

Les sites de formation des étoiles

--

les découvertes du satellite Herschel

Delphine Russeil

Plan !

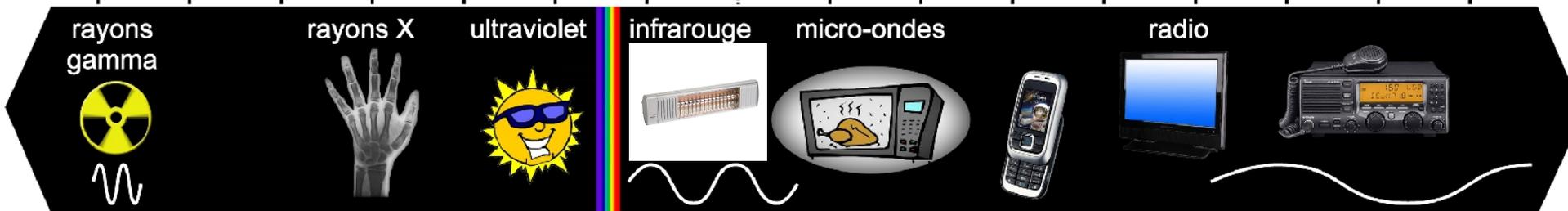
- ★ L'infrarouge
- ★ La formation des étoiles
- ★ Le satellite HERSCHEL - résultats

Petits Rappels :

***- La lumière comme source
d'information en astronomie***

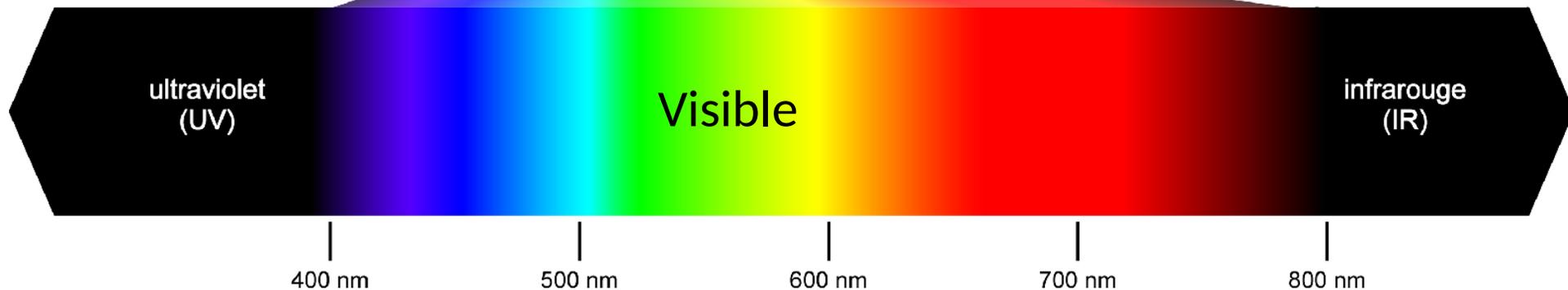
- La poussière

10⁻¹² mètres 10⁻⁹ mètres 10⁻⁶ mètres 10⁻³ mètres 10⁰ mètres 10³ mètres
 1 picomètre 1 nanomètre 1 micromètre 1 millimètre 1 mètre 1 kilomètre



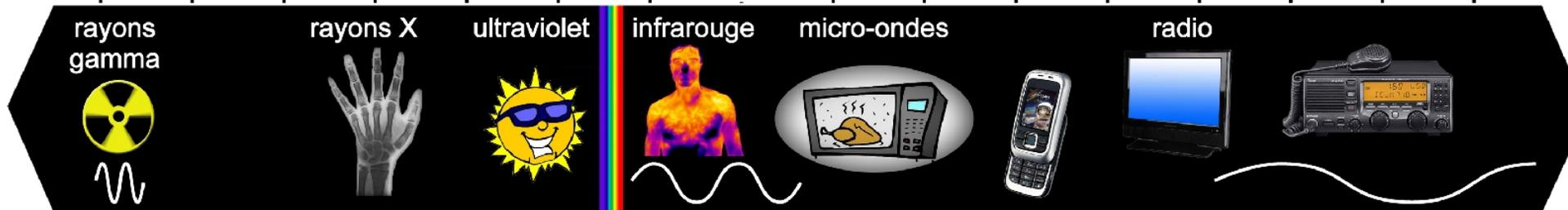
Longueurs d'onde courtes

Longueurs d'onde longues



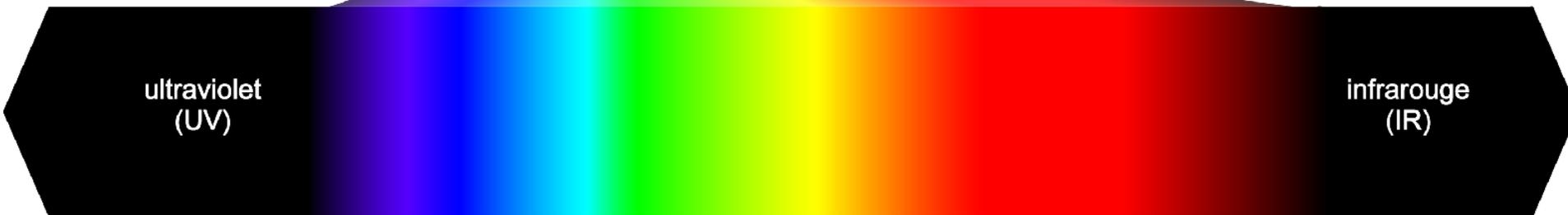
L'oeil humain ne voit que les ondes du domaine visible.

10⁻¹² mètres 1 picomètre 10⁻⁹ mètres 1 nanomètre 10⁻⁶ mètres 1 micromètre 10⁻³ mètres 1 millimètre 10⁰ mètres 1 mètre 10³ mètres 1 kilomètre



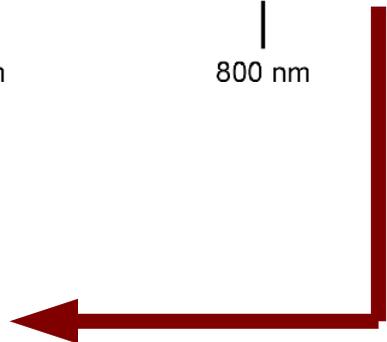
Longueurs d'onde courtes

Longueurs d'onde longues



400 nm 500 nm 600 nm 700 nm 800 nm

2 μm - 25 μm	« Infrarouge proche »
25 μm - 100 μm	« Infrarouge moyen »
100 μm - 500 μm	« Infrarouge lointain »



10^{-12} mètres
1 picomètre

10^{-9} mètres
1 nanomètre

10^{-6} mètres
1 micromètre

10^{-3} mètres
1 millimètre

10^0 mètres
1 mètre

10^3 mètres
1 kilomètre

rayons gamma



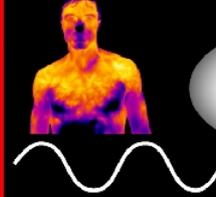
rayons X



ultraviolet



infrarouge



micro-ondes



radio



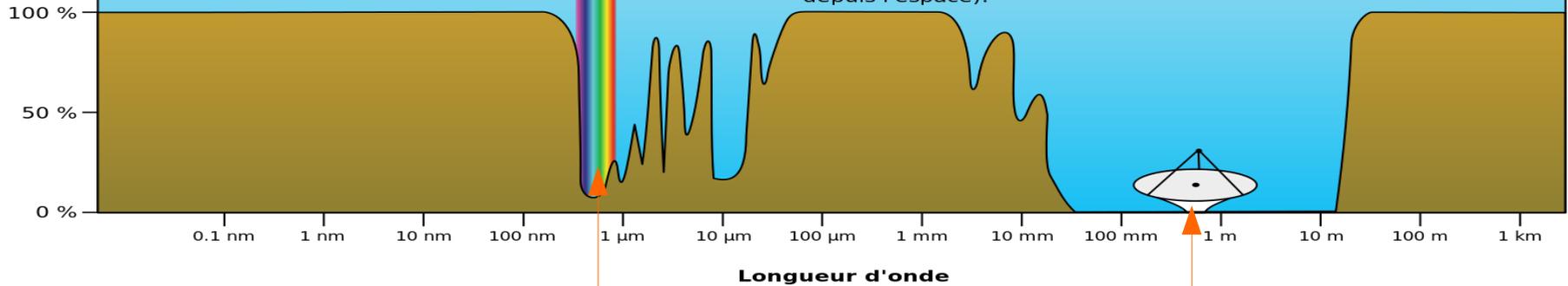
Rayons Gamma, X et ultra-violets bloqués par la haute atmosphère (observation depuis l'espace).



Lumière visible observable depuis la Terre malgré un peu de distorsion atmosphérique. La plupart des rayons infra-rouge sont absorbés par des gaz atmosphériques (observation depuis l'espace).

Ondes radio observables depuis la Terre.

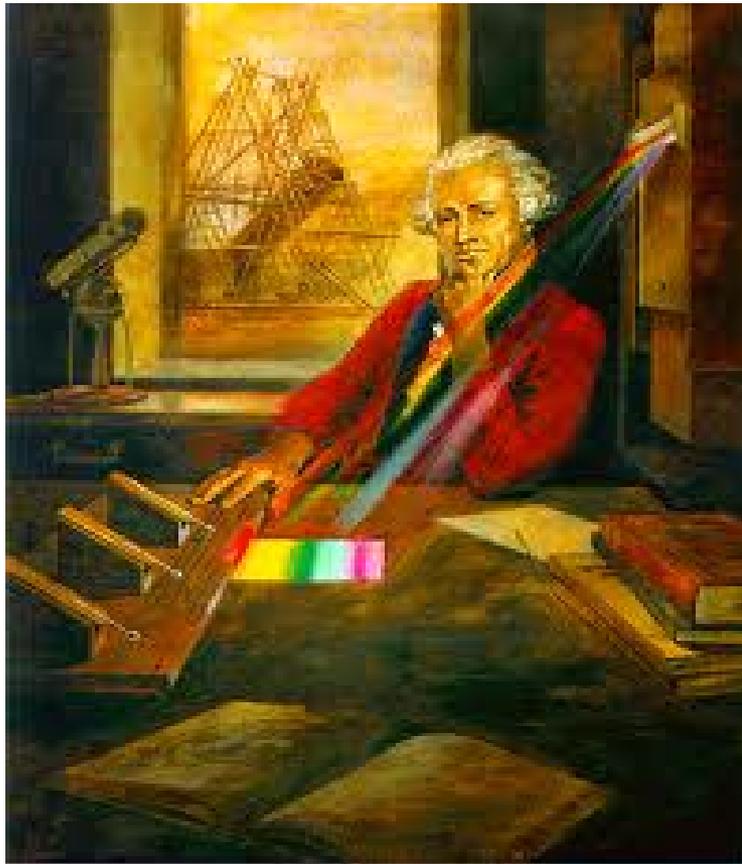
Très grandes longueurs d'onde bloquées.



William Herschel découvre l'infrarouge

Musicien et astronome Anglo-allemand

En 1800 il découvre l'Infrarouge



Un corps a une température ! Il est source de lumière !



L'inverse n'est pas vrai !!
e.g. Les nébuleuses gazeuses



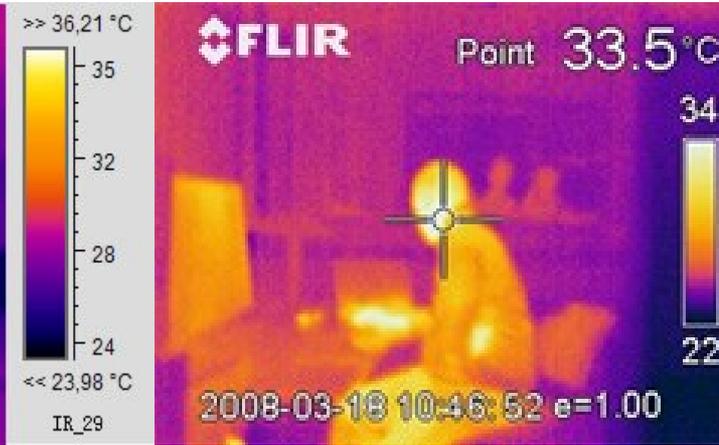
**Le soleil ($T \sim 6000^\circ\text{C}$)
=> Visible + infrarouge**



**Ampoule à filament ($T \sim 2000^\circ\text{C}$)
=> Visible + infrarouge**

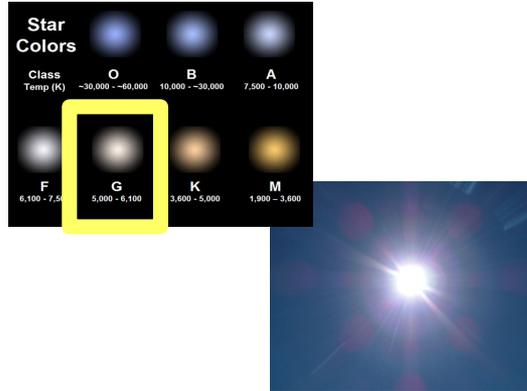
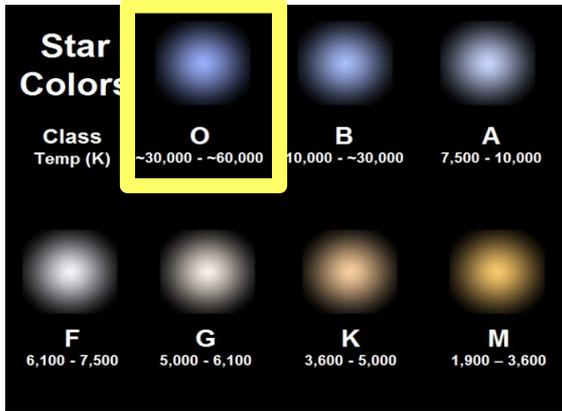


**Lave volcanique ($T \sim 1000^\circ\text{C}$)
=> Visible + infrarouge**



Corps humain ($T \sim 37^\circ\text{C}$) => Infrarouge

Un corps a une température ! Il est source de lumière => couleur



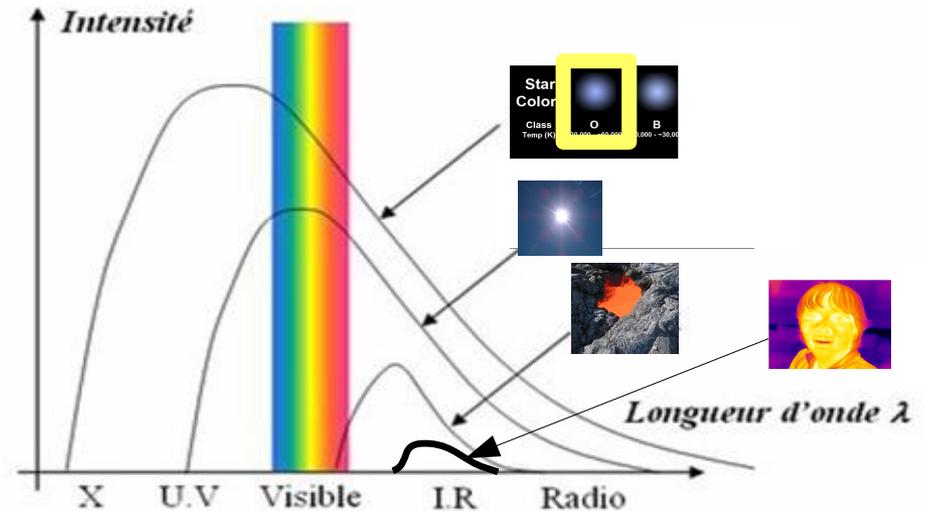
Etoiles chaudes ($T > 20\,000^\circ\text{C}$)
=> Visible + UV

Le soleil ($T \sim 6000^\circ\text{C}$)
=> Visible + infrarouge

Lave volcanique ($T \sim 1000^\circ\text{C}$)
=> Visible + infrarouge



Corps humain ($T \sim 37^\circ\text{C}$) => Infrarouge



« Tableau de correspondance »

Longueur d'onde du pic d'émission Infrarouge - Température

Longueur d'onde du maximum d'émission d'un objet	Température
9 μm	37 °C
70 μm	-230°C
160 μm	-250°C
250 μm	-260°C
350 μm	-265°C
500 μm	-270°C

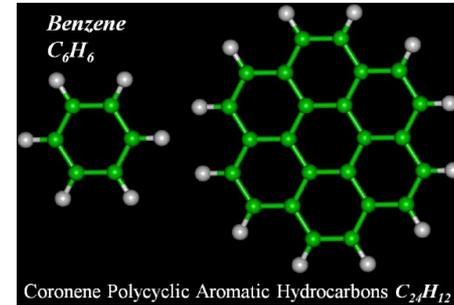


Herschel



La poussière:

- Grains de glace sale (glace d'eau, neige carbonique, méthane et ammoniacque solides)
- Grains de graphites graphite entourés de glace
- Grosses molécules (PAH)
- Particules de silicates
- Particules de diamants ou autre sorte de carbone

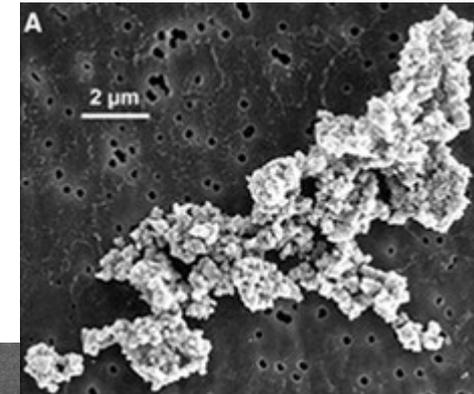


PAH = « Polycyclic aromatic hydrocarbons »

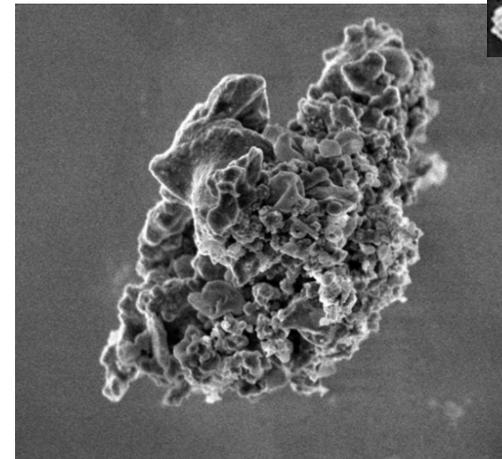
La poussière est froide, mélangée avec le gaz et rayonne dans l'IR



Zones sombres = Poussière interstellaire



Grains de poussière interplanétaire



L'infrarouge : voir et étudier les objets froids

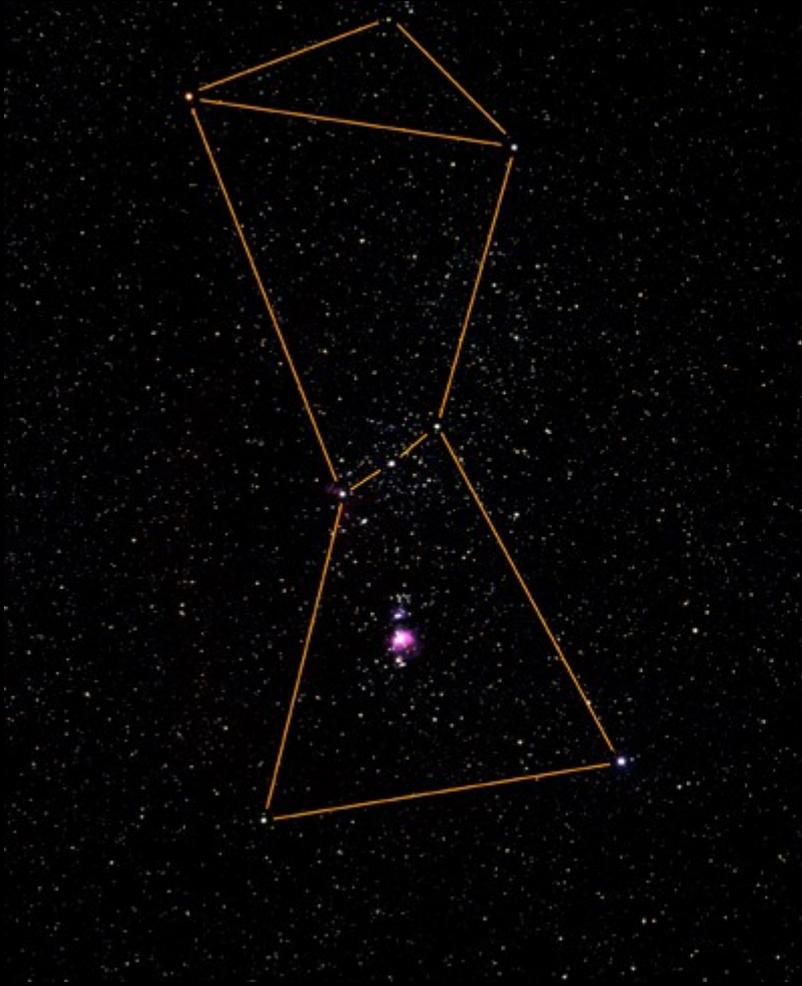


Image Optique

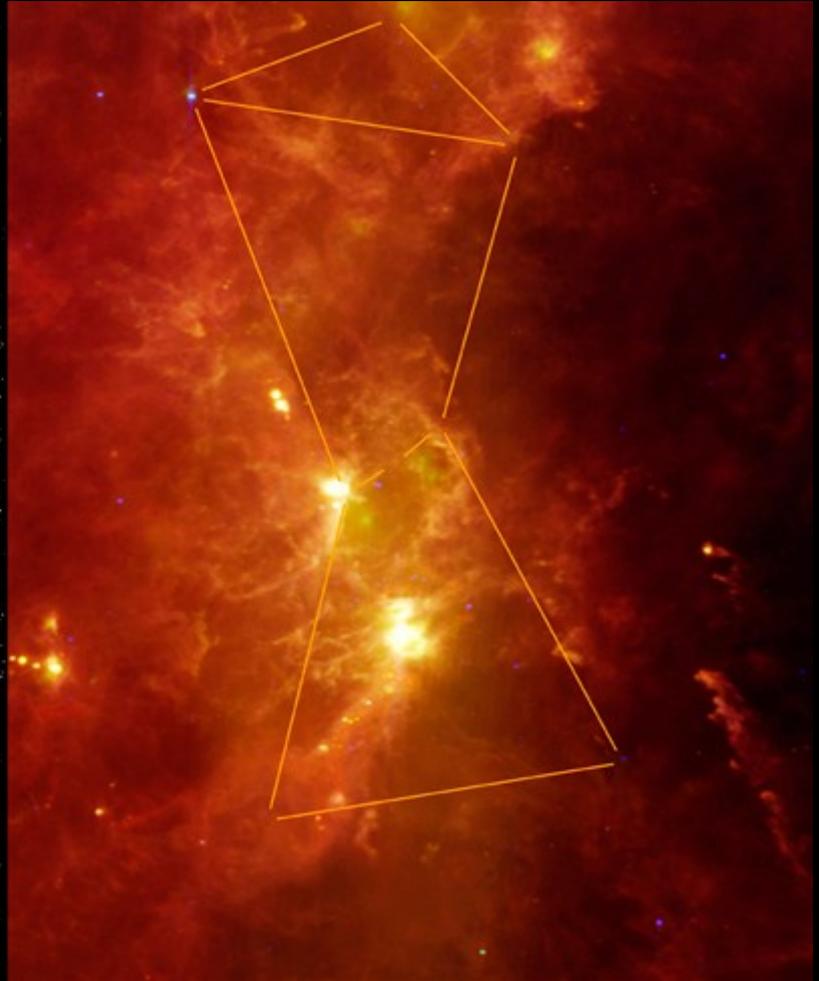


Image IRAS (B = 12 μm ; R = 100 μm)

L'infrarouge : voir et étudier les objets froids



Entre les étoiles se trouve de la poussière
qui est observable en infra-rouge



Image Optique

Image IRAS (B = 12 μm ; R = 100 μm)

L'infrarouge : voir et étudier les objets froids



Image Optique



Image Herschel (B = 70 μm , R = 350 μm)

L'infrarouge : voir et étudier les objets froids



Image Optique



Image Herschel (B = 70 μm , R = 350 μm)

L'infrarouge : voir et étudier les objets froids



Image Optique



Image Herschel (B = 70 μm , R = 350 μm)

Attention au codage des couleurs des images
en astronomie !!!

L'infrarouge : voir et étudier les objets froids

Convention codage couleur
image astro :

Bleu = chaud (-200 °C !!!)

Rouge = froid (-260 °C)



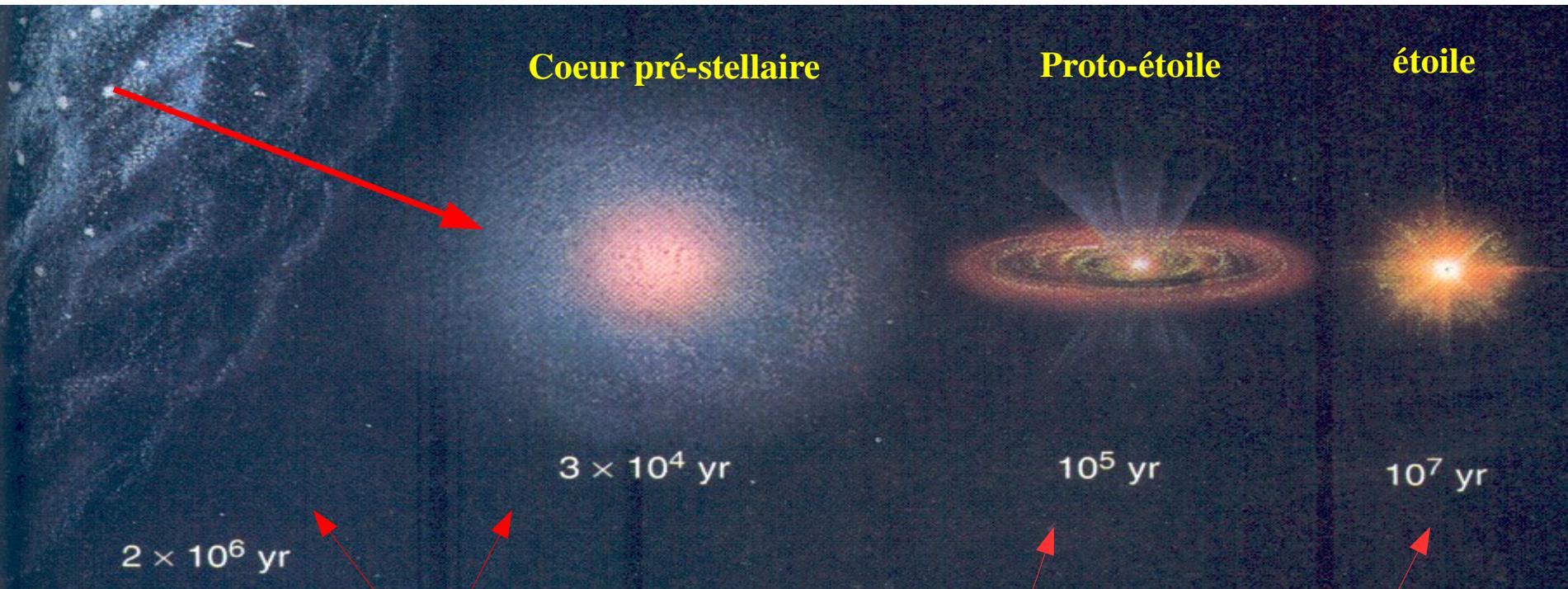
Image Herschel (B = 70 μm , R = 350 μm)

La formation des étoiles

Comment se forment les étoiles comme le Soleil?

Nuages de gaz moléculaire froids
(10 K = -263 °C) => infrarouge lointain

Nuage de gaz moléculaire
(Poussières + gaz H₂)



2×10^6 yr

3×10^4 yr

10^5 yr

10^7 yr

Herschel

Spitzer

« Oeil » nu

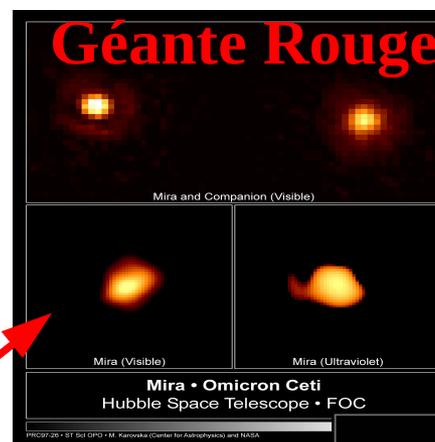
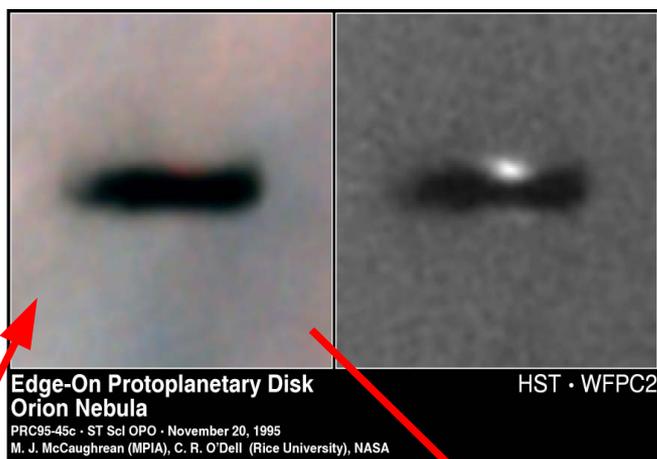
Les étoiles de faible masse:

Masse $< 8M_{\text{sol}}$

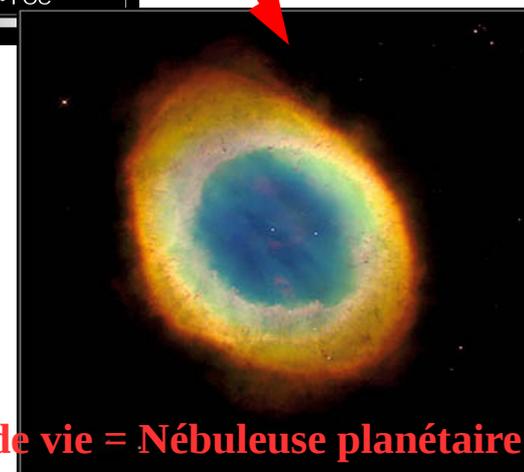
Evolution lente :

~ 10 milliards d'années pour le Soleil (dans son état actuel)

~ 200 milliards d'années pour les étoiles les plus petites

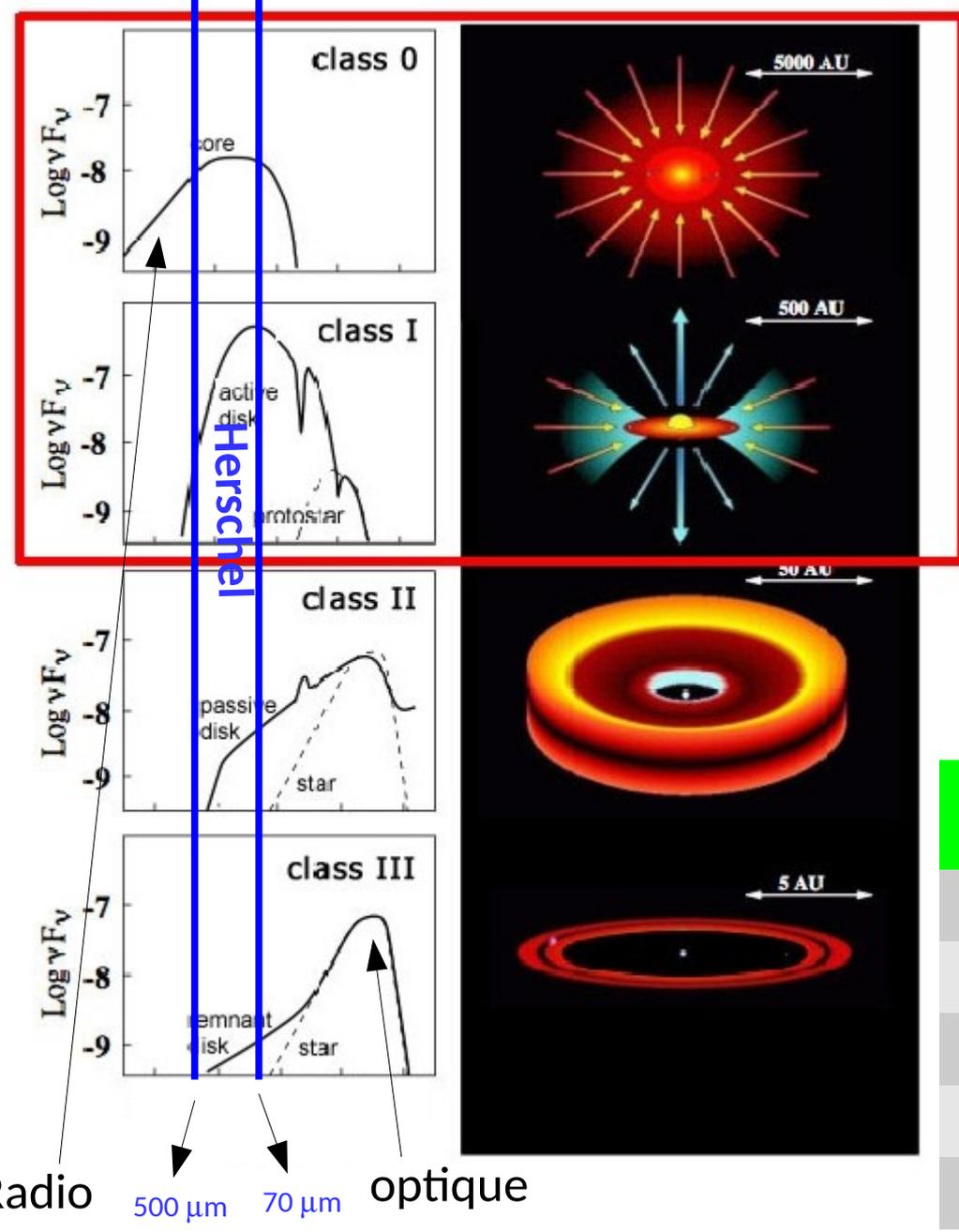


Naissance dans les nuages moléculaires



Fin de vie = Nébuleuse planétaire + naine blanche

Phases d'évolution - étoile de faible masse



Radio 500 μm 70 μm optique

Longueur d'onde	Température
70 μm	-230°C
160 μm	-250°C
250 μm	-260°C
350 μm	-265°C
500 μm	-270°C

Comment se forment les étoiles massives ?

Les étoiles massives:

Masse $> 8M_{\text{sol}}$

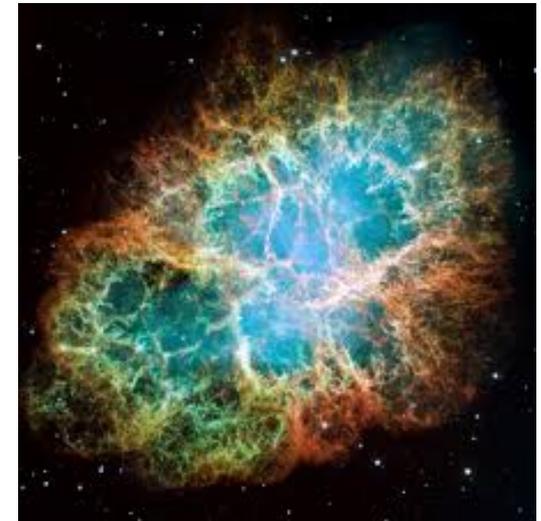
Très chaudes ($T > 20\,000\text{ °C}$) \Rightarrow fort rayonnement UV

Ionisent l'hydrogène qui les entoure \Rightarrow région HII

Evolution rapide \Rightarrow quelques millions d'années

Fin de vie = **Supernova** + pulsar
ou trou-noir
Formation des éléments jusqu'à
l'Uranium

Naissance au sein de
coeurs moléculaires
massifs



Région HII

Formation dans l'étoile des éléments
jusqu'au Fer

Comment se forment les étoiles massives ?

Les étoiles massives:

Masse $> 8M_{\text{sol}}$

Très chaudes ($T > 20\,000\text{ °C}$) \Rightarrow fort rayonnement UV

Ionisent l'hydrogène qui les entoure \Rightarrow région HII

Evolution rapide \Rightarrow quelques millions d'années

Nouveau !!

Herschel-HOBYS

RGB = 500, 250, 70 μm



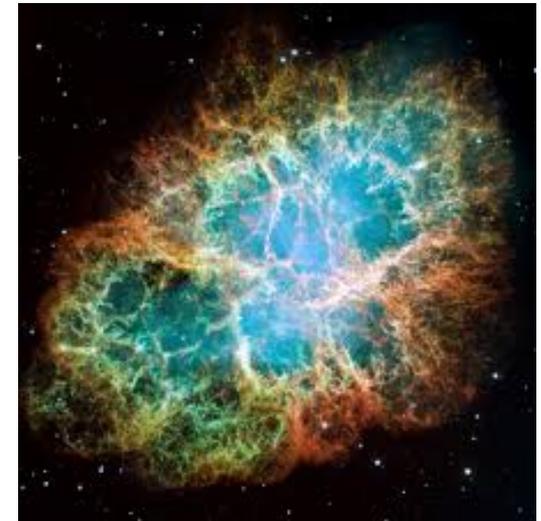
Naissance au sein de
coeurs moléculaires massifs



Région HII

Formation dans l'étoile des éléments
jusqu'au Fer

Fin de vie = **Supernova** + pulsar
ou trou-noir
Formation des éléments jusqu'à
l'Uranium



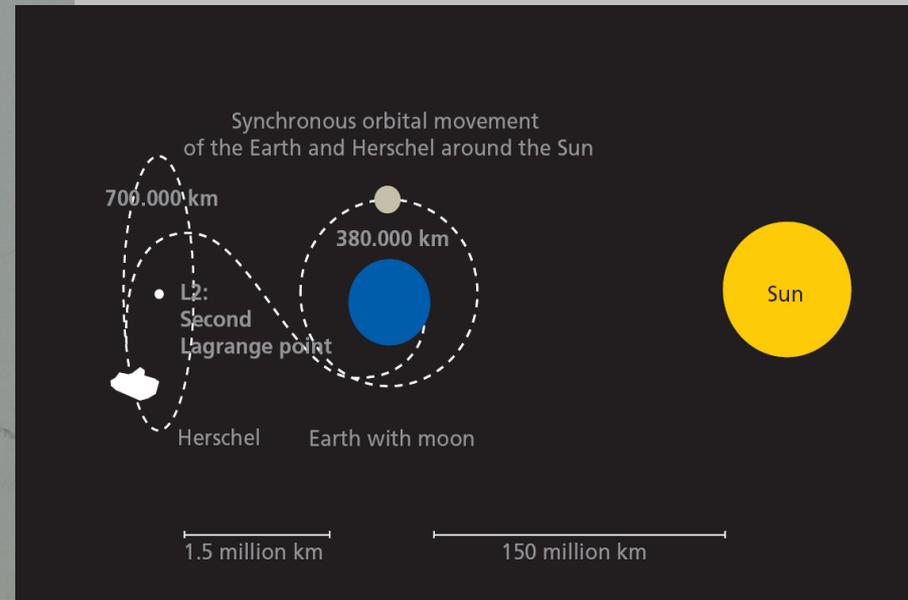
**Pour comprendre la formation des étoiles :
Trouver/observer/étudier les premières
phases de leur évolution**

=> satellite Herschel

Une nouvelle vision de notre Galaxie: la mission Herschel

Le satellite infrarouge Herschel

Satellite lancé le 14 Mai 2009 de Kourou (Guyane) par le lanceur Ariane 5



Le satellite infrarouge Herschel

Environ 7m de haut, 4.3 m de large, 3.25 tonnes
Un télescope de 3.5 m de diamètre



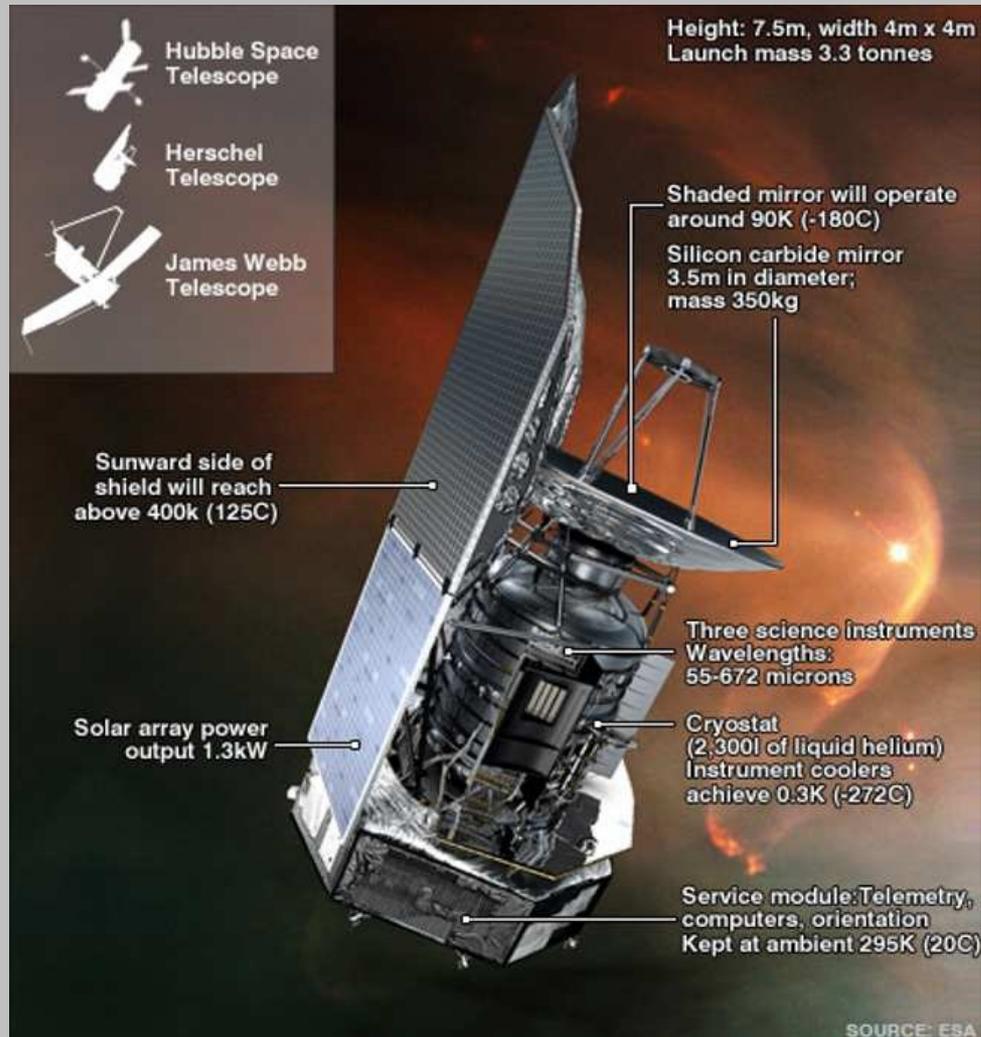
→ trois instruments implantés dans le cryostat

Trois instruments en imagerie et spectroscopie:

PACS: spectromètre imageur, domaine 60-210 microns

SPIRE: spectromètre imageur + photomètre, domaine 200-670 microns

HIFI: spectromètre à haute résolution spectrale, domaine 157-625 microns



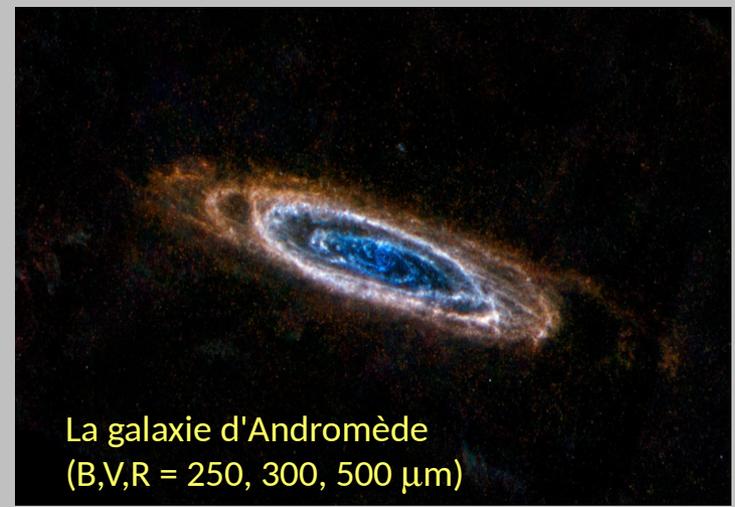
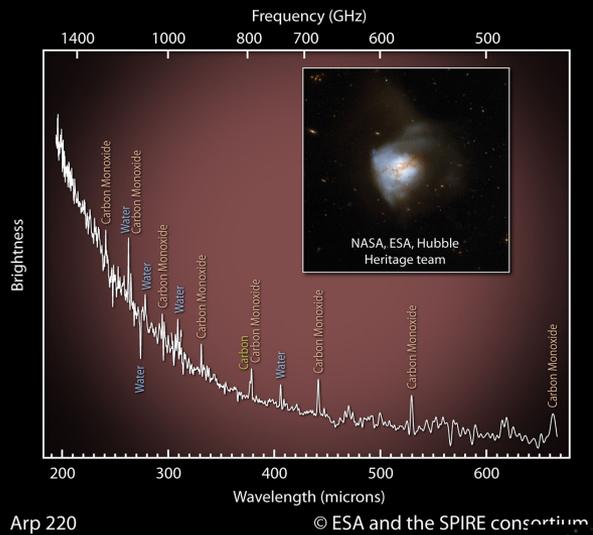
**Une grande résolution spatiale
(6" - 36")**

+

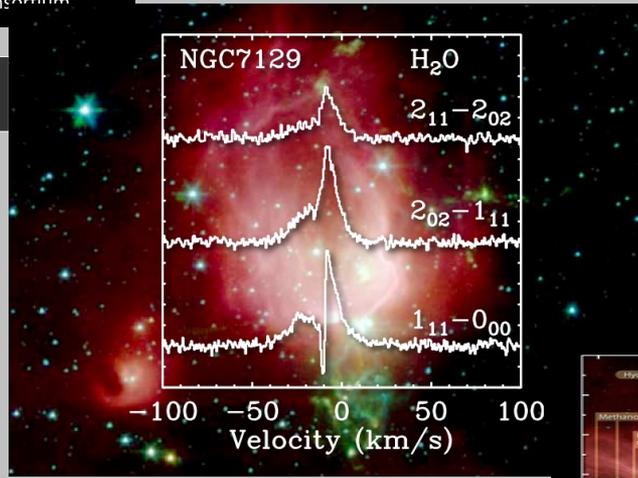
**Une grande couverture
du ciel
(e.g. plan galactique)**

=

**Etude sans précédent
du milieu interstellaire
et de la formation des étoiles**



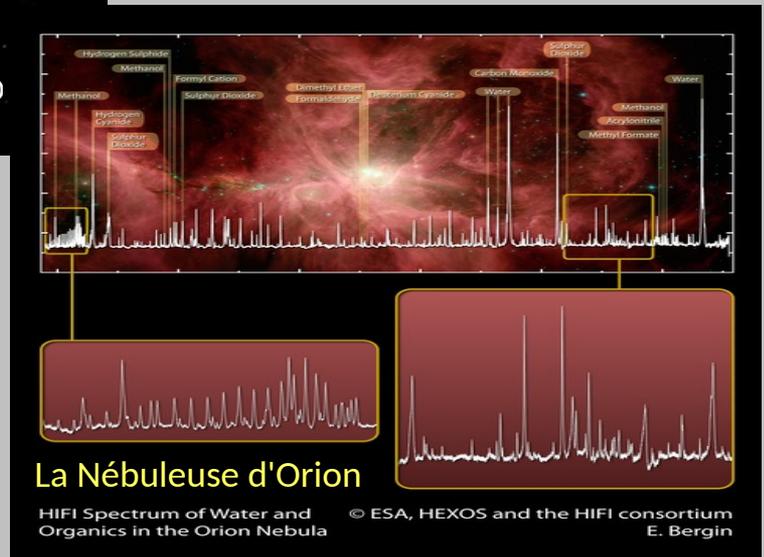
De l'eau (H₂O) de partout !!

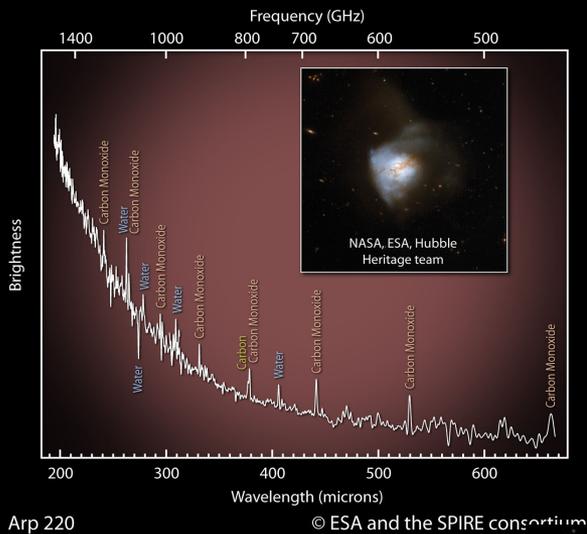


Distribution de la poussière dans les galaxies



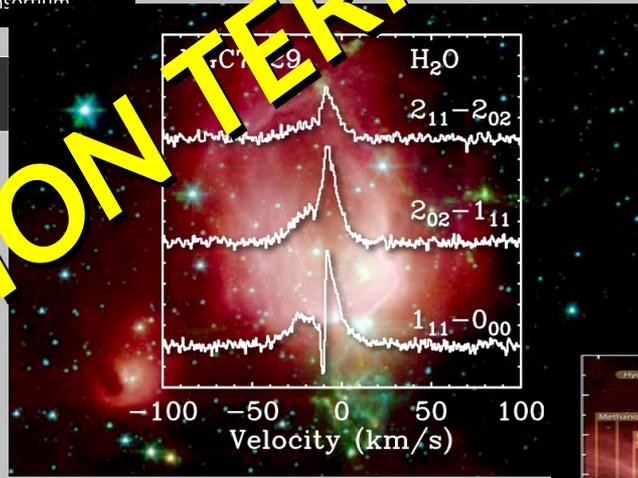
Distribution de la poussière dans notre galaxie



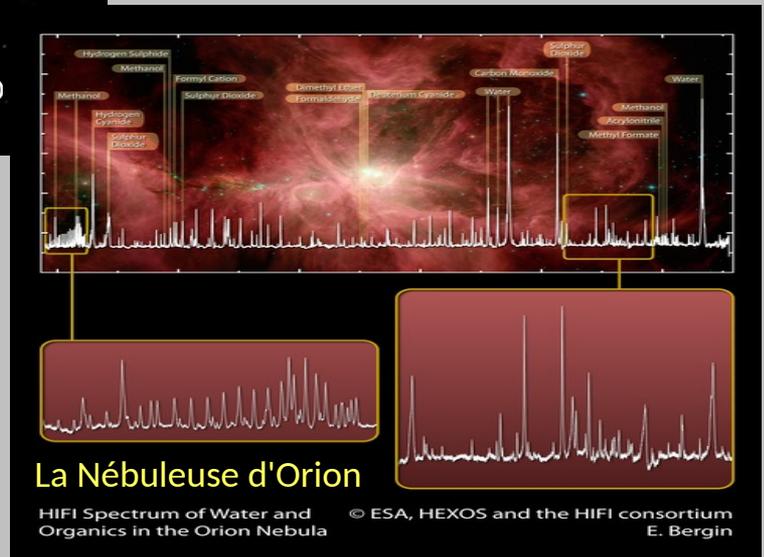
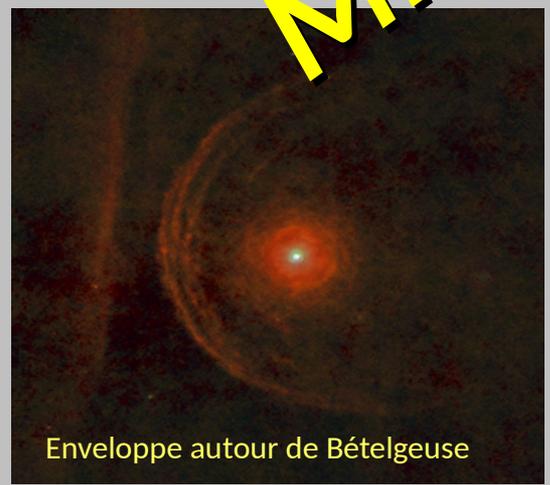


Distribution de la poussière dans les galaxies

De l'eau (H₂O) de partout !!



Distribution de la poussière dans notre galaxie



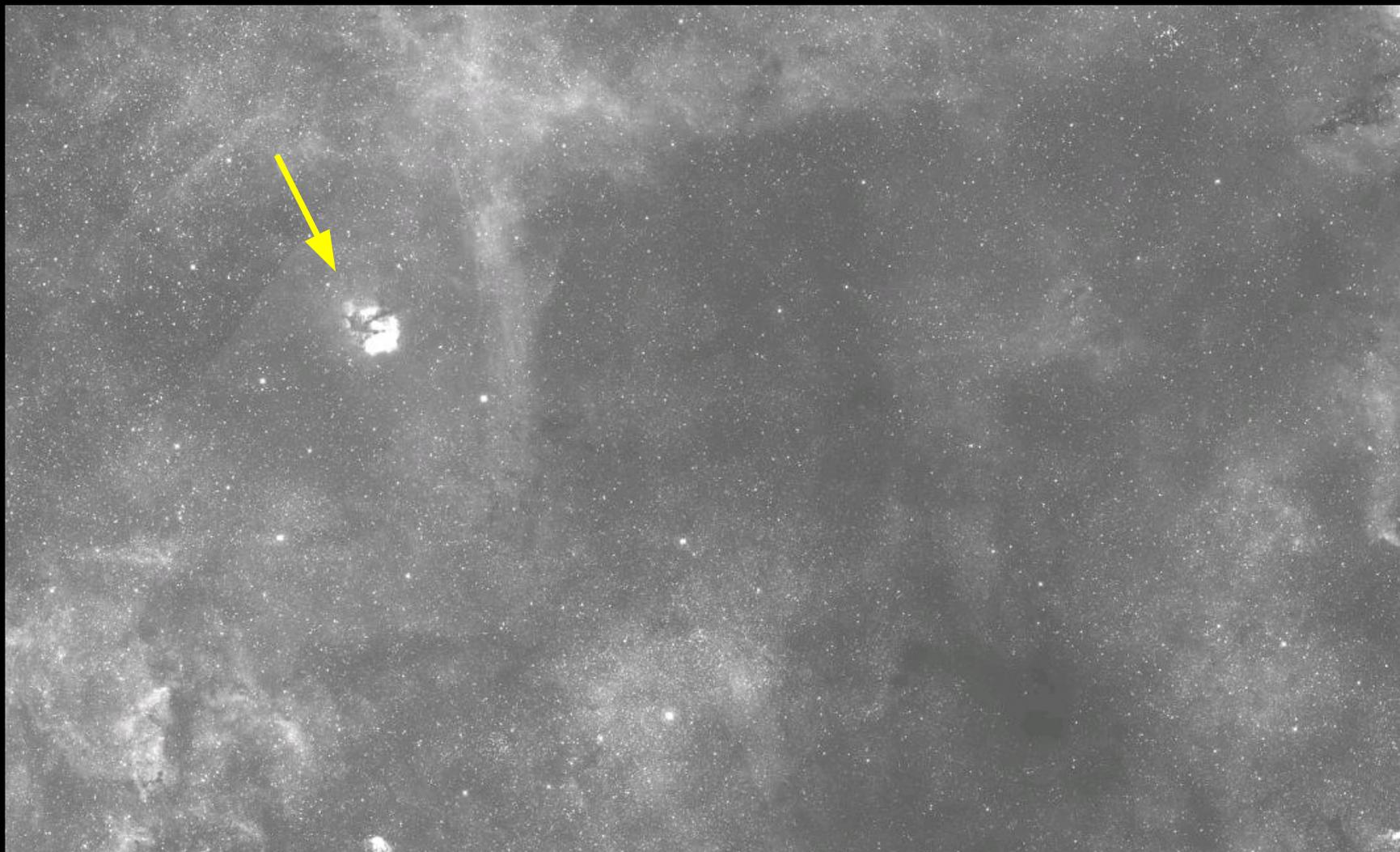
MISSION TERMINÉE !!!

La cartographie d'Herschel du plan de Notre Galaxie (La voie lactée)



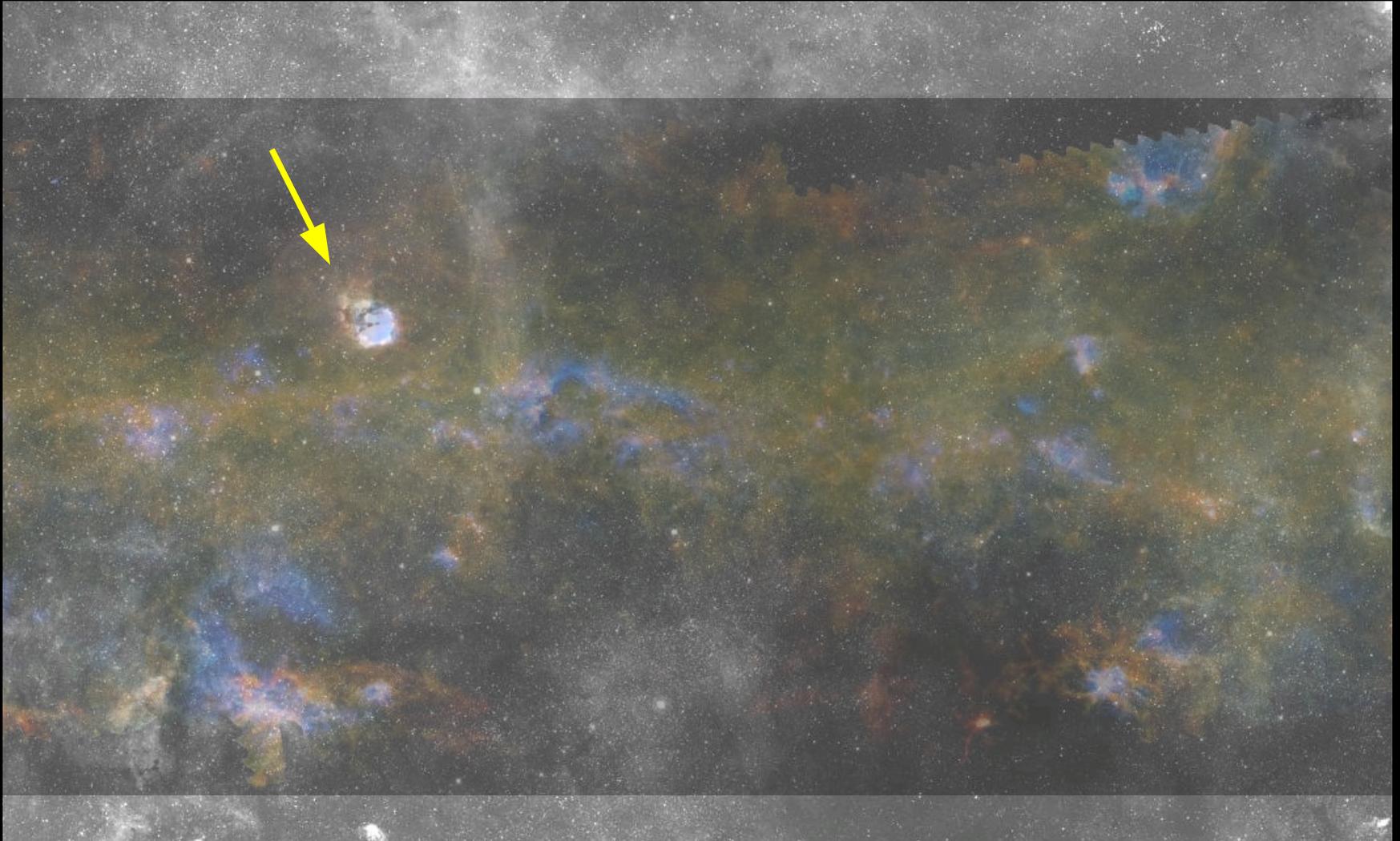
Image optique de la Voie-lactée

Vision d'une partie du plan de notre Galaxie dans le rouge (Gaz ionisé)

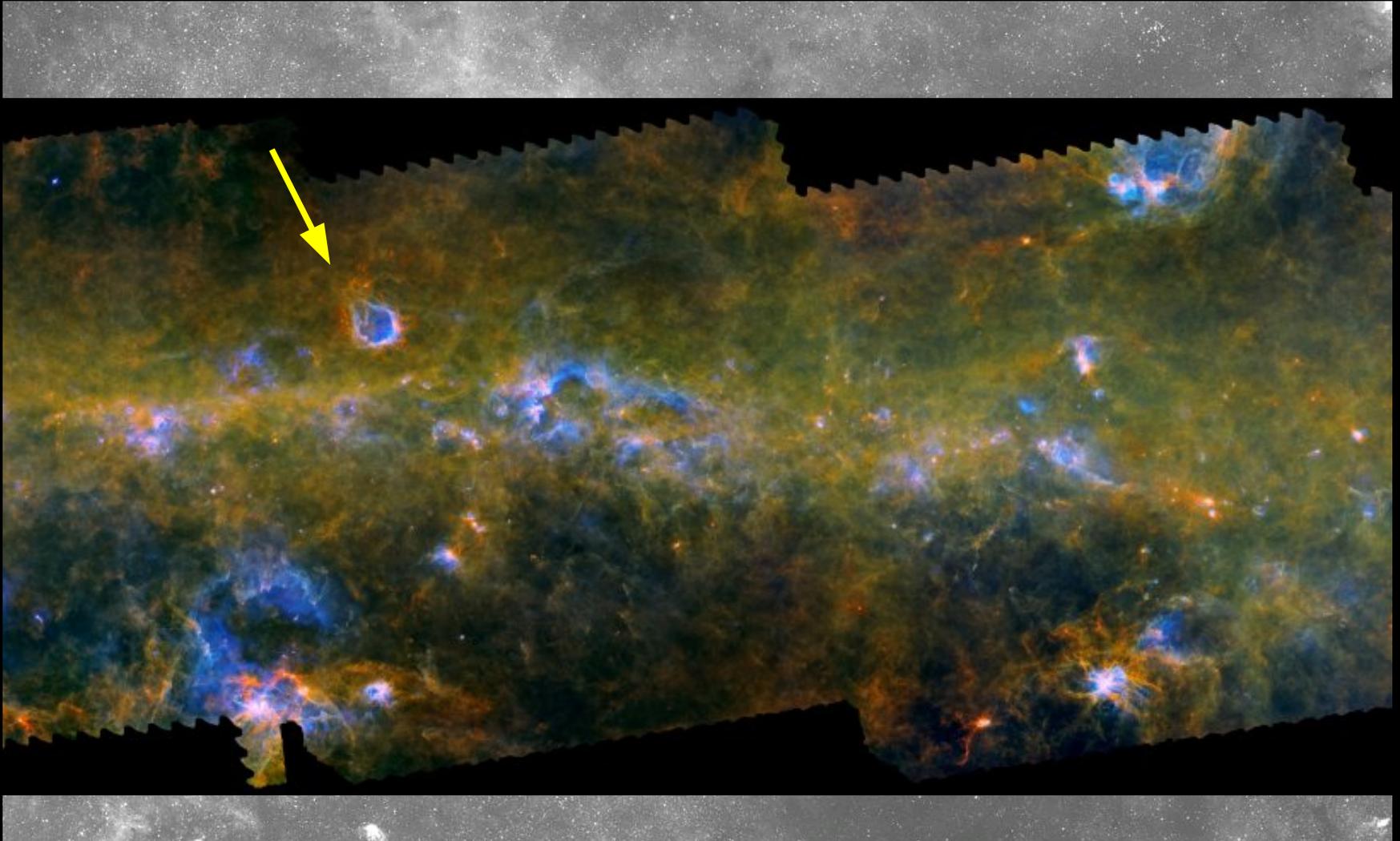


Halpha survey UKST

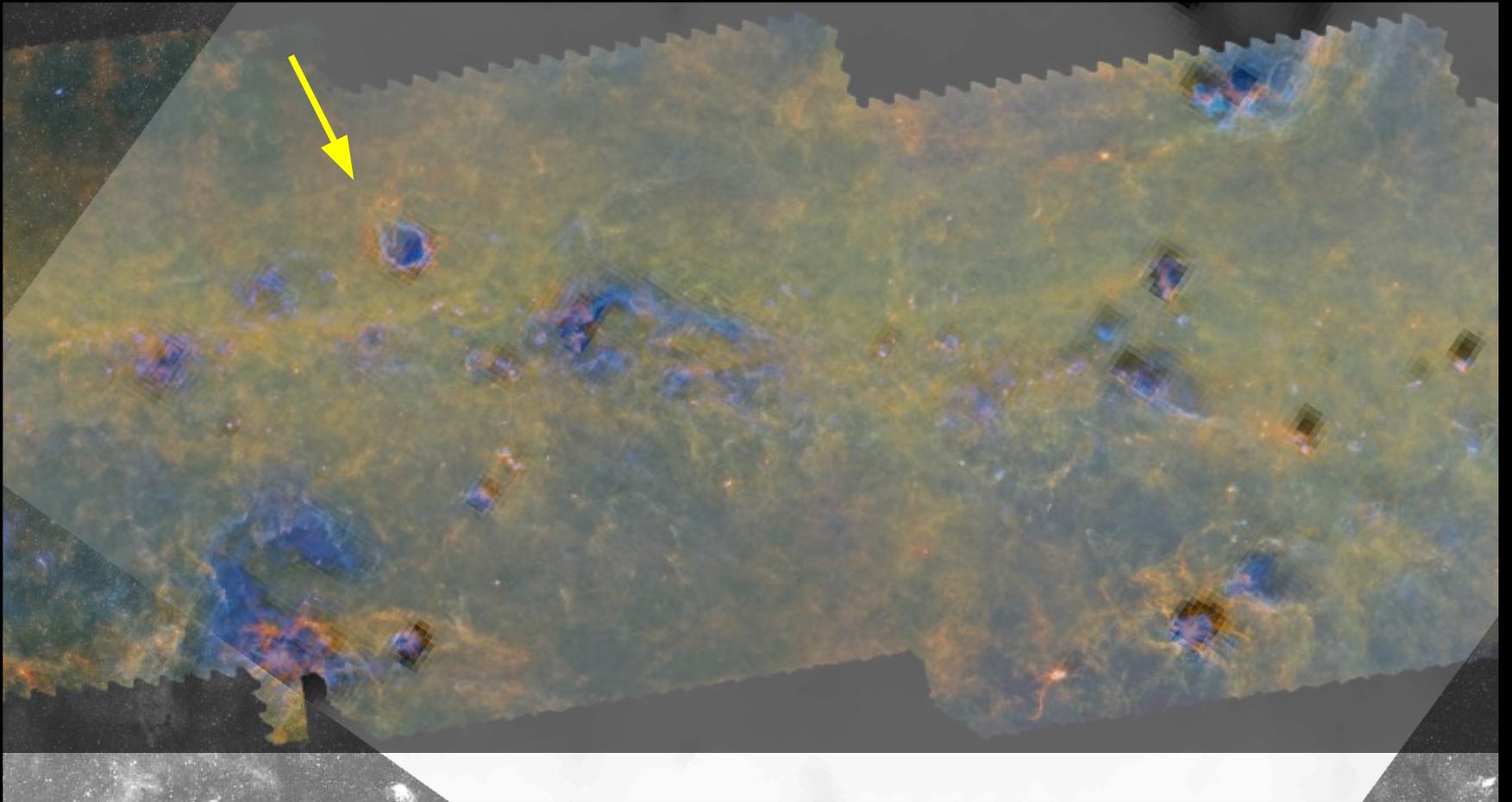
Vision d'une partie du plan de notre Galaxie par Herschel à 70 et 350 μm
Projet HiGAL (P.I. S. Molinari)



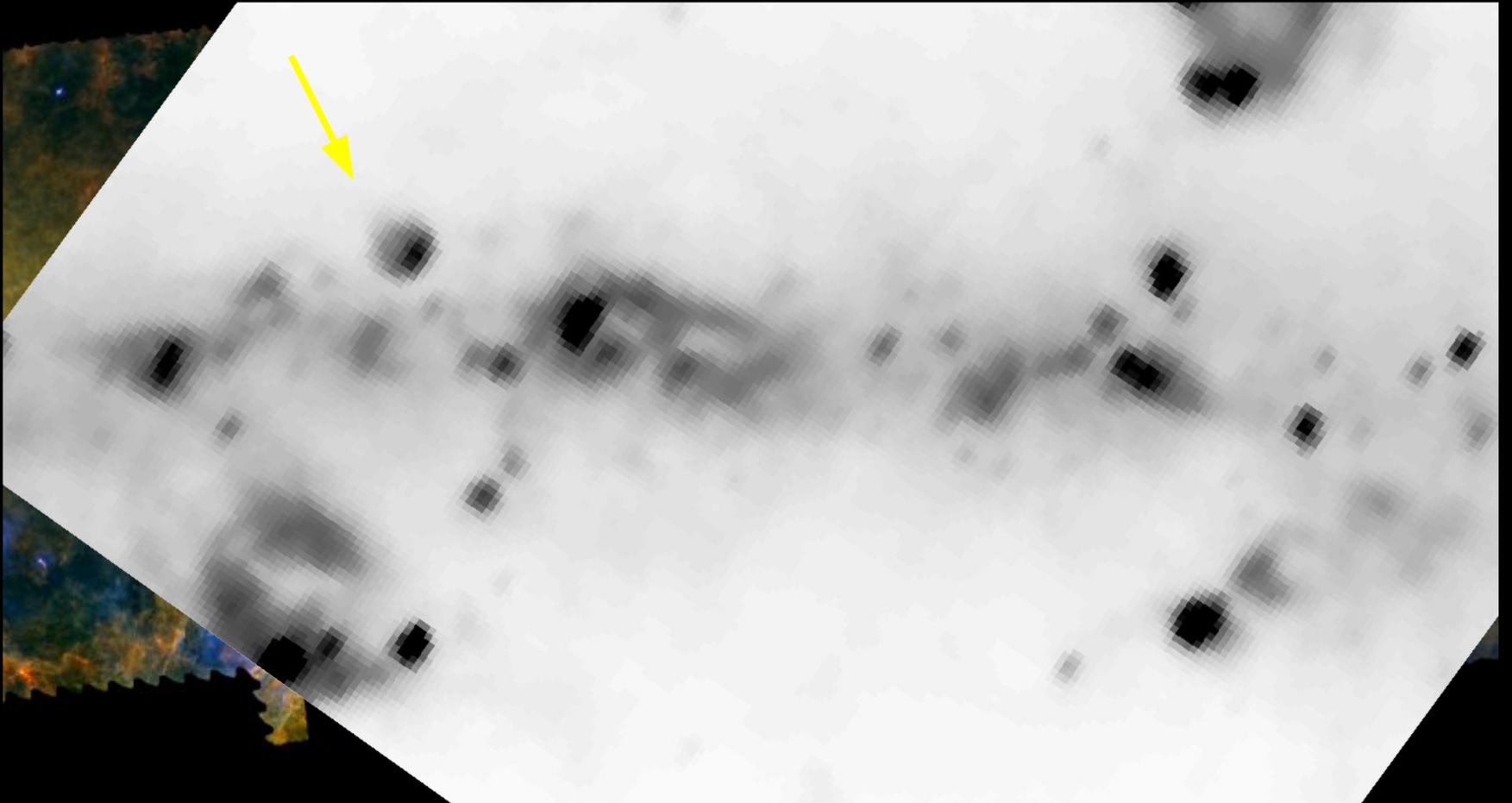
Vision d'une partie du plan de notre Galaxie par Herschel à 70 et 350 μm
Projet HiGAL (P.I. S. Molinari)



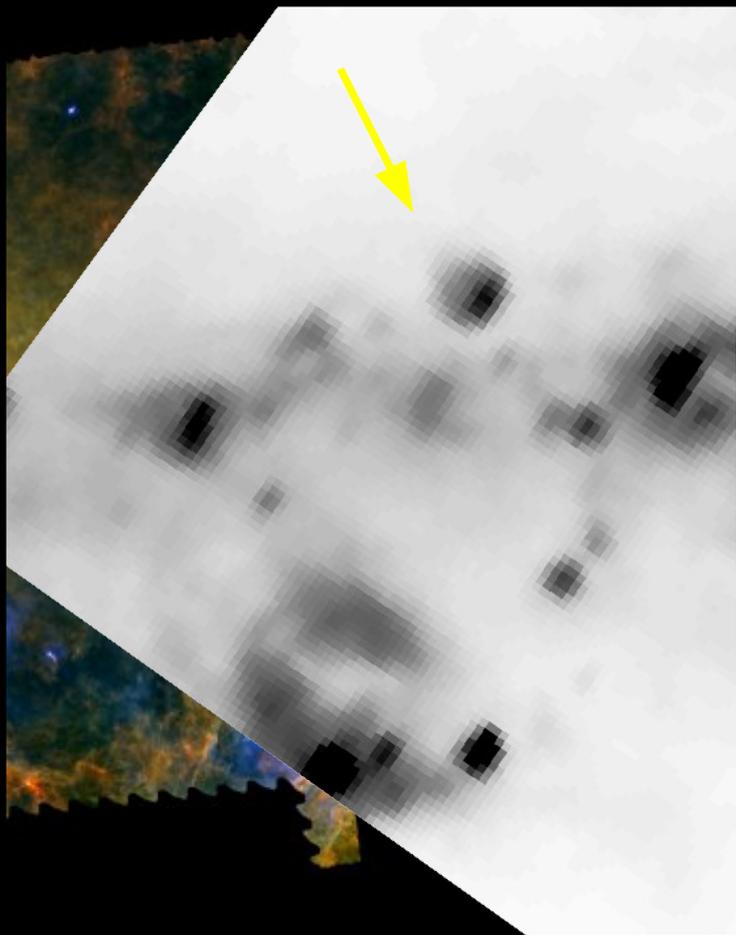
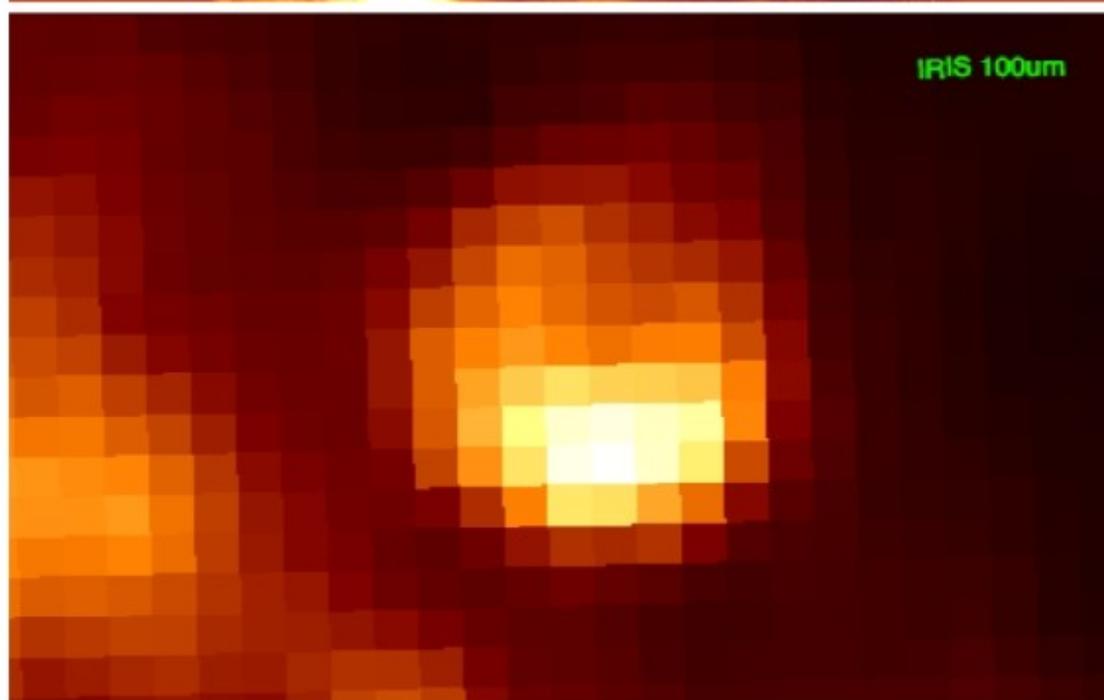
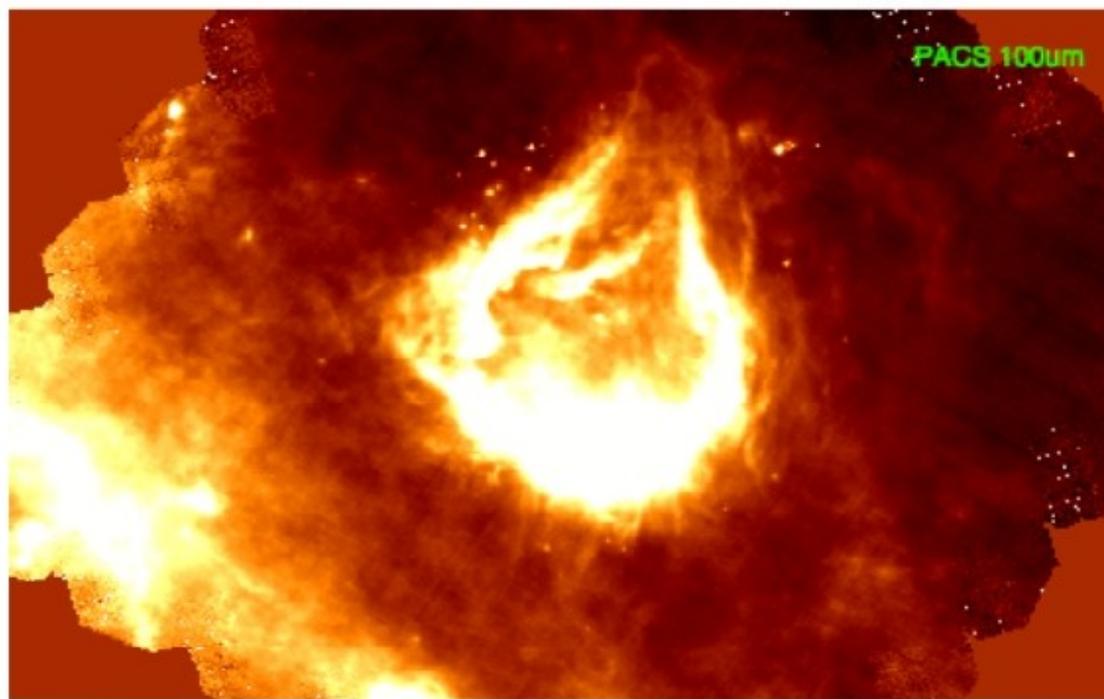
Vision d'une partie du plan de notre Galaxie par Herschel à 70 et 350 μm
Projet HiGAL (P.I. S. Molinari)



Vision d'une partie du plan de notre Galaxie par IRAS à $60\ \mu\text{m}$



Region
RCW120



PACS
Photodetector Array
Camera
and Spectrometer

Résolution 3.2'' à 6.4''

3 filtres:

60 – 85 microns

(le + chaud)

85 – 130 microns

130 – 210 microns

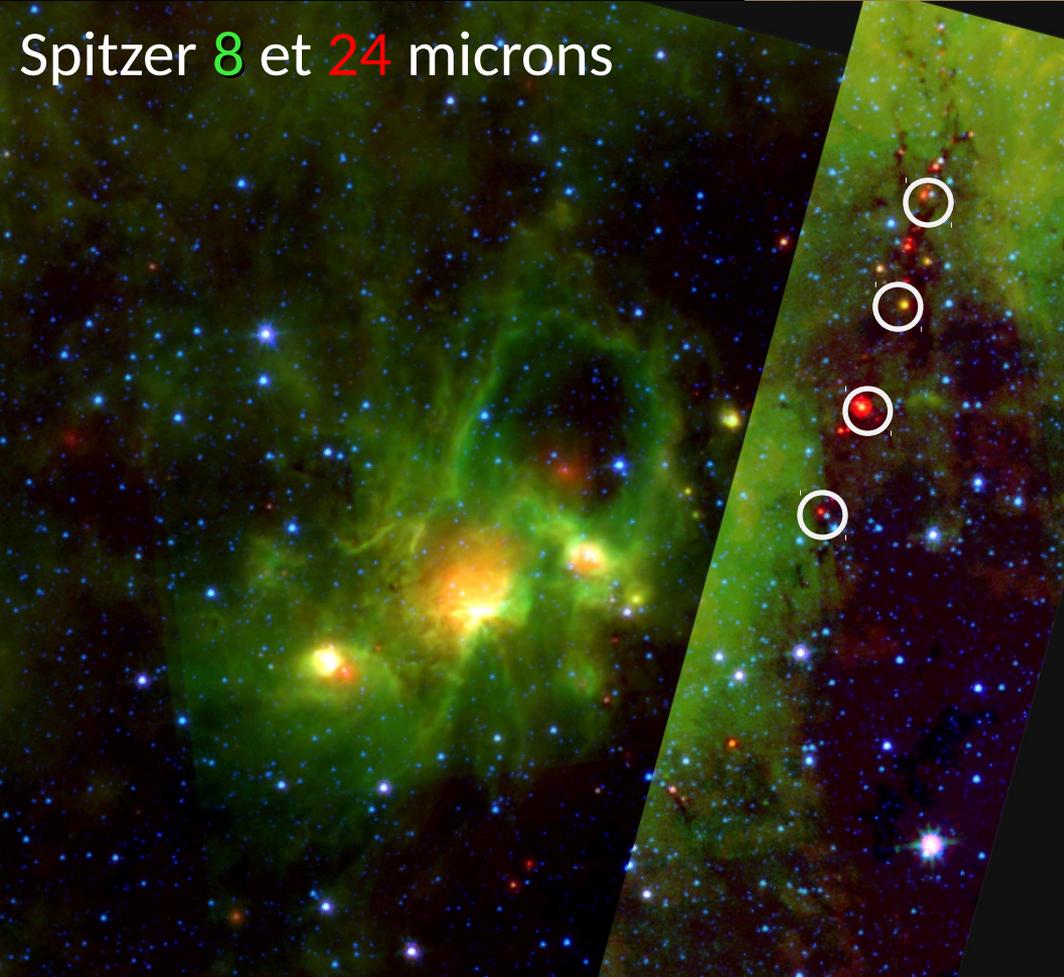
(le + froid)

Coeurs froids = lieux de
formation des étoiles

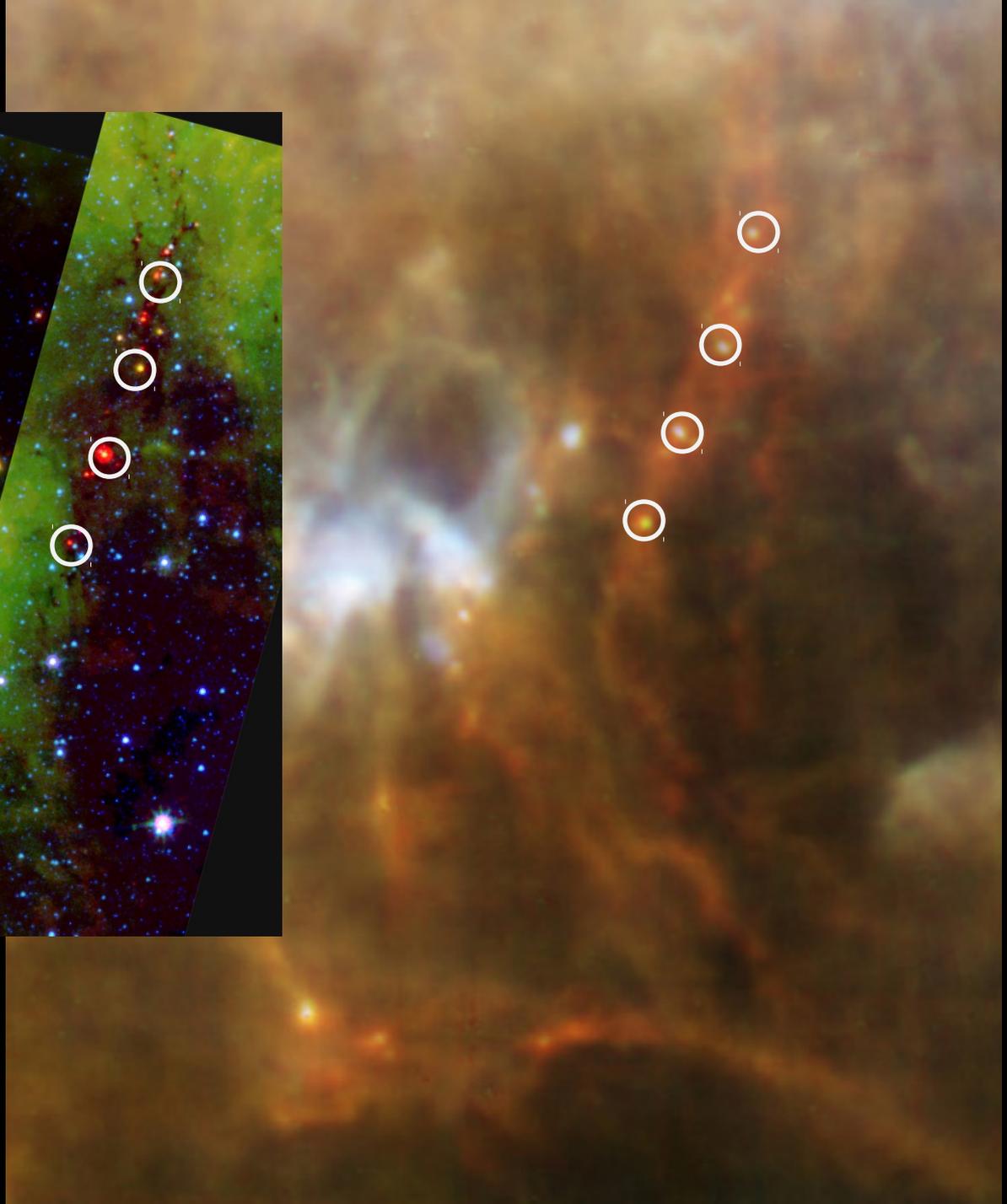


PACS + SPIRE

Spitzer 8 et 24 microns



Coeurs froids = lieu de formation des étoiles



SPIRE

Spectral and
Photometric
Imaging Receiver

250 microns
(résolution 18'')

(le + chaud)

350 microns (25'')

500 microns (36'')

(le + froid)



**Structures filamentaires
du milieu interstellaire froid**

Caractérisation physique des sources

La région NGC 6334

(Tigé et al. 2017)

PACS 70 μm , SPIRE 250 μm et 500 μm



Caractérisation coeurs froids

La région NGC 6334

(Tigé et al. 2016)

PACS 70 μm , SPIRE 250 μm et 500 μm



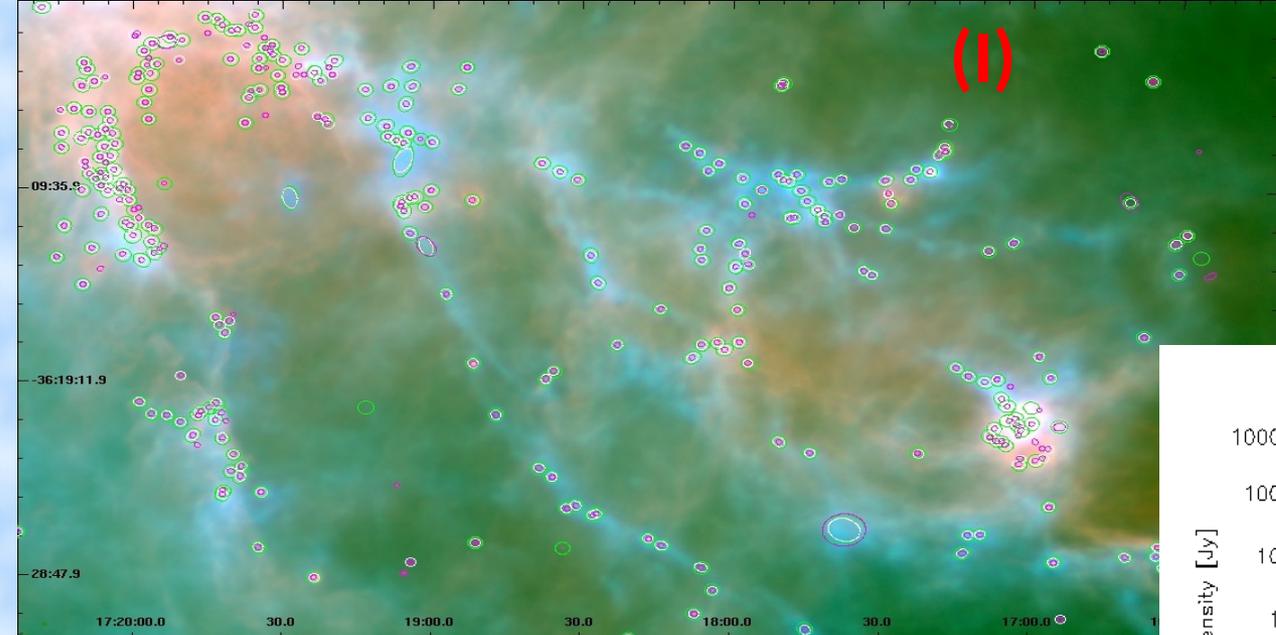
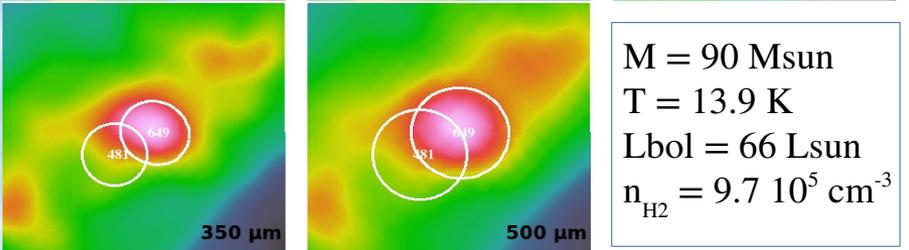
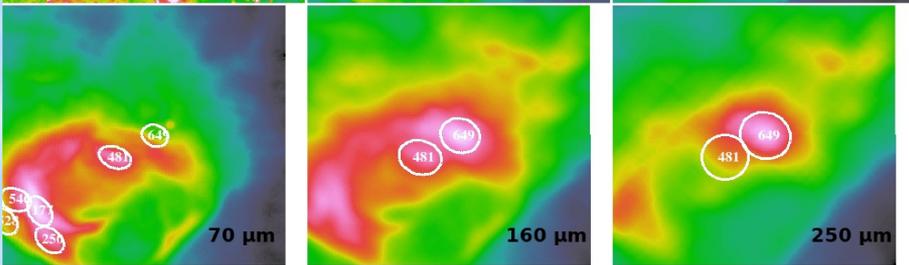
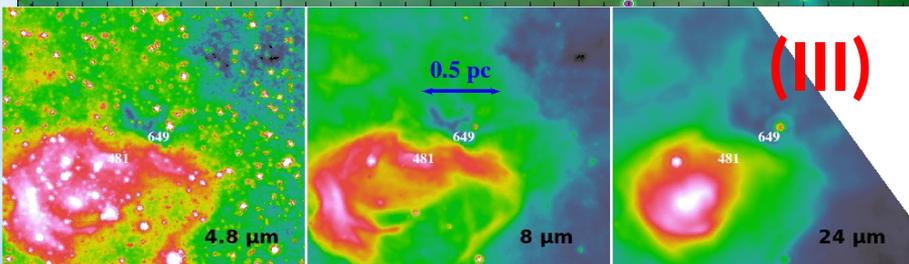
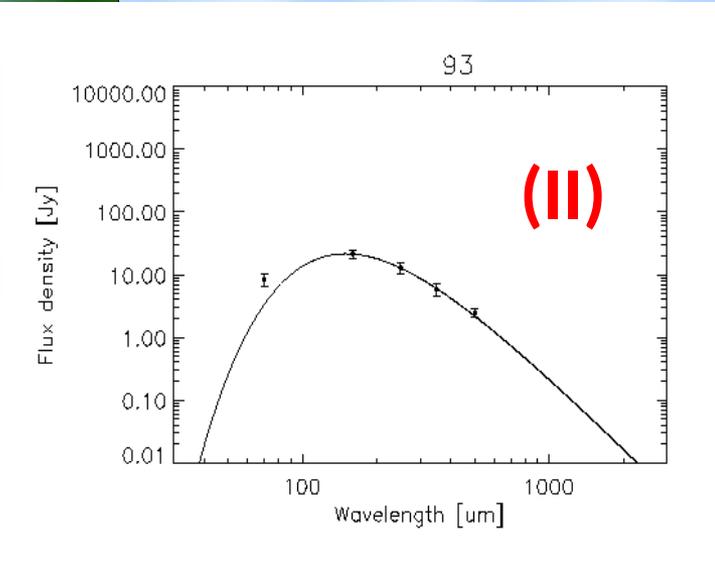


Image Herschel
partie sud de NGC6334:
70 μm , 250 μm , 500 μm

Empreintes elliptiques des sources (rose = 160 μm , blanc = 350 μm et vert = 500 μm).



$M = 90 M_{\text{sun}}$
 $T = 13.9 \text{ K}$
 $L_{\text{bol}} = 66 L_{\text{sun}}$
 $n_{\text{H}_2} = 9.7 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$



- I) Identification des coeurs + mesure du flux lumineux
 - II) Caractérisation des sources: Taille, Température, Masse, Luminosité (ajustement d'un modèle)
 - III) Sélection des sources et état d'évolution
- => Formation des étoiles massives (Tigé et al. 2017) :
- accréation de masse pendant la formation de l'étoile
 - le nuage pré-stellaire devient plus compact

La formation stellaire induite par les régions HII

Exemple : la région RCW120

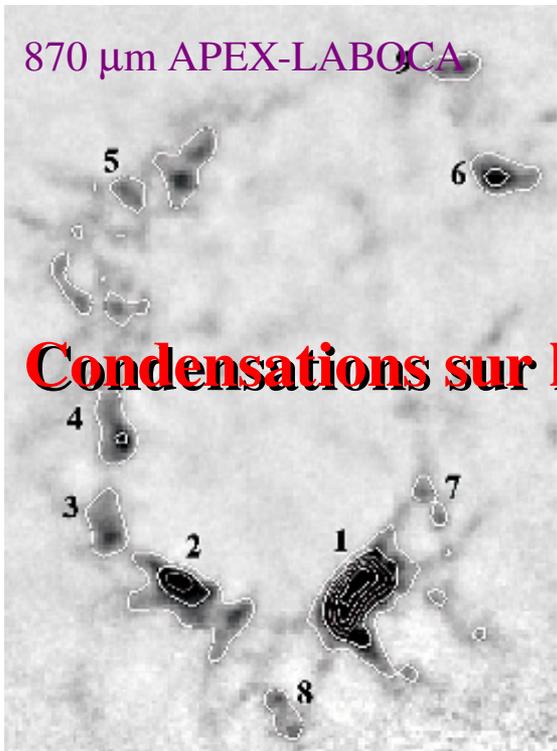
(Zavagno et al. 2010)

Distance = 1300 pc
= 4240 al.



L'étoile ionisante
(O8V)

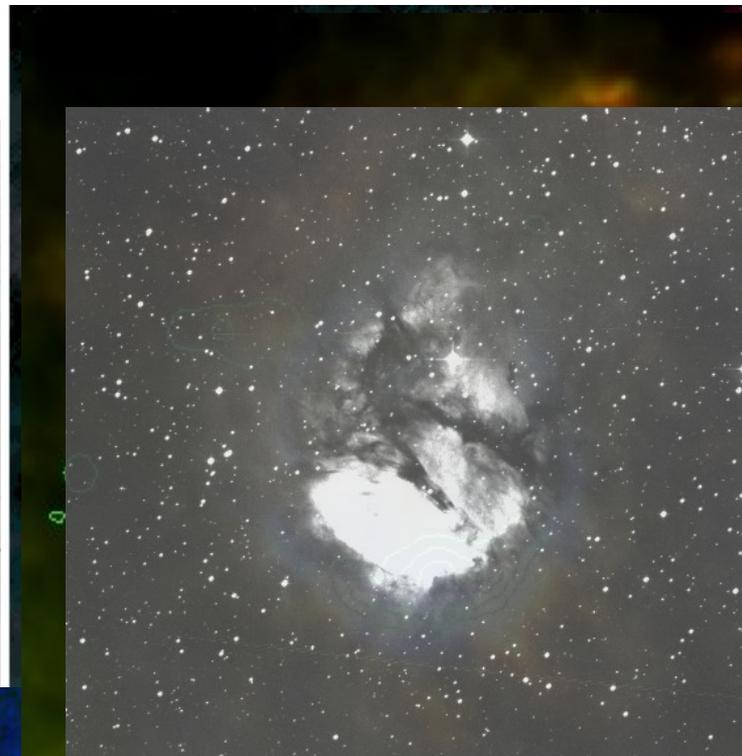
870 μm APEX-LABOCA



Spitzer 8 μm



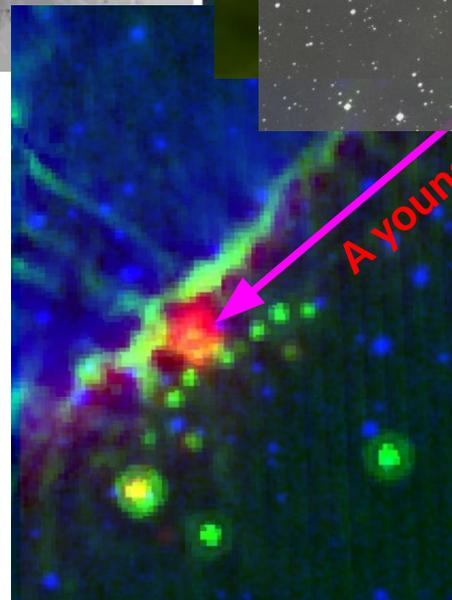
Condensations sur le bord de RCW120



250 μm Herschel
500 μm Herschel



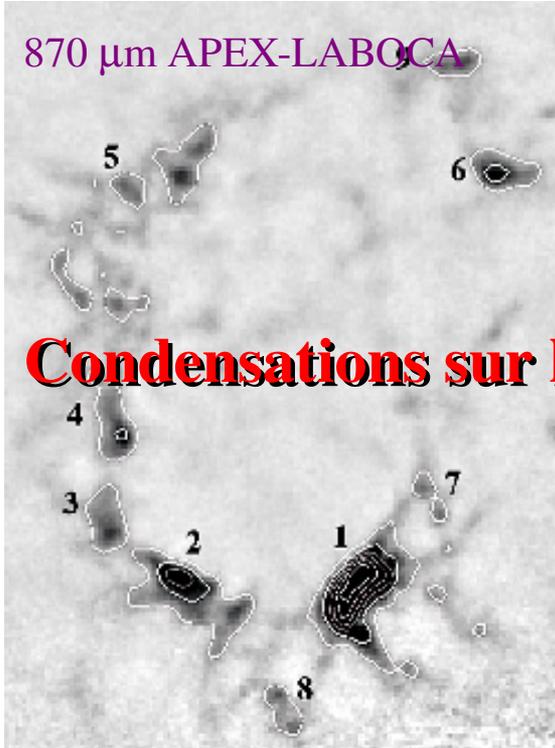
Image H α = gaz ionisé



A young massive star

H α
24 μm Spitzer
100 μm Herschel

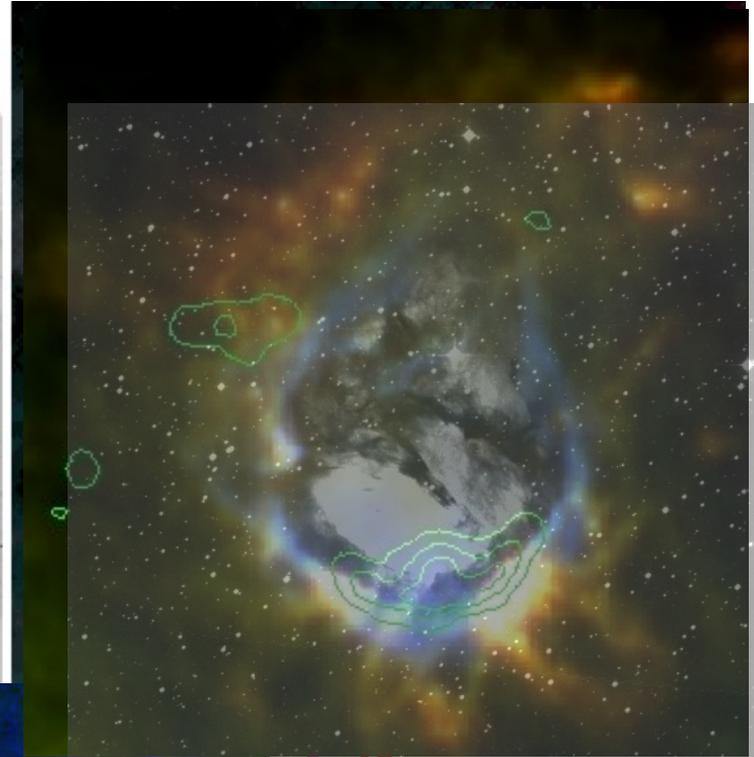
870 μm APEX-LABOCA



Spitzer 8 μm



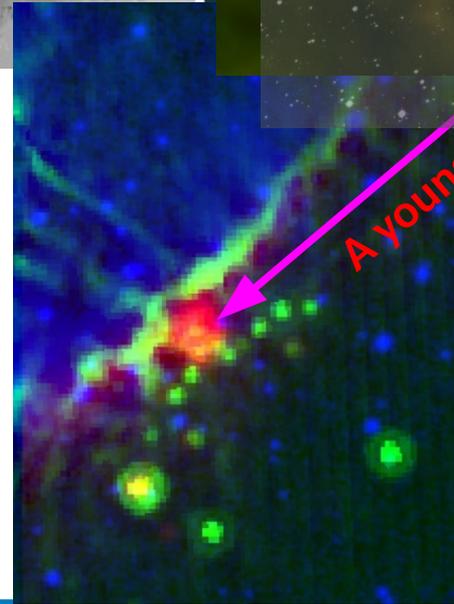
Condensations sur le bord de RCW120



250 μm Herschel
500 μm Herschel



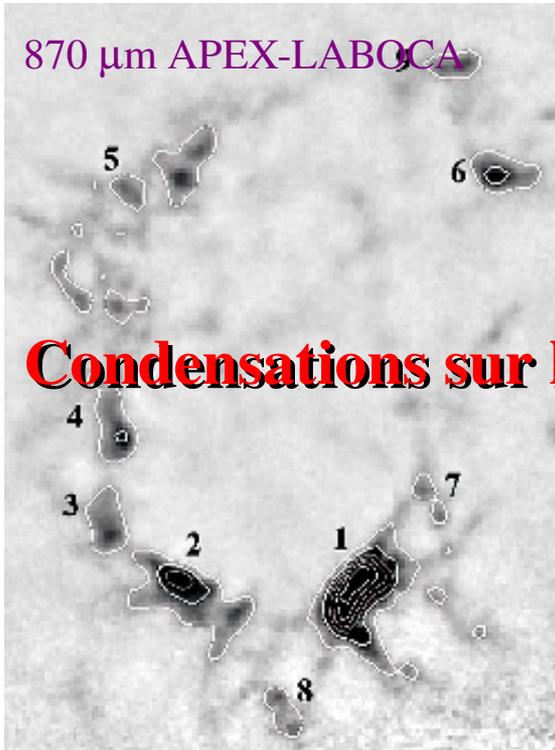
Image H α = gaz ionisé



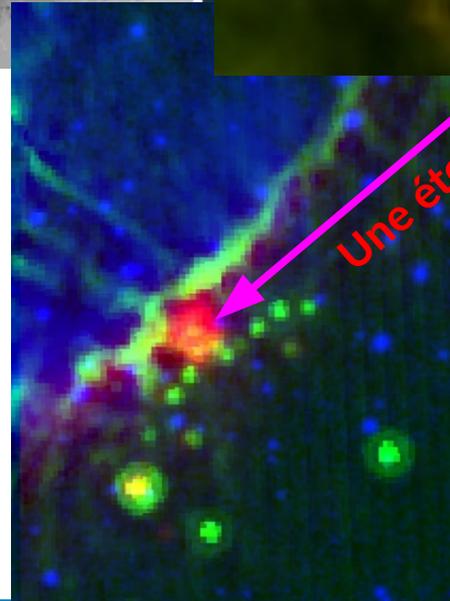
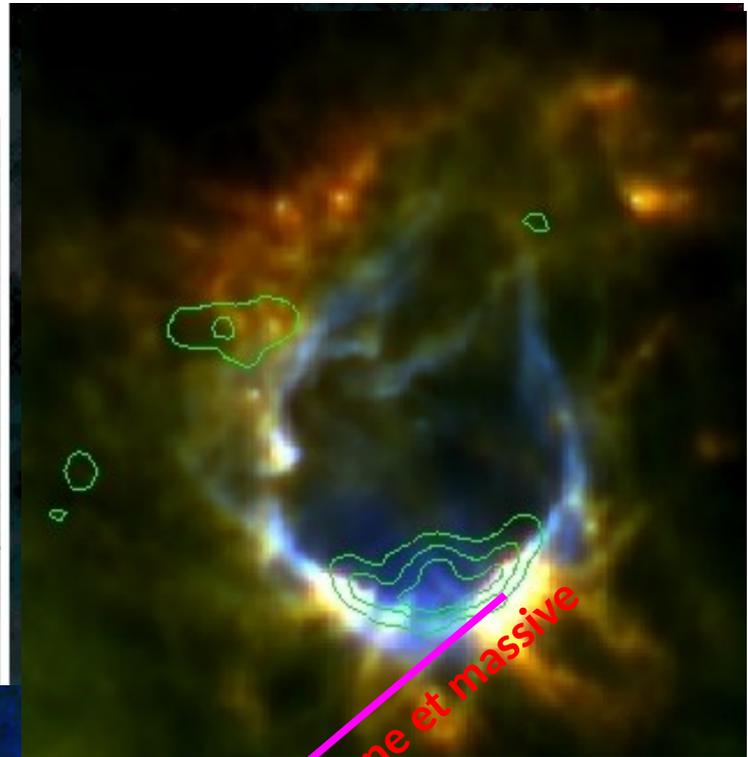
H α
24 μm Spitzer
100 μm Herschel

A young massive star

870 μm APEX-LABOCA



Spitzer 8 μm



Une étoile jeune et massive

250 μm Herschel
500 μm Herschel

H α
24 μm Spitzer
100 μm Herschel

La formation stellaire induite par les régions HII : le scénario

L'expansion des régions H II peut induire la formation de nouvelles étoiles
(e.g. Zavagno et al. 2006; Deharveng et al. 2009; Bieging et al. 2009)

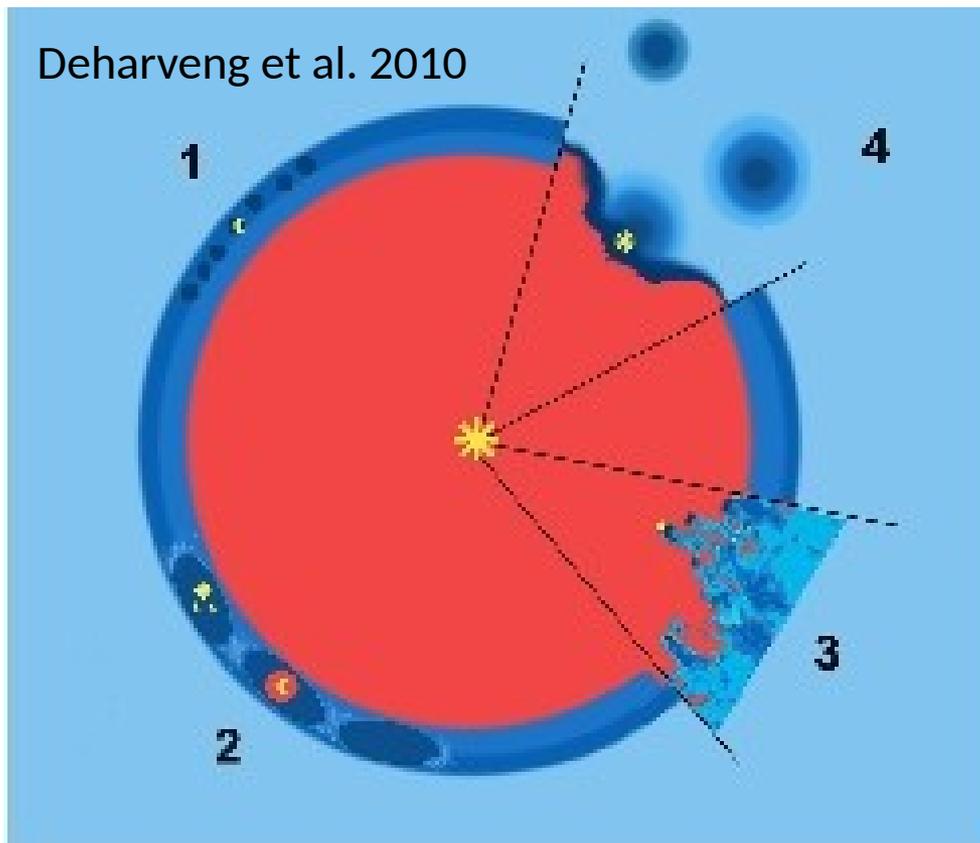


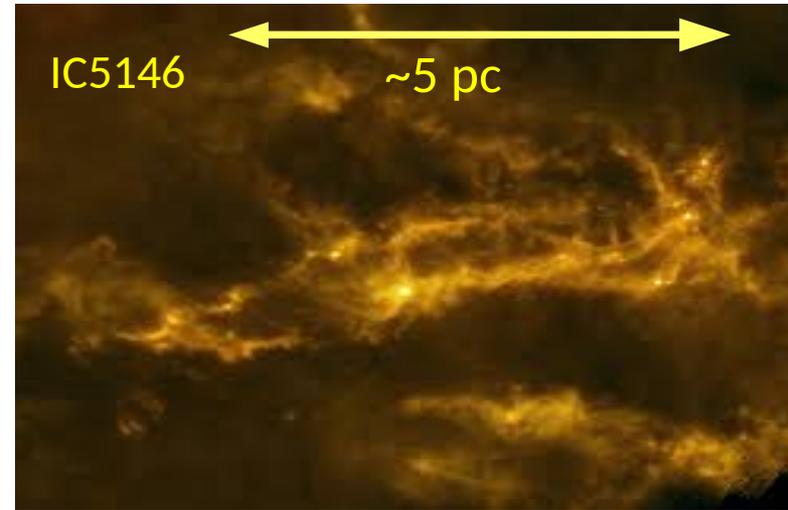
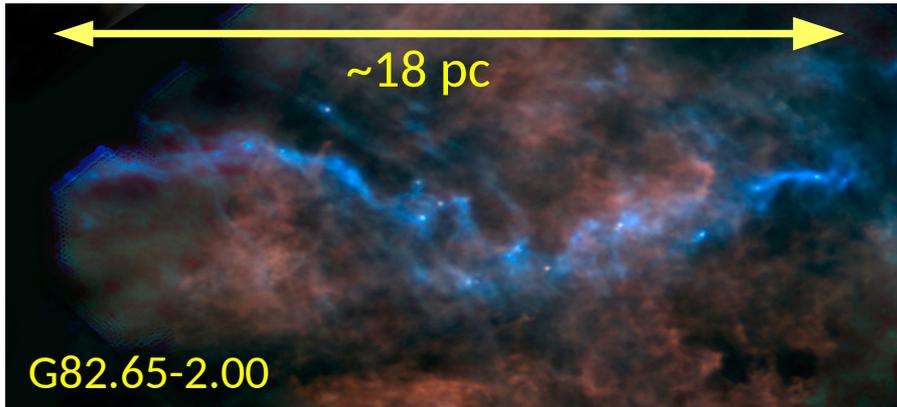
Schéma de l'expansion d'une région HII (rouge) et de son milieu neutre environnant (bleu).

Les différents processus:

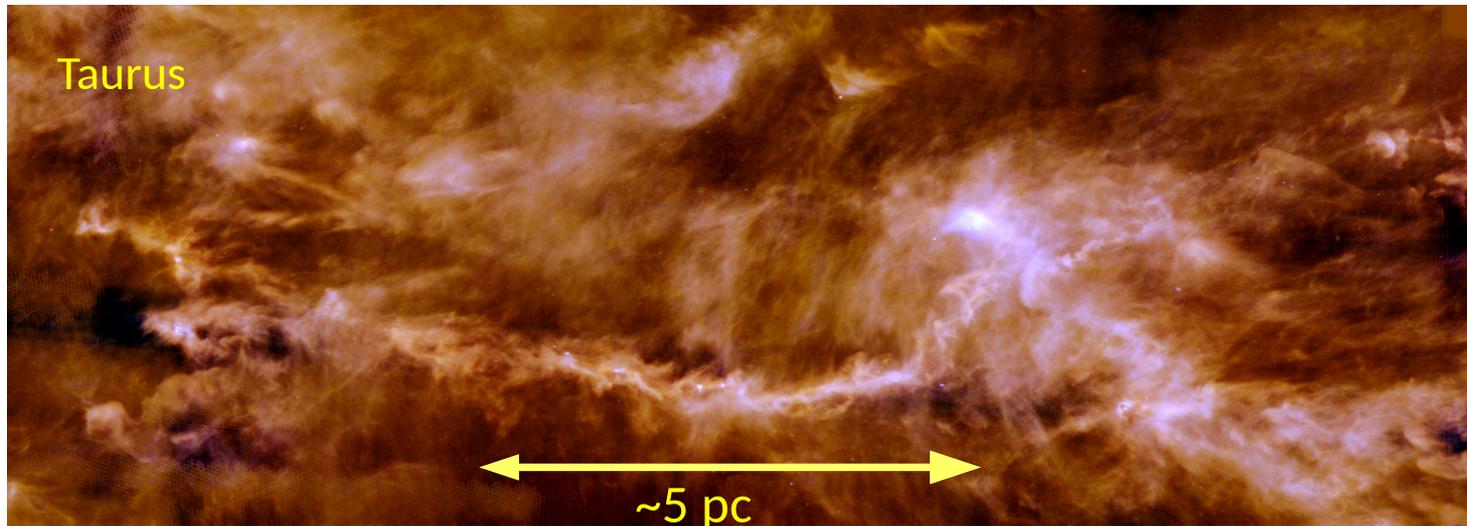
- 1 – Instabilités gravitationnelles à petite échelle
- 2 – Instabilités gravitationnelles à grande échelle
- 3 – Action de l'émission ionisante de l'étoile sur le milieu turbulent ambiant
- 4 – Compression radiative de coeurs denses pré-existants

Etude des filaments

Programmes Herschel/Planck: « cold core »,
« Gould belt », « HiGal »

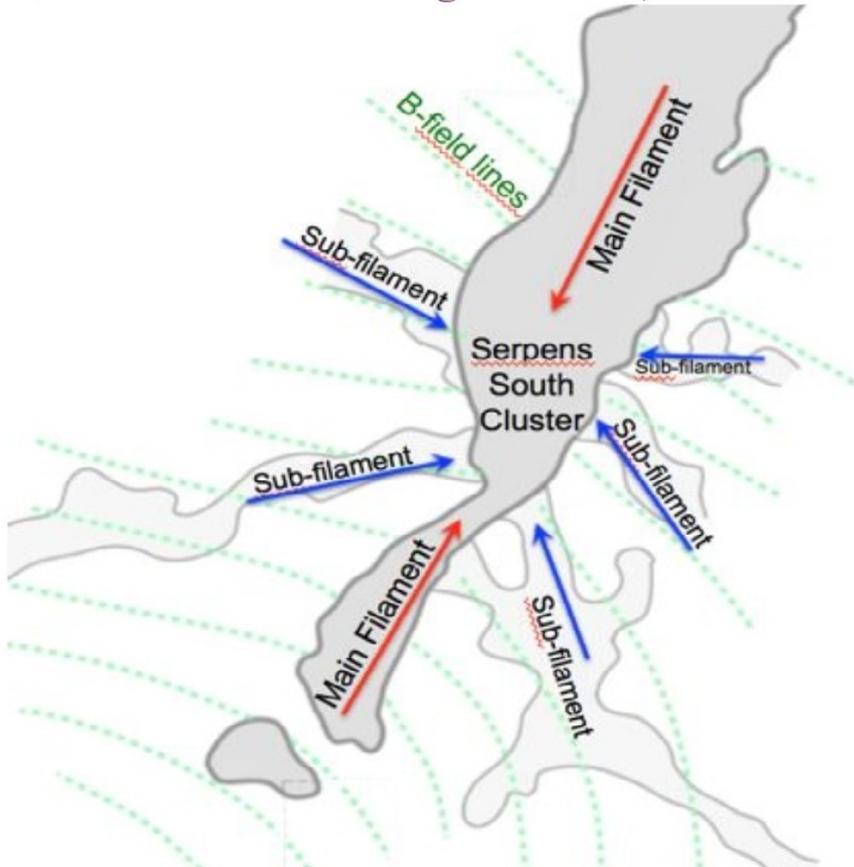


Des longueurs différentes mais des largeurs
similaires ~ 0.1 pc
(e.g. Arzoumanian et al. 2011)

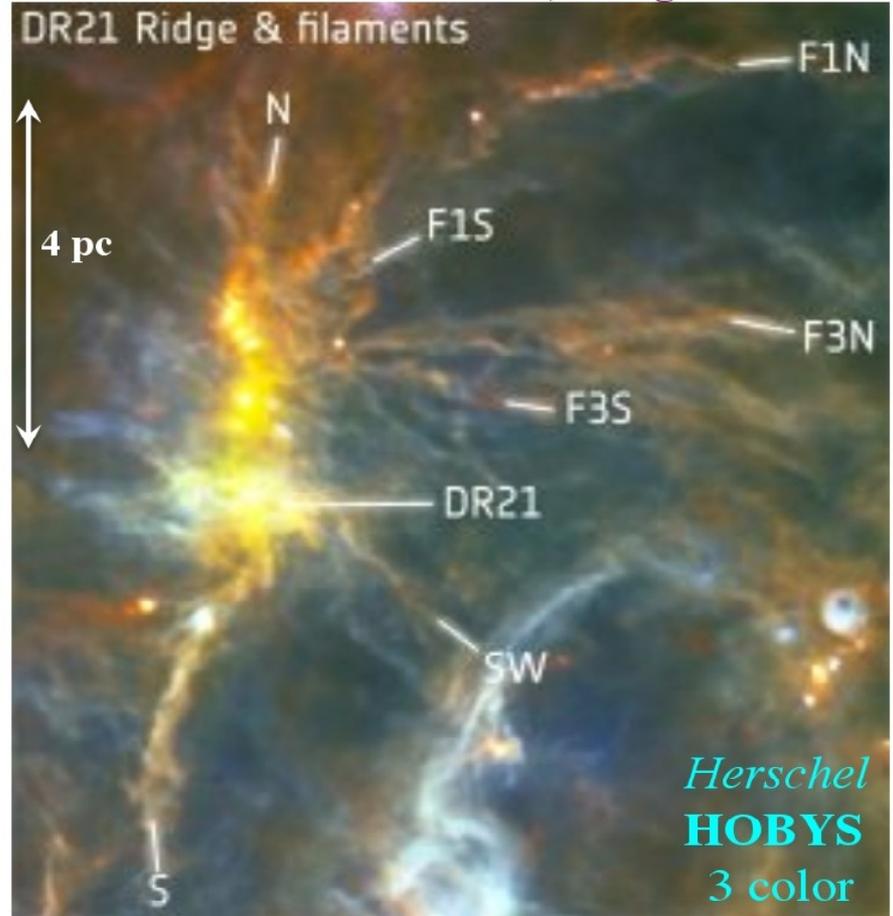


Filament principal + un réseau de petits filaments perpendiculaires

Sugitani+2011, H. Kirk+2013



Hennemann, Motte et al. 2012
Also Schneider+2010, Csengeri+2011



Conclusions et perspectives

Les résultats d'Herschel

- Nous vivons dans un disque Galactique dominé par des **Filaments de poussière froide**

=> propriétés et origine ?

Simulations numériques

- Les étoiles se forment préférentiellement le long de ces filaments ou sur le bord de régions HII

=> lien avec la structure spirale de notre Galaxie ?

Etudes statistiques en cours

- Etude précise des coeurs denses massives enfin possible !!

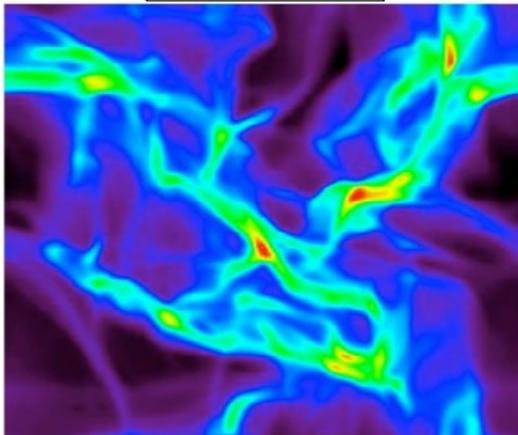
=> comprendre les conditions initiales de la formation des étoiles massives (dynamique et chimie des coeurs ...)

Radio/submm: ALMA, NOEMA ...

(très haute résolution spatiale)

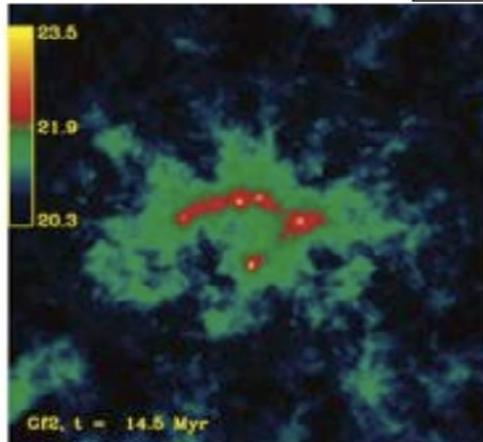
Approches numériques pour comprendre les filaments

Turbulence

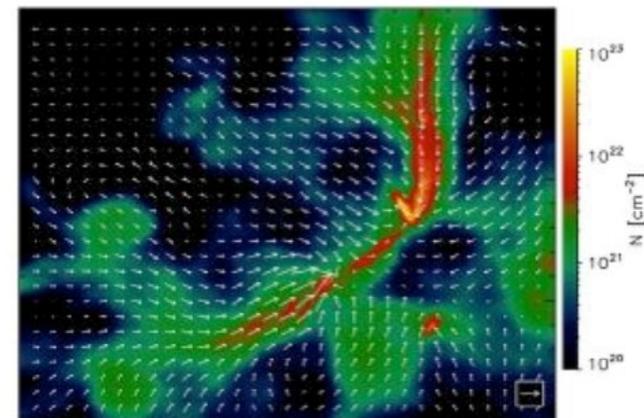


Padoan et al. 2001

Gravity

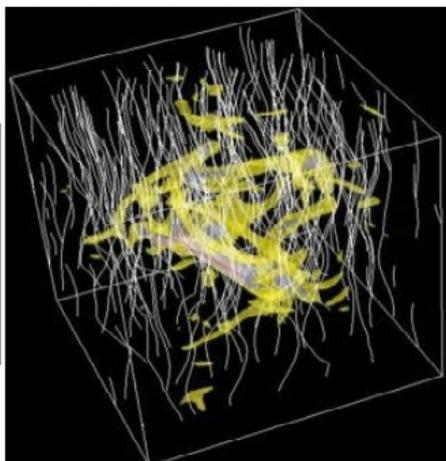


Heitsch et al. 2008

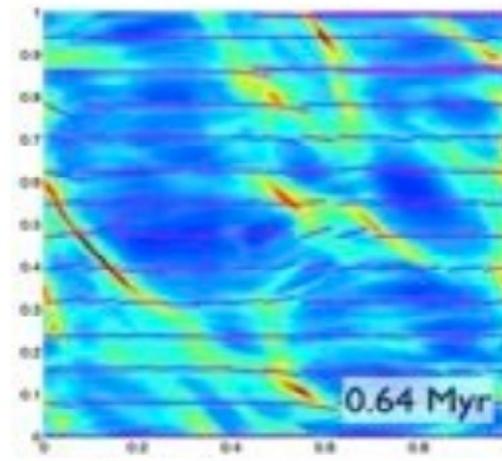


Gomez & Vazquez-Semadeni 2014

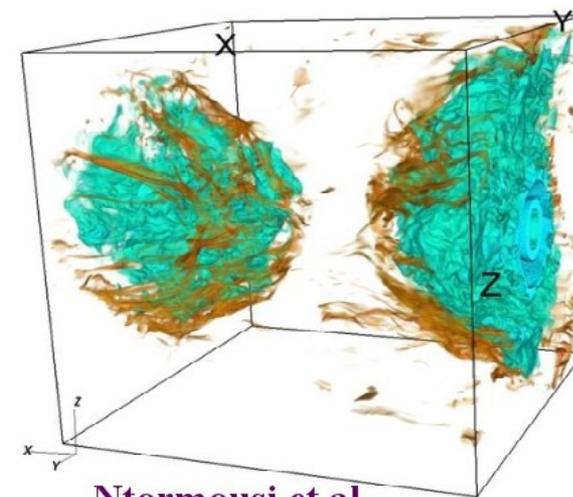
**Turbulence
+
Gravity
+
B fields**



Z.Y. Li et al. 2010



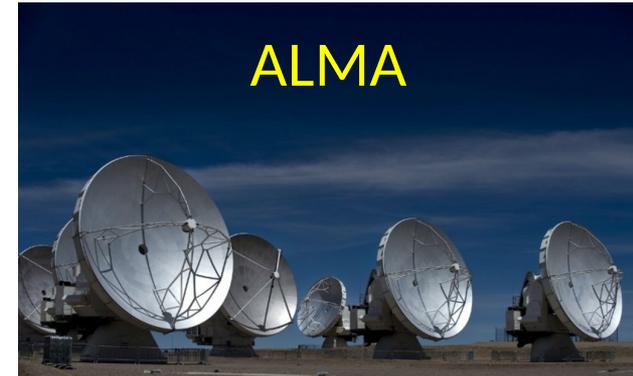
Chen & Ostriker 2014



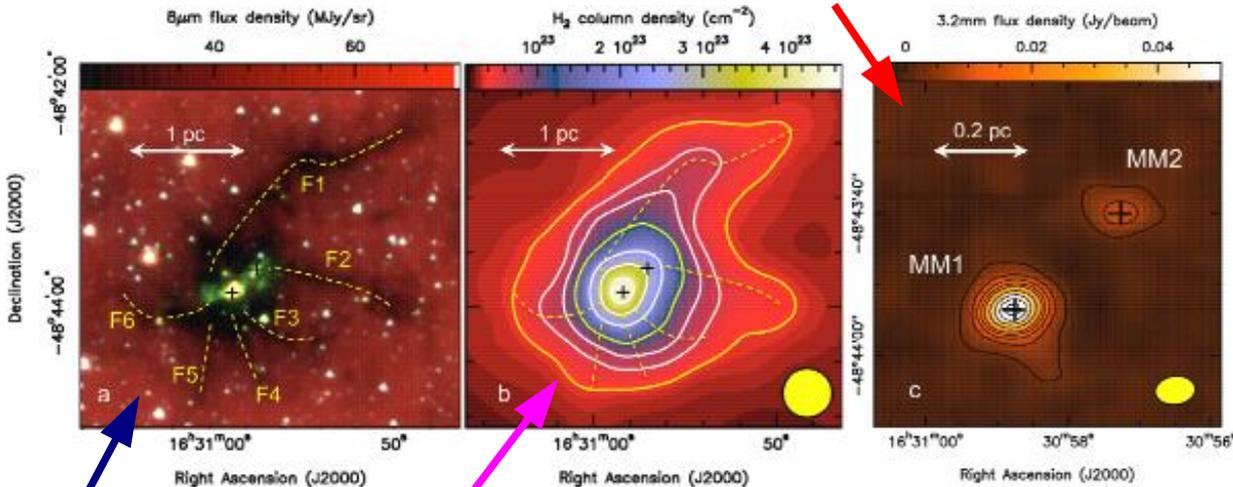
Ntormousi et al.

Les premières observations d'un coeur massif

N. Peretto et al. 2013



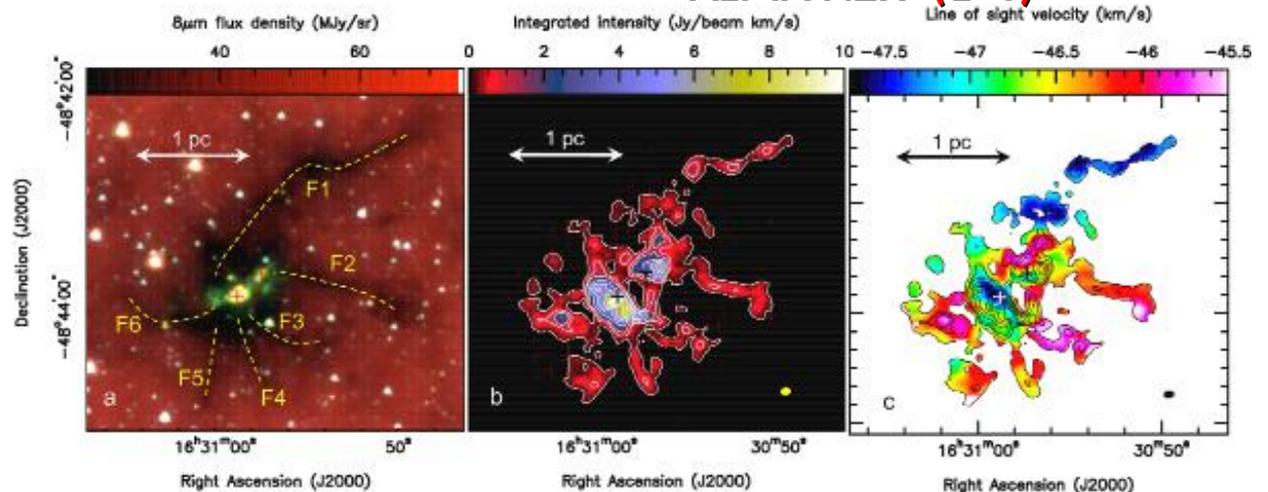
ALMA 3.2 mm



Spitzer

Herschel

ALMA N2H+(1-0)



Mise en évidence que la matière glisse le long des filaments pour « nourrir » les coeurs

La prochaine étape : ALMA et NOEMA !!

