-ce causé par:
 - d'important réservoirs de gaz?
 - une conversion rapide du gaz en étoiles?
- ❖ Quel est le contenu en gaz des galaxies aux époques les plus reculées?



Cinématique du gaz

- ❖ La forme des raies d'émission nous renseigne sur la vitesse du gaz dans un système.
- ❖ Ceci peut nous permettre de:
 - détecter des éjections de gaz
 - mettre en évidence des fusions de galaxies
 - estimer la masse des systèmes

Feruglio et al. (2010)



Définition de la vitesse en radioastronomie ($V \ll c$):

$$V^{radio} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu_0} c$$

Fréquence de référence

Fréquence observée

Structure de ce séminaire

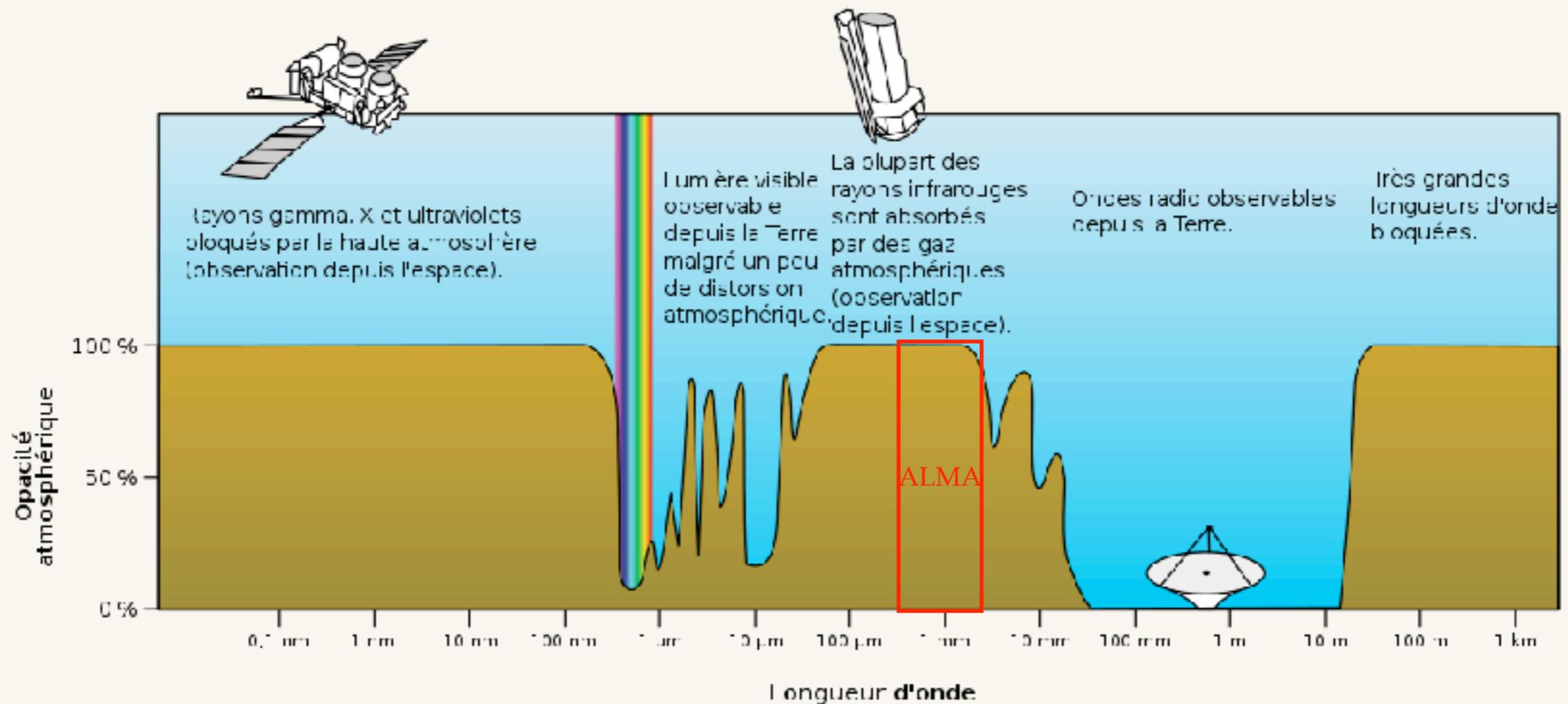
1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. **ALMA, un interféromètre millimétrique géant**
3. Construction du programme ALPINE
4. Observations et réduction des données
5. Interprétation et résultats principaux
6. Nouvelles questions et perspectives

ALMA

- ❖ Collaboration ESO/NRAO/NAOJ
- ❖ A 5000 mètres d'altitude dans le désert d'Atacama
- ❖ Réseau principal de 50 antennes de 12 mètres de diamètre avec un configuration variable
- ❖ Réseaux complémentaires: 12 antennes de 7 mètres en configuration compacte fixe et 4 antennes "puissance totale"
- ❖ Amélioration d'un ordre de grandeur par rapport à la précédente génération



Couverture en longueur d'ondes



Source wikipédia, adapté d'une illustration NASA

Pourquoi un réseau d'antennes?

$$\theta \text{ (en degré)} = 69,9 \times \frac{\lambda \text{ (en m)}}{D \text{ (en m)}}$$

Résolution de Hubble = **0.06''**
600 nm (jaune)

Même résolution à 1mm =>
télescope de **4 km** de diamètre!!!



- ❖ En première approximation, un interféromètre est équivalent à un télescope de la taille du réseau en terme de résolution angulaire.
- ❖ Par contre, la surface collectrice effective est la somme de celles de toutes les antennes. Un interféromètres très entendu ne peut donc détecter que des objets avec une forte brillance de surface.

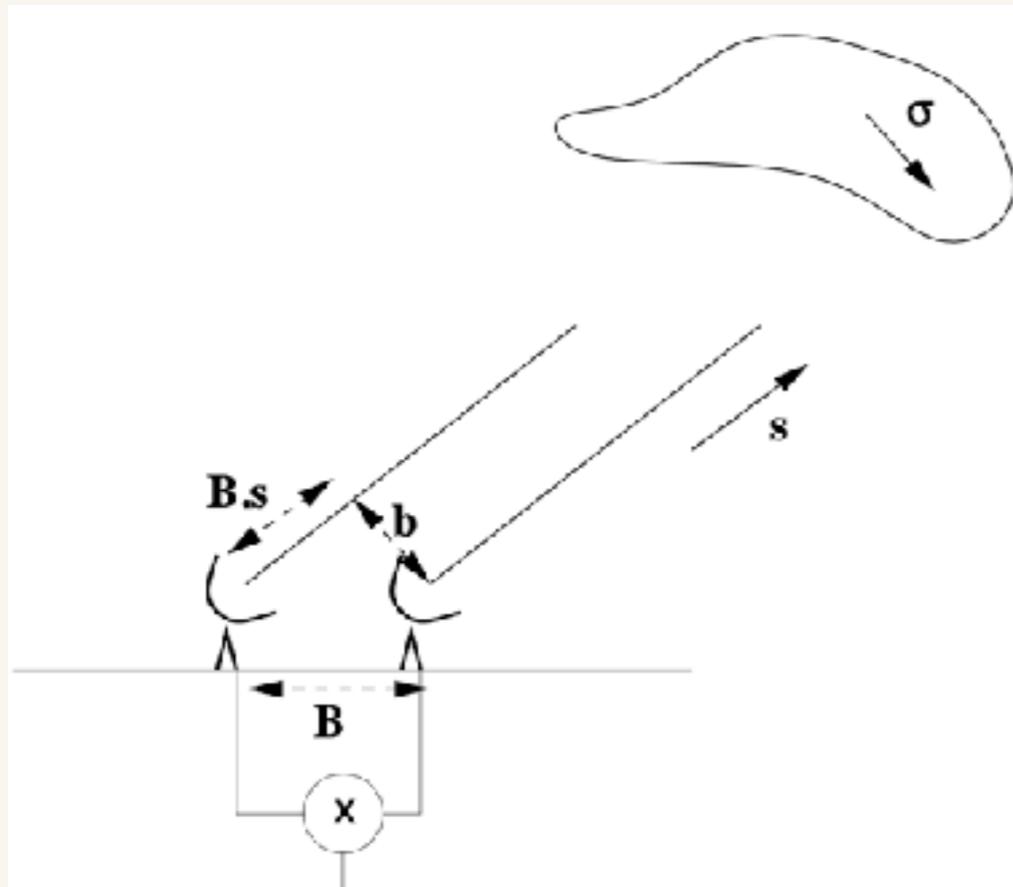
Aspects mathématiques

Réponse de l'interféromètre

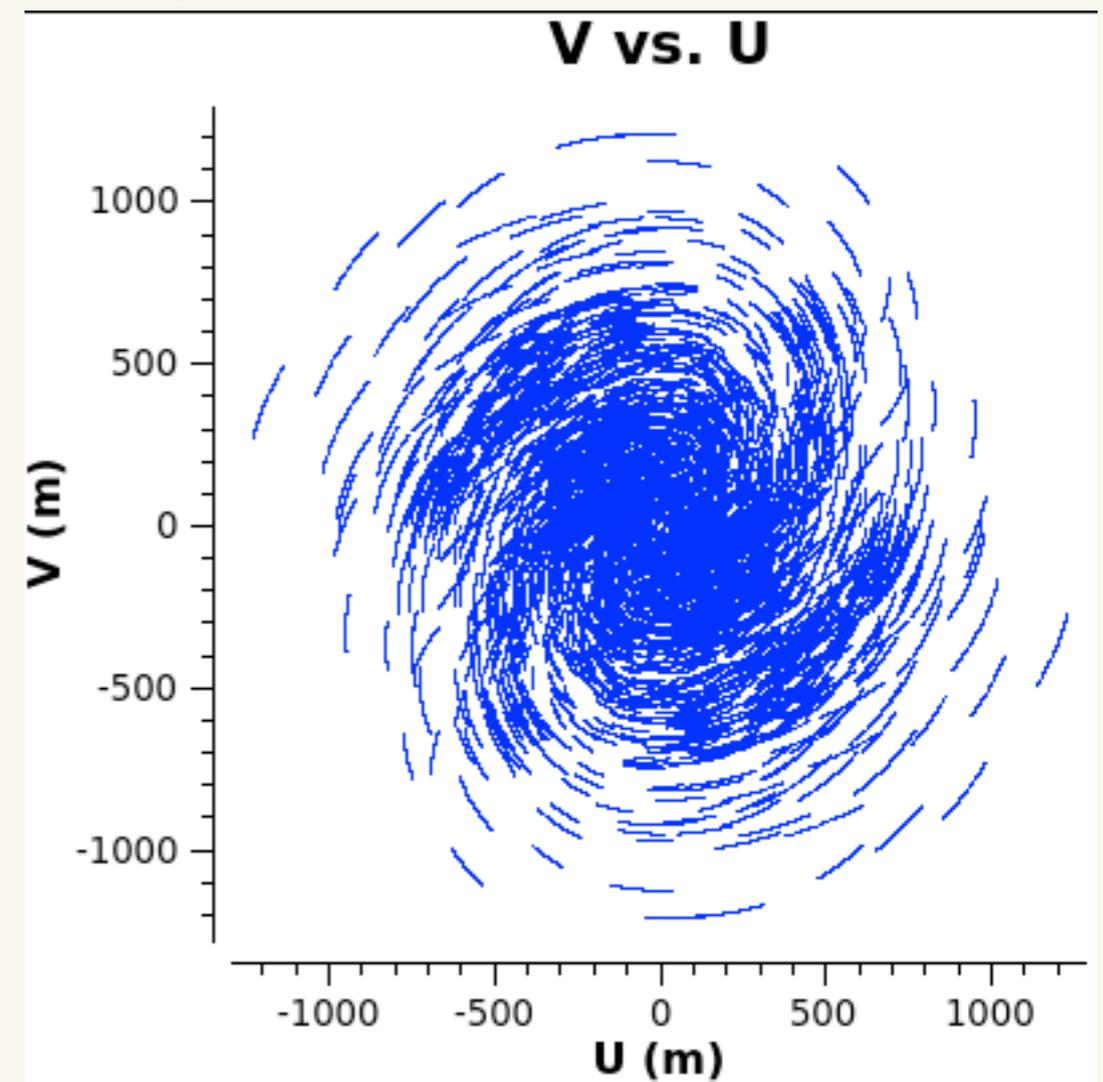
$$R = e^{ik\mathbf{B}\cdot\mathbf{s}} \int I(\sigma) e^{ik\mathbf{b}\cdot\sigma} d\sigma,$$

Facteur dépendant de la géométrie de l'interféromètre

Facteur dépendant du ciel (transformée de Fourier)



Couverture du plan de Fourier par une observation ALMA



Extrait de la thèse de Gayathri Gururajan

Structure de ce séminaire

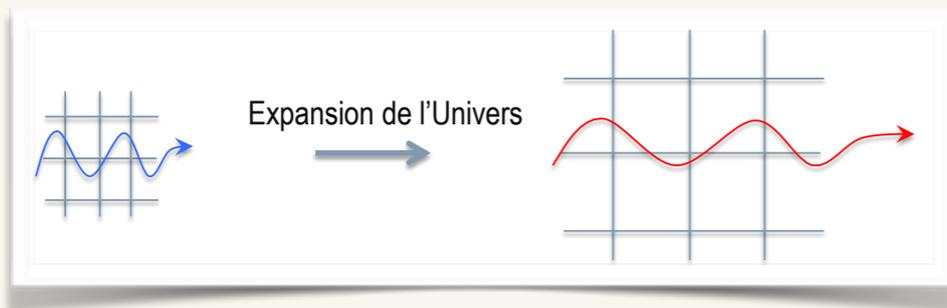
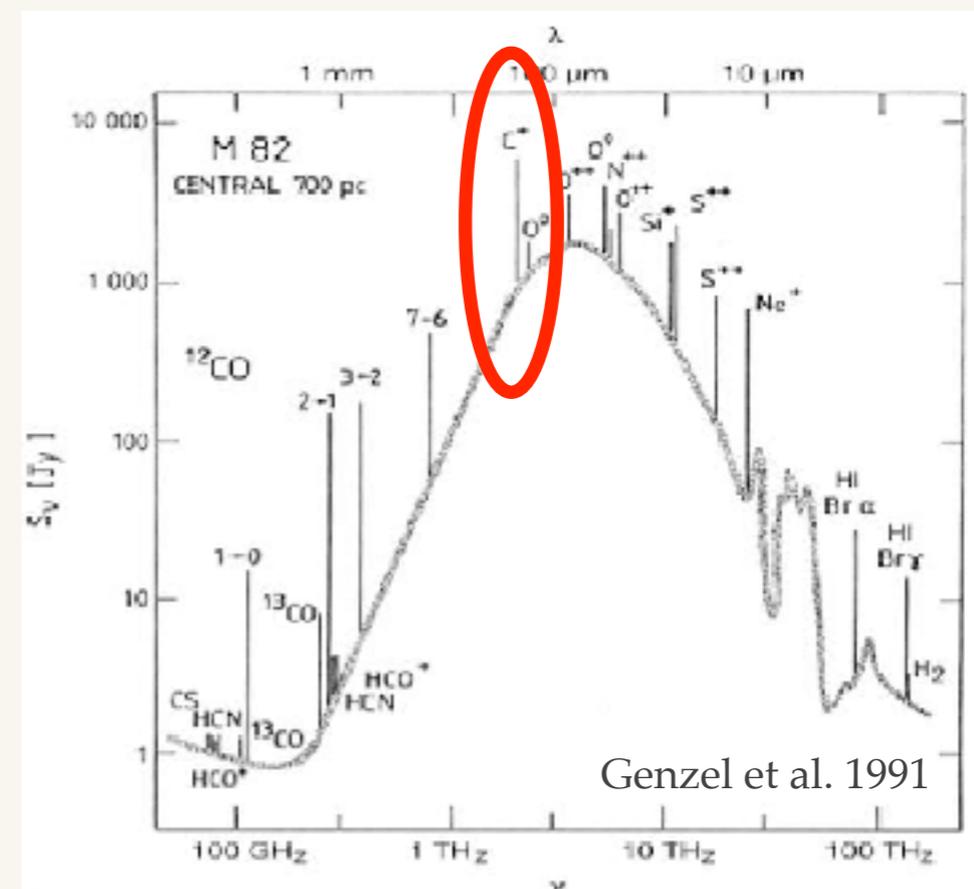
1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. **Construction du programme ALPINE**
4. Observations et réduction des données
5. Interprétation et résultats principaux
6. Nouvelles questions et perspectives

Tracer le gaz avec la raie [CII] à 158 microns

- ❖ [CII] à 158 microns: raie de structure fine du carbone ionisé (C^+) émise par plusieurs phases du milieu interstellaire
- ❖ Proposé à la fois comme traceur du gaz et de la formation d'étoiles
- ❖ Une des raies les plus brillantes des galaxies
- ❖ Le décalage vers le rouge la rend facilement détectable par ALMA à $z > 4$

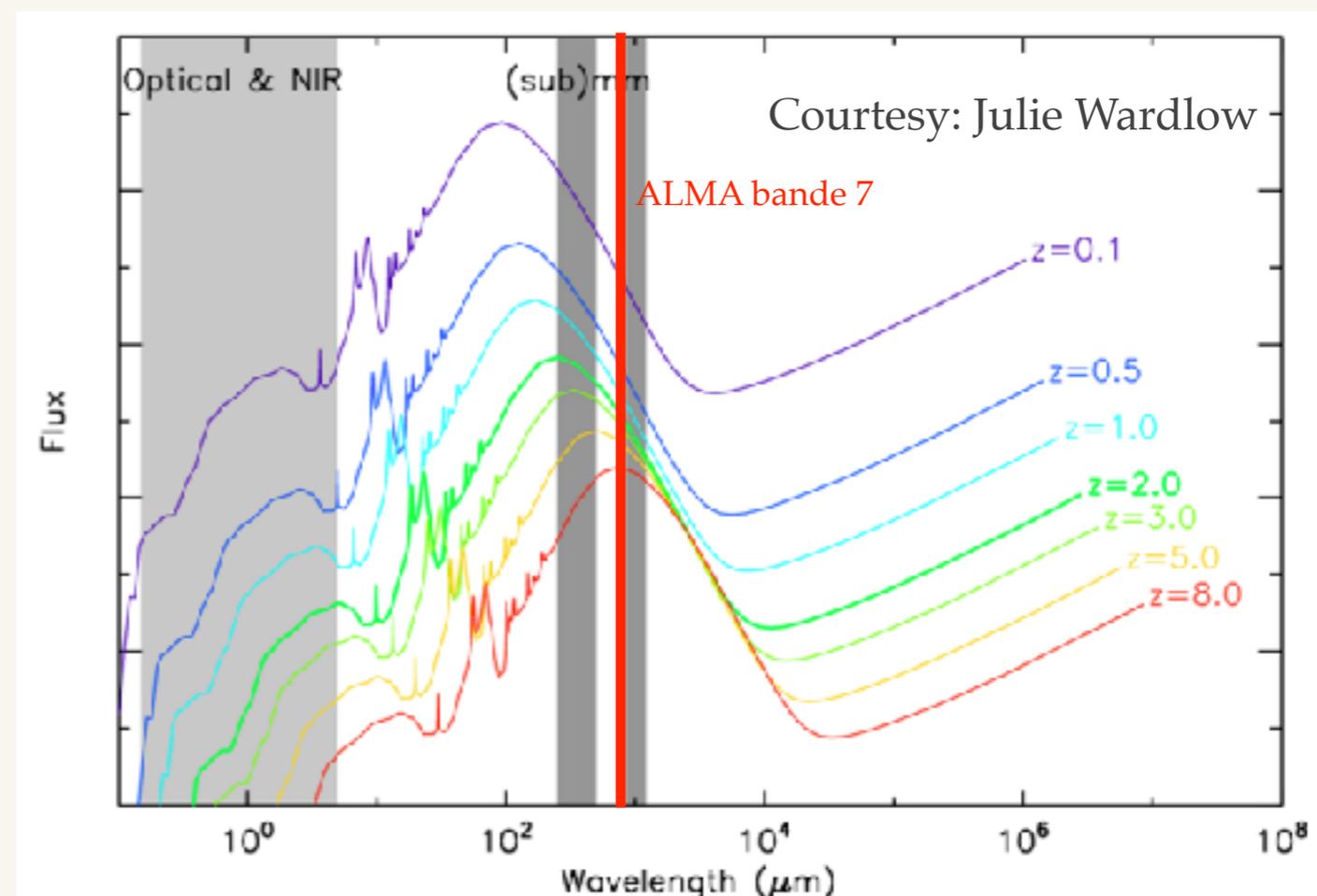


| | | | |
|--------|----------|-------------|-------|
| [NII] | [CI] | | HCN |
| | [CII] | CO | HCO+ |
| [OIII] | | | HNC |
| Ionisé | Atomique | Moléculaire | Dense |



Mesurer la formation d'étoiles avec l'émission de la poussière

- ❖ Contrairement aux raies, l'émission de la poussière est lisse avec la longueur d'onde.
- ❖ Quand on observe [CII], on obtient automatiquement le flux de la poussière autour de la raie (continu).
- ❖ A grand décalage vers le rouge, ALMA observe les galaxies proche du maximum d'émission de la poussière.
- ❖ On peut ensuite en déduire la luminosité infrarouge totale et la formation d'étoiles obscurcie par la poussière après quelques hypothèses.



Longueur d'ondes

Comment choisir la résolution et la sensibilité?

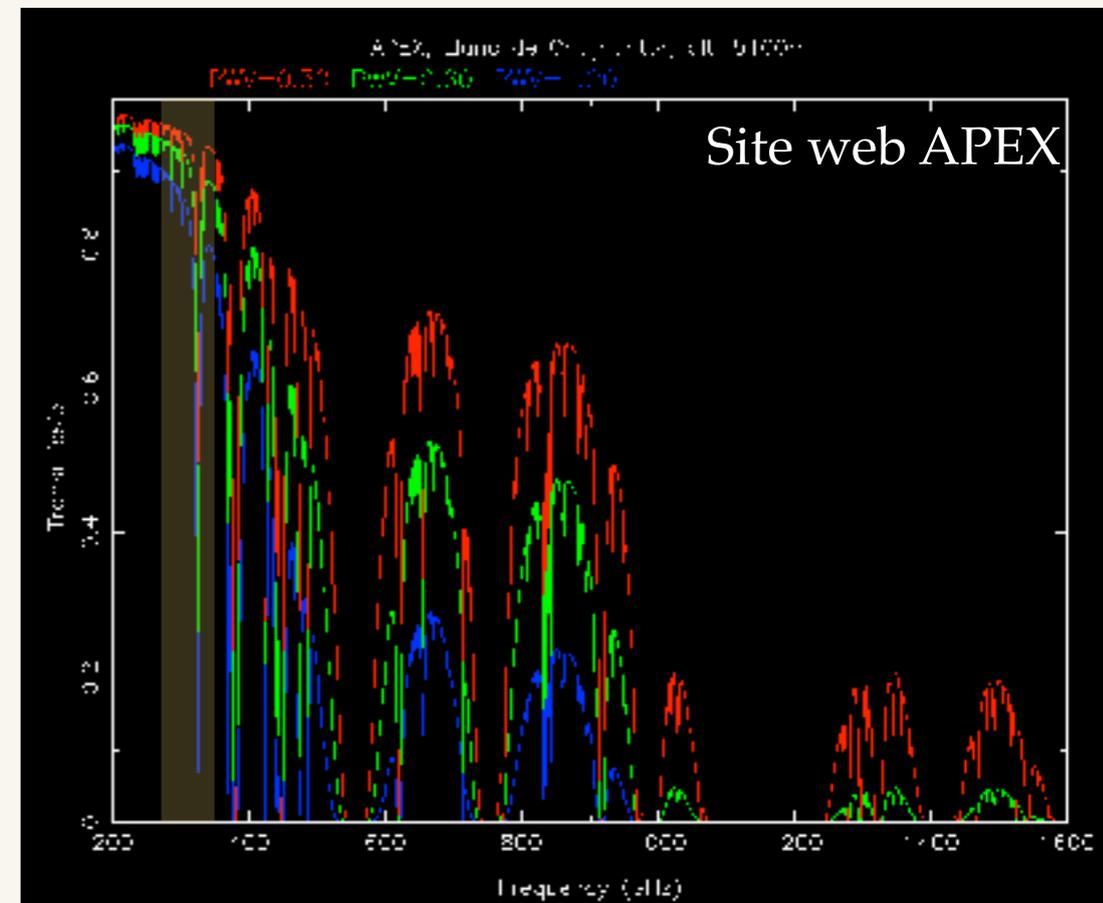
- ❖ **Résolution angulaire:** configuration compacte (1" environ) pour maximiser la sensibilité au flux total
- ❖ **Résolution spectrale:** minimum (~25 km/s) pour limiter la quantité de données car la largeur des raies est 10 fois plus grande
- ❖ **Temps d'intégration:** calculé pour avoir la même sensibilité en luminosité [CII], compromis entre temps total et fraction de détections attendue

Température du système
(bruit)

Sensibilité

$$\sigma_S = \frac{w_r 2 k T_{\text{sys}}}{\eta_q \eta_c A_{\text{eff}} (1 - f_s) \sqrt{N(N-1)} n_p \Delta\nu t_{\text{int}}}$$

Temps d'intégration



Choix de l'échantillon



Rassemblement des deux plus
grands échantillons de
spectroscopie optique à grand z

118 candidats fiables entre $z=4.4$ et 5.9

Structure de ce séminaire

1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. Construction du programme ALPINE
4. **Observations et réduction des données**
5. Interprétation et résultats principaux
6. Nouvelles questions et perspectives

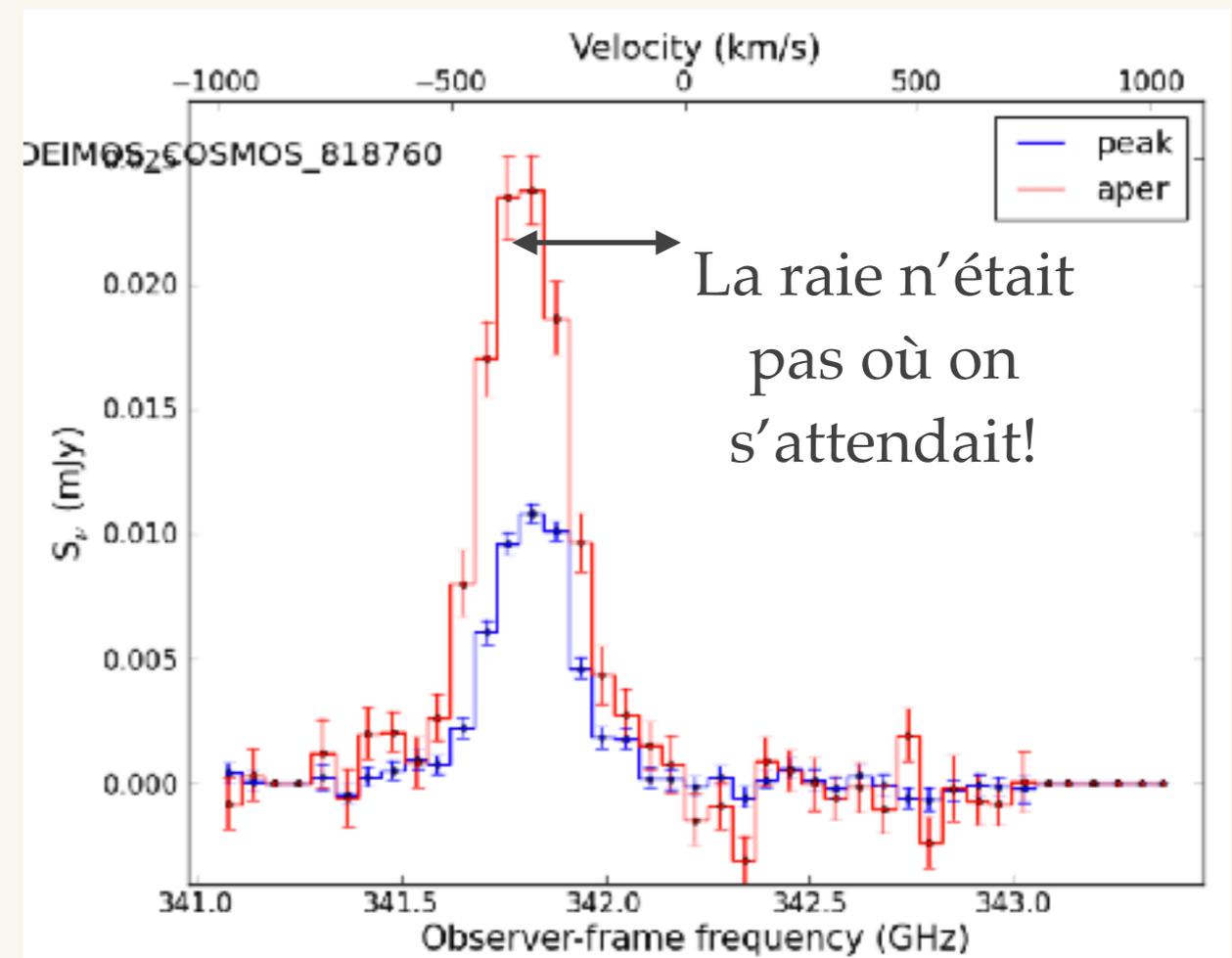
Les observations ALPINE

- ❖ Les paramètres des observations sont vérifiés (et revérifiés!) avant d'être envoyés à l'observatoire.
- ❖ Les observations sont réalisées par un ou une astronome de service quand les conditions (configuration, météo) sont réunies et que les programmes de plus hautes priorités ont été finis.
- ❖ Quand une observation est obtenue, la qualité des données est vérifiée par l'observatoire, puis elles sont calibrées automatiquement par un pipeline de données (ou ré-observée si mauvaise qualité).
- ❖ Finalement, les données sont distribuées dans les différents centres régionaux et mises à disposition de l'équipe.

Des données brutes aux produits de hauts niveaux

- ❖ A partir des données brutes, on reconstruit des cubes de données pour la spectroscopie et des images pour le continu de la poussière.
- ❖ Nous avons une procédure automatique, mais quelques surprises nous ont forcés à modifier notre approche.

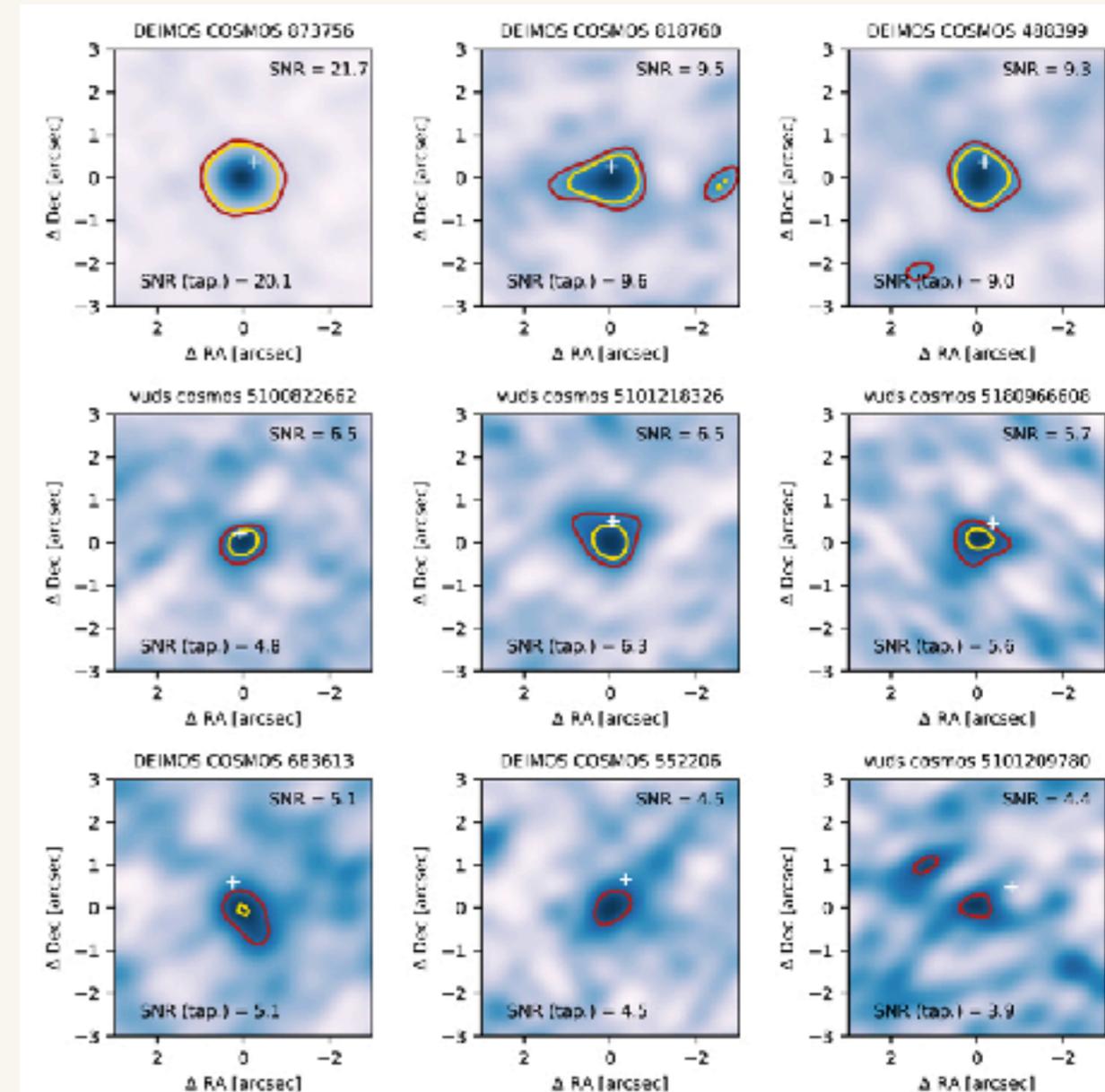
Capture d'écran de la pré-analyse des données



Note: il ne s'agissait pas d'un problème technique mais du fait que les raies d'absorption en UV proviennent du gaz éjecté et ne sont donc pas à la même vitesse que le [CII] qui vient du réservoir de gaz froid! Un article de Cassatta et al. (2020) interprète cet effet.

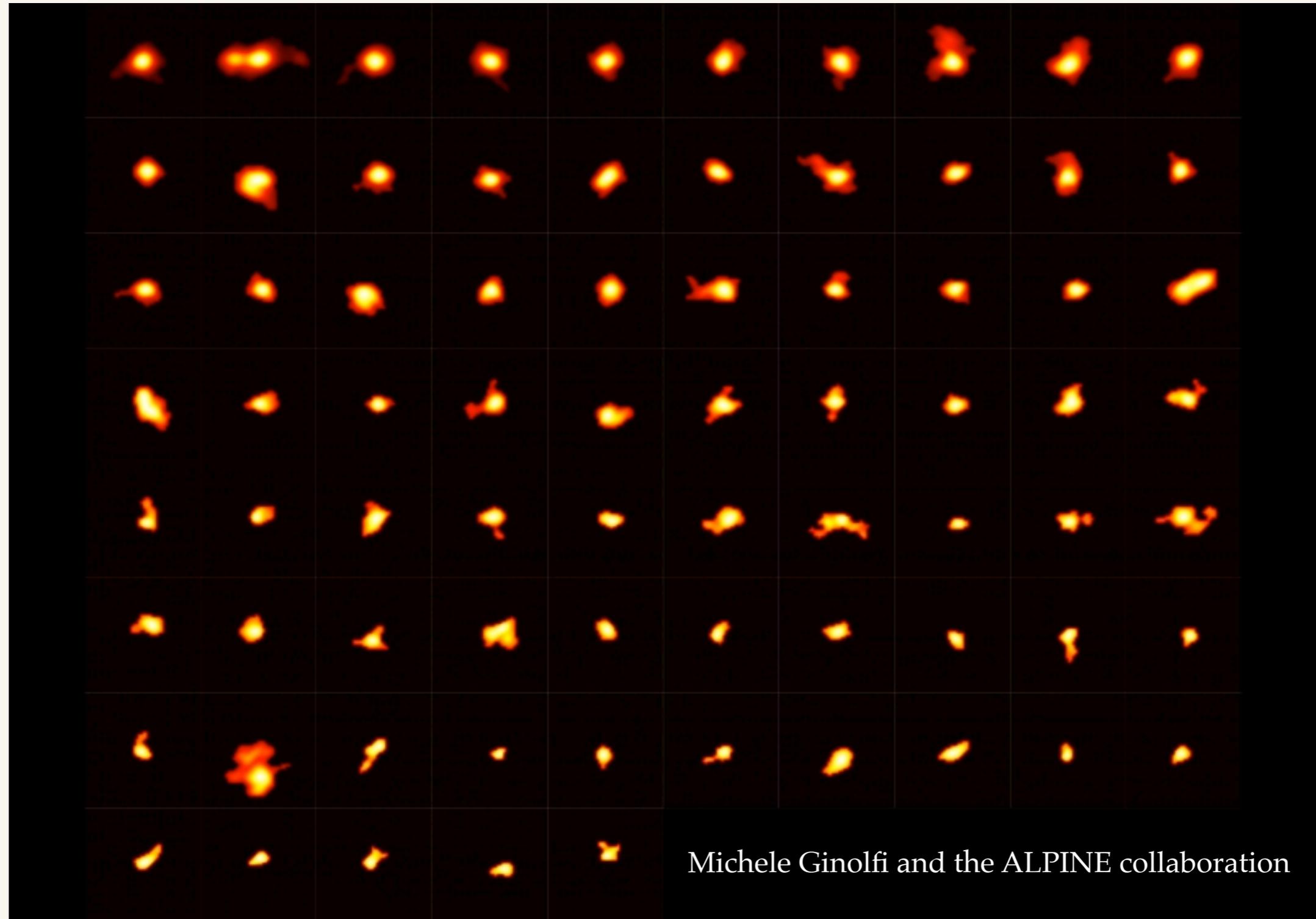
Un catalogue de 118+56 objets

- ❖ Pour chaque objet, on extrait un spectre. On produit aussi une carte de l'émission de la poussière et du [CII].
- ❖ On mesure également le flux des sources en continu (poussière) et [CII].
- ❖ On extrait également des sources non ALPINE dans le champ de vue de ALMA (56 sources supplémentaires!)



Extrait de Béthermin et al. (2020)

Collection finale de détections [CII]



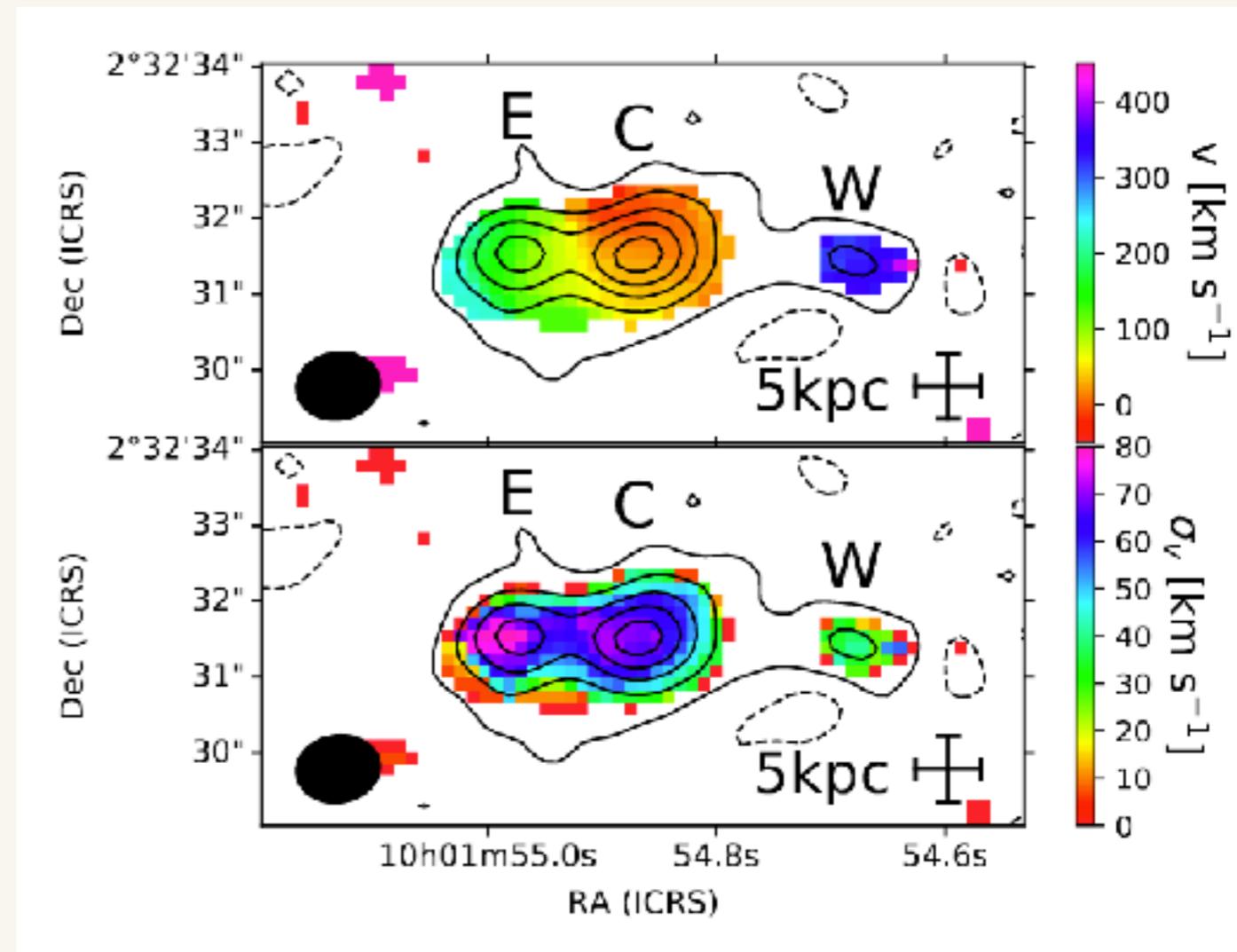
Michele Ginolfi and the ALPINE collaboration

Structure de ce séminaire

1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. Construction du programme ALPINE
4. Observations et réduction des données
5. **Interprétation et résultats principaux**
6. Nouvelles questions et perspectives

Une fusion triple de galaxies

- ❖ L'analyse des premières données a permis d'intensifier une fusion triple de galaxies.
- ❖ Cet objet a été le sujet du premier article publié par la collaboration ALPINE.

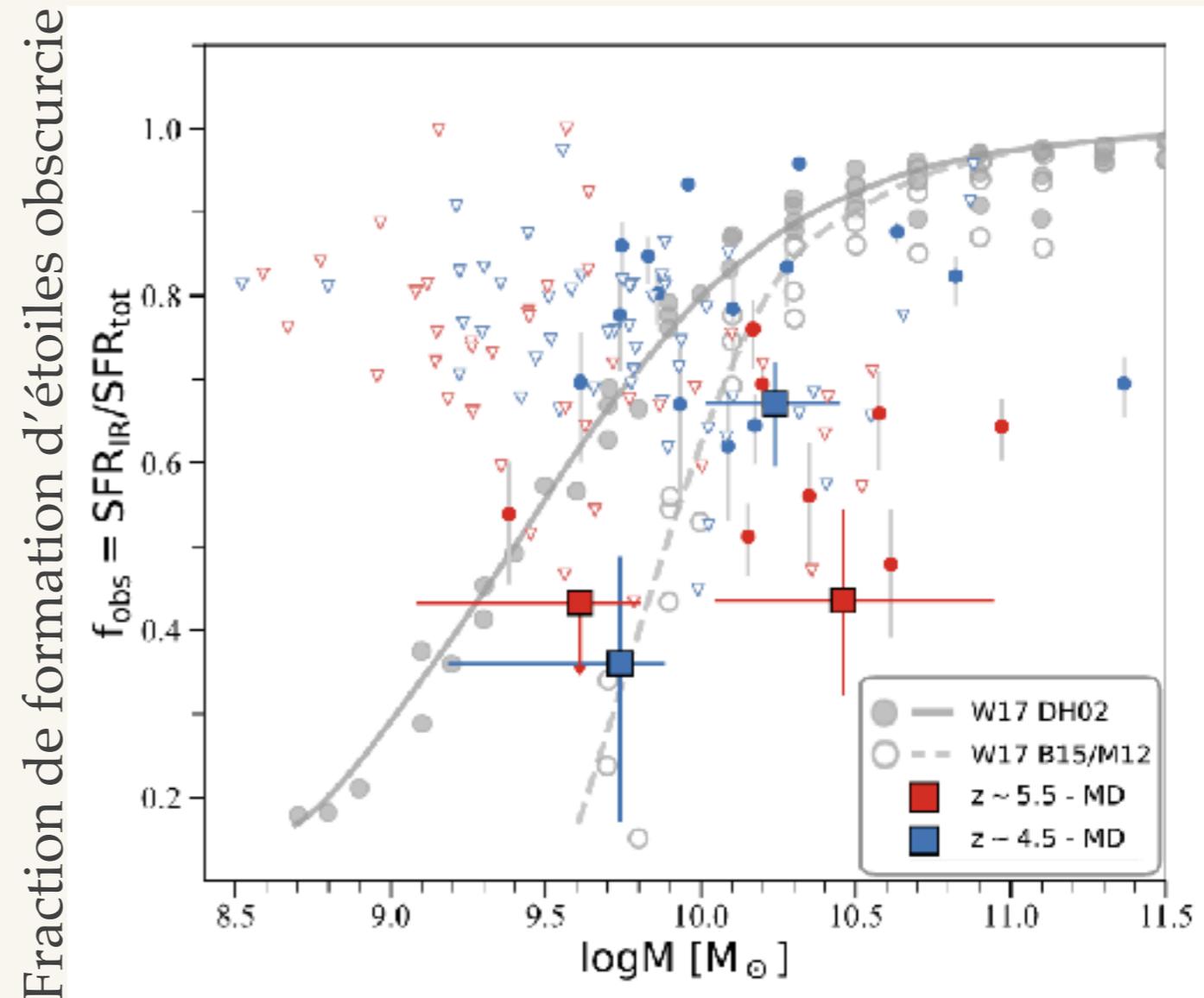


Jones et al. (2020)

Les galaxies massives sont déjà poussiéreuses

- ❖ Dans l'Univers actuel, les galaxies massives sont plus poussiéreuses que les autres.
- ❖ On voit déjà cet effet à $z \sim 5$, même si il est moins marqué.

ALPINE à $z \sim 4.5$ ALPINE à $z \sim 5.5$

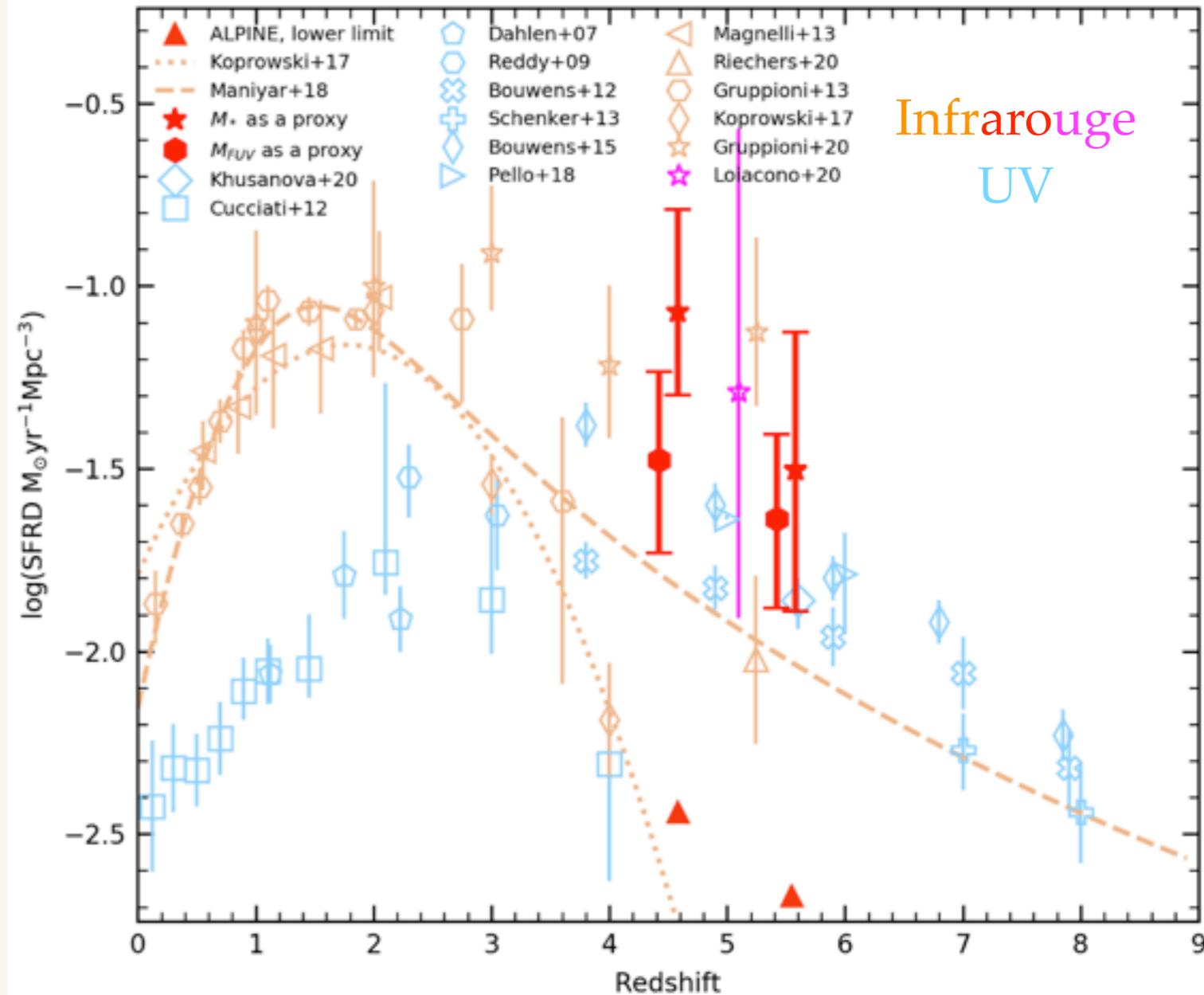


Masse stellaire

Formation d'étoiles dans la poussière

- ❖ Plusieurs techniques ont été utilisées pour déterminer la formation d'étoiles obscurcie par la poussière.
- ❖ Près de 50% est déjà obscurcie à $z \sim 5$. La poussière n'est donc pas négligeable, même à ces époques reculées.

Densité de formation d'étoile

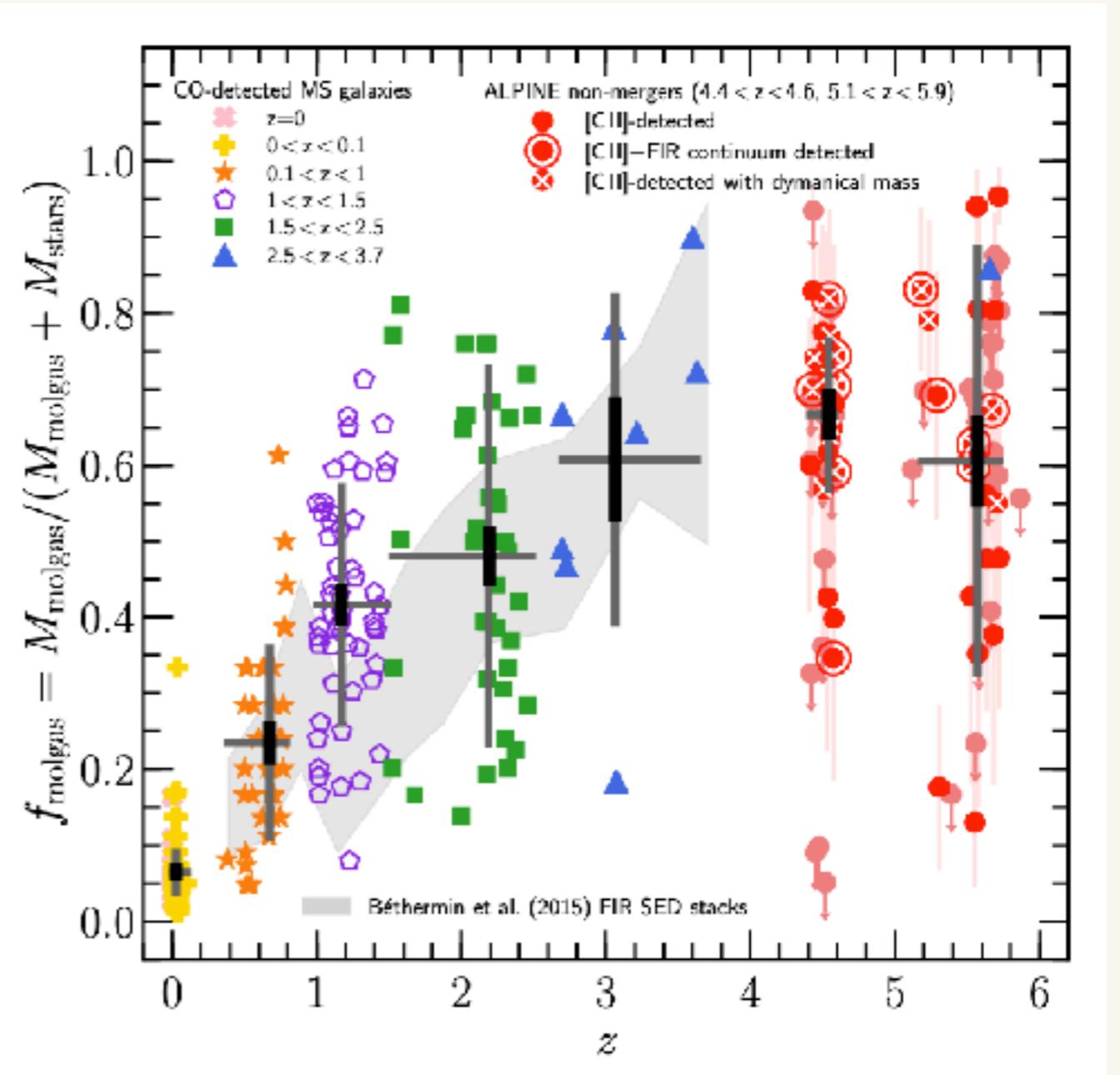


Décalage vers le rouge

Contenu en gaz

- ❖ La fraction de gaz dans les galaxies ALPINE est de l'ordre de 60%.
- ❖ Toutefois, il y a peu d'évolution par rapport à $z=3$.
- ❖ Le temps caractéristique de transformation du gaz étoiles évolue peu.

Fraction de gaz



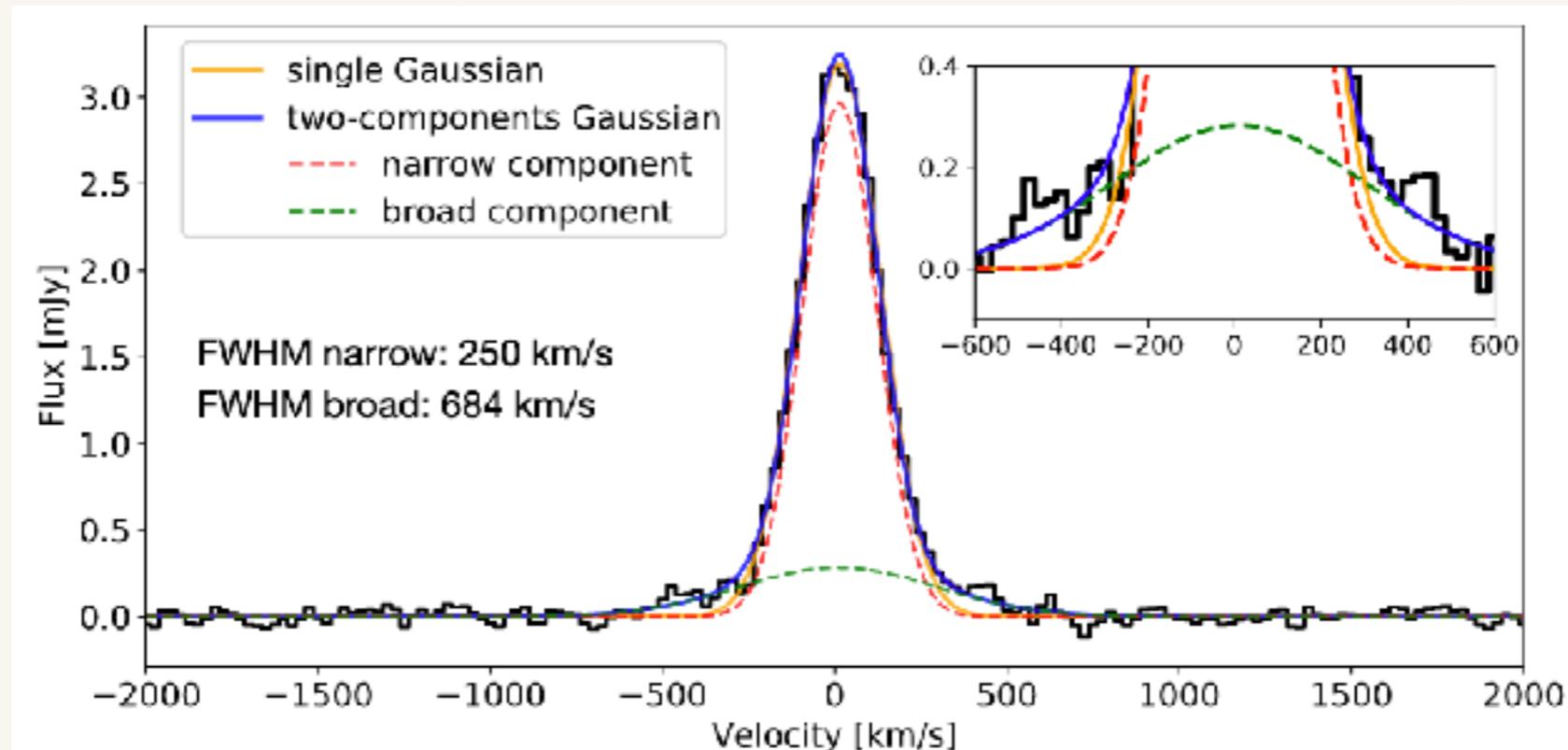
Décalage vers le rouge

Dessauges-Zavadsky et al. (2020)

Ejection de gaz

- ❖ L'analyse du profil moyen des galaxies ALPINE révèle une éjection de gaz vers 500 km/s.
- ❖ Cette éjection est probablement liée aux supernovae et non aux noyaux actifs de galaxies.

Profil de vitesse moyen dans les objets ALPINE format le plus d'étoiles



Vitesse

Ginolfi et al. (2020)

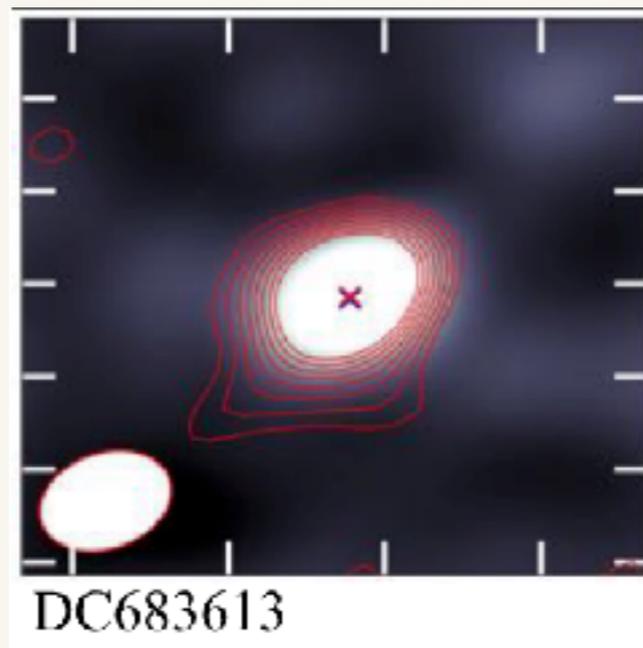
Structure de ce séminaire

1. Contexte scientifiques avant ALPINE
2. ALMA, un interféromètre millimétrique géant
3. Construction du programme ALPINE
4. Observations et réduction des données
5. Interprétation et résultats principaux
6. **Nouvelles questions et perspectives**

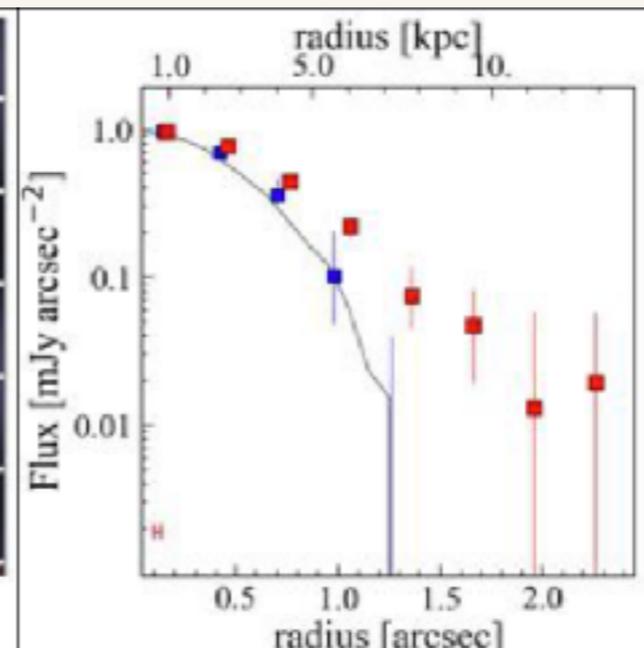
La nature des halos [CII]

- ❖ Les observations ALPINE ont montré une émission étendue du [CII] autour des galaxies.
- ❖ L'origine de ces halos [CII] est encore débattue et va être la source de suivies observationnels et de travaux théoriques (par exemple Pizzati et al. 2023)

Exemple de halo [CII]



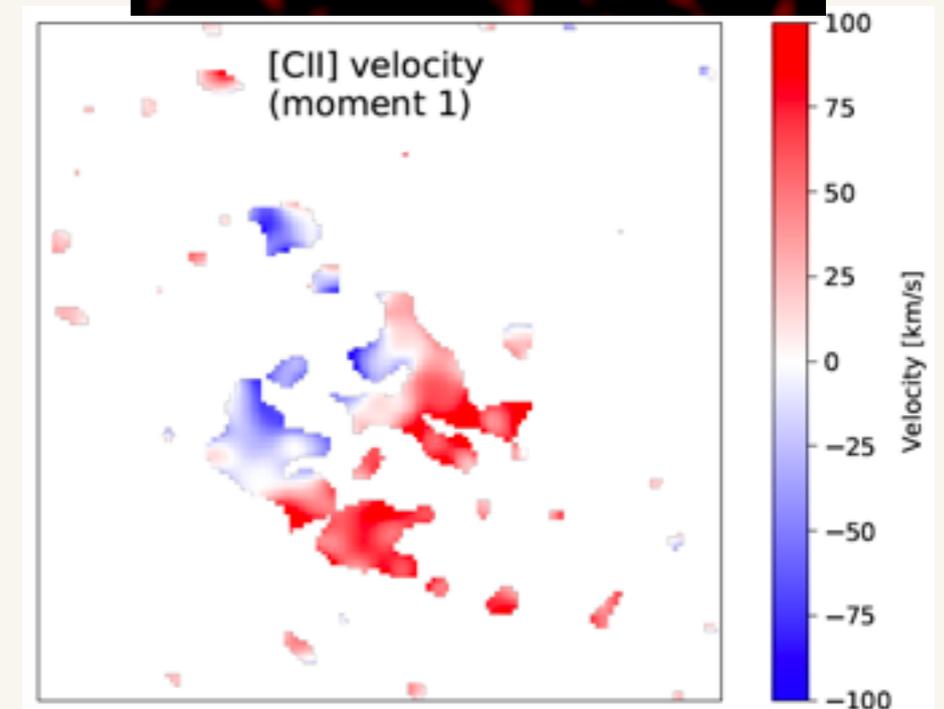
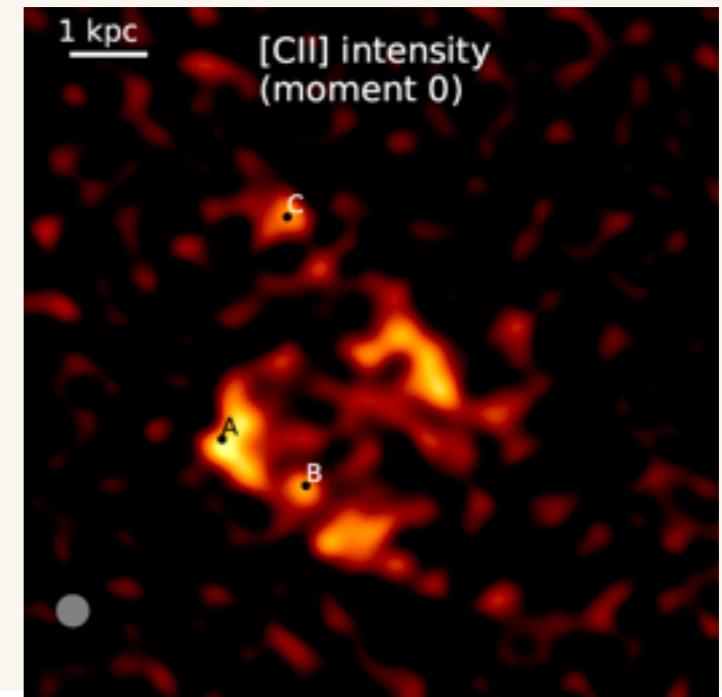
Profil d'émission



[CII]
Poussière

Physique interne des galaxies ALPINE

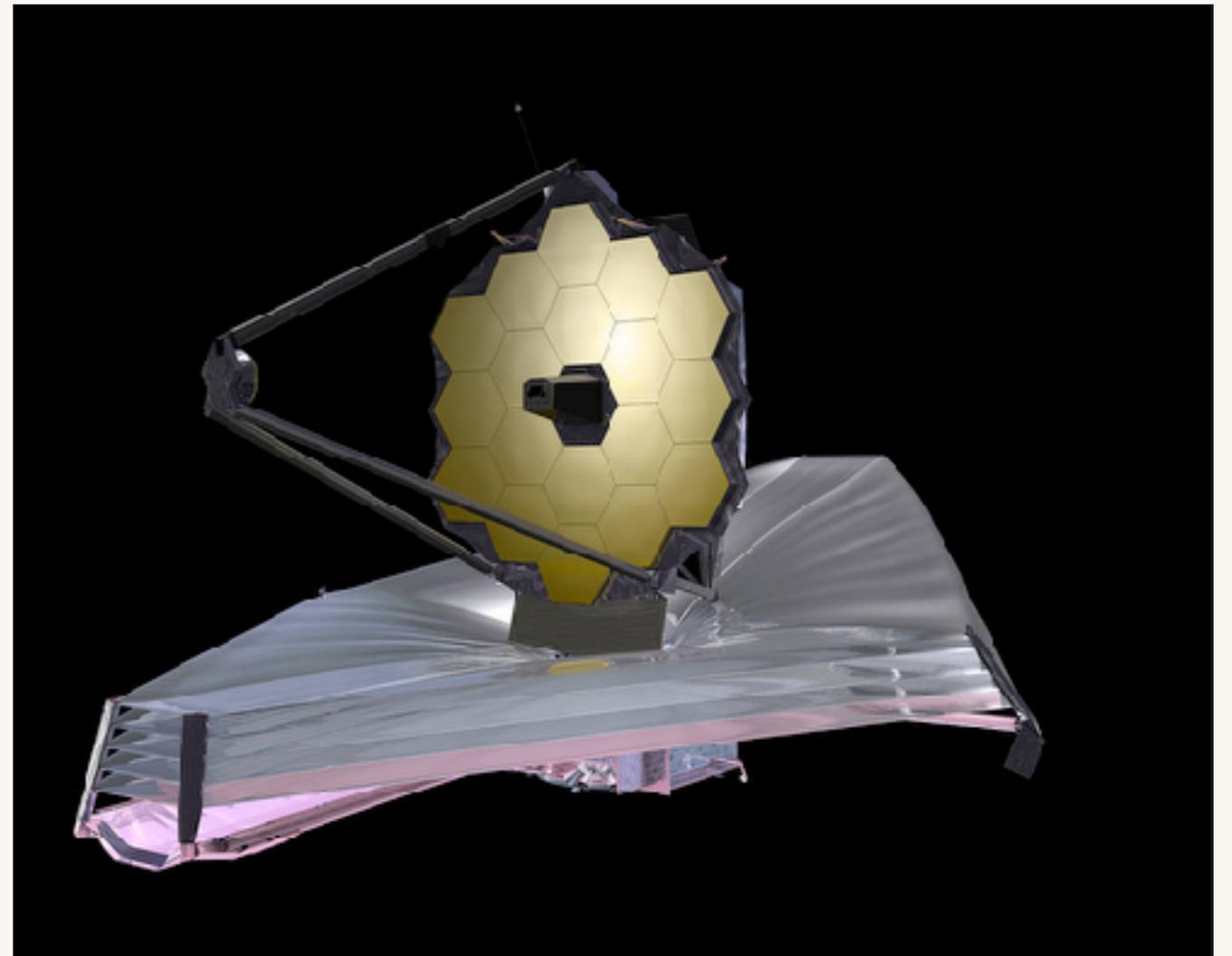
- ❖ Des observations de certaines galaxies ALPINE à plus haute résolution angulaire vont permettre de mieux comprendre leur structure interne.
- ❖ Ce type d'observation va permettre de:
 - étudier la turbulence dans ces galaxies et la possible présence de *clump* (voir séminaire de Dessauges-Zavadsky)
 - identifier des possibles fusions majeures ou mineures
 - étudier avec précision la dynamique de ces objets



Simulation de 20h d'observations d'une galaxie à très haute résolution

Complémentarité avec JWST

- ❖ JWST est le nouveau télescope infrarouge proche de la NASA.
- ❖ Il est complémentaire de ALMA et va permettre:
 - de cartographier les vieilles étoiles,
 - d'avoir une mesure alternative du taux de formation d'étoiles,
 - de mesurer la métallicité



Crédit: NASA

Conclusion