

# Notre Galaxie, naissance des étoiles et des planètes

## ① Voyage dans notre Galaxie

sa morphologie, dynamique, composition

## ② Formation des étoiles dans le milieu interstellaire

l'effondrement gravitationnel

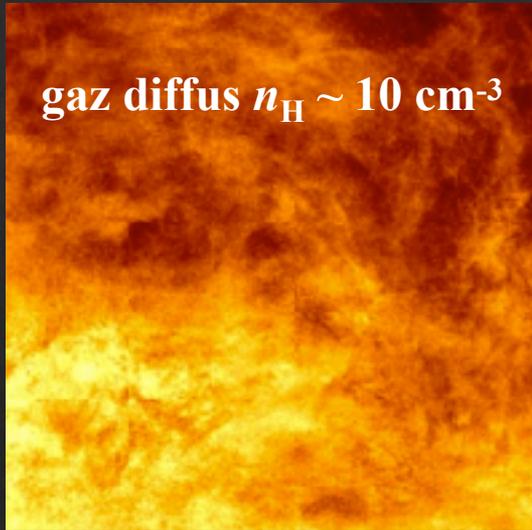
## ③ Histoire d'un système planétaire

le passage d'une proto-étoile à notre système solaire

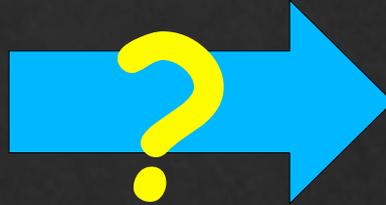


**Comment dans les immenses espaces interstellaires quasi-vides de notre Galaxie les étoiles se forment-elles ? Par quels processus ? Dans quelles régions ? Seules ou en groupe ?**

# Un problème de physique complexe...



1 Myr



## Plan pour aborder cette question:

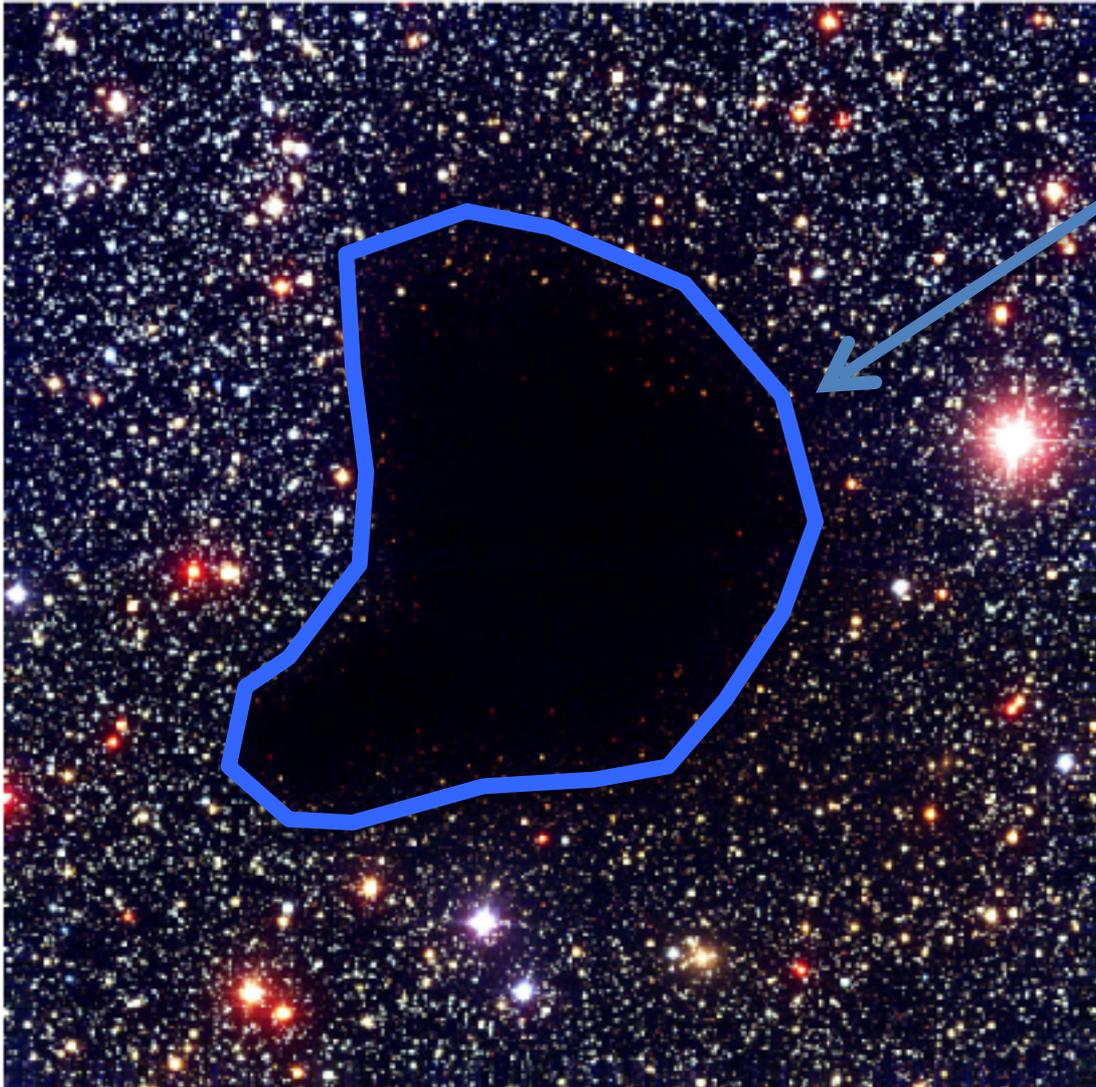
- a) Introduction sur le **Milieu InterStellaire = MIS**  
Zoom dans une région de formation d'étoiles
- b) Composition du MIS
- c) Conditions physiques du MIS
- d) Equilibre versus Effondrement gravitationnel des nuages interstellaires

## a) Le Milieu Interstellaire= L'espace entre les étoiles



- Apparaît noir dans le domaine visible mais n'est pas vide ...

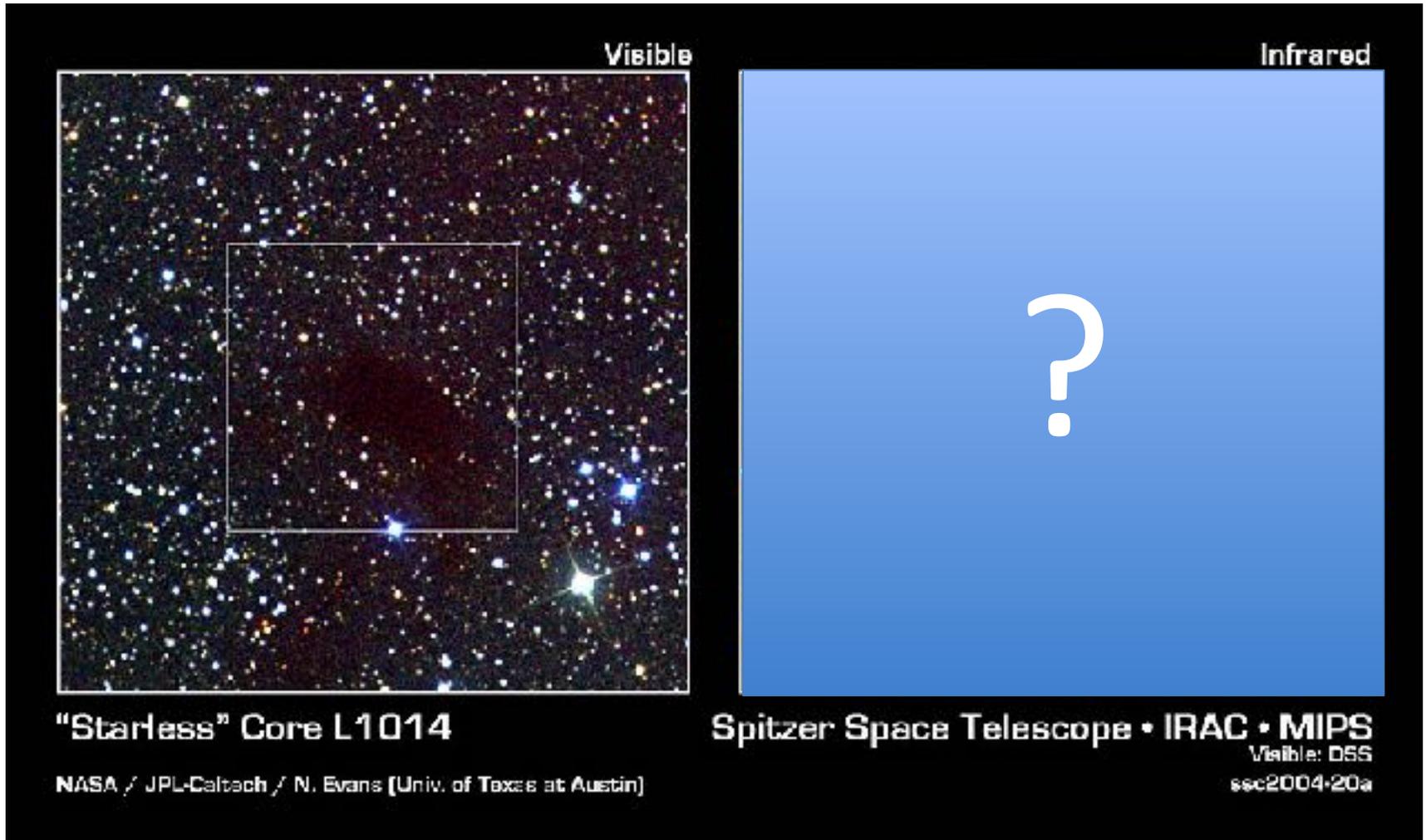
Bien au contraire, dans le MIS on trouve du gaz et de la poussière, à partir desquelles **naissent les nouvelles étoiles**...



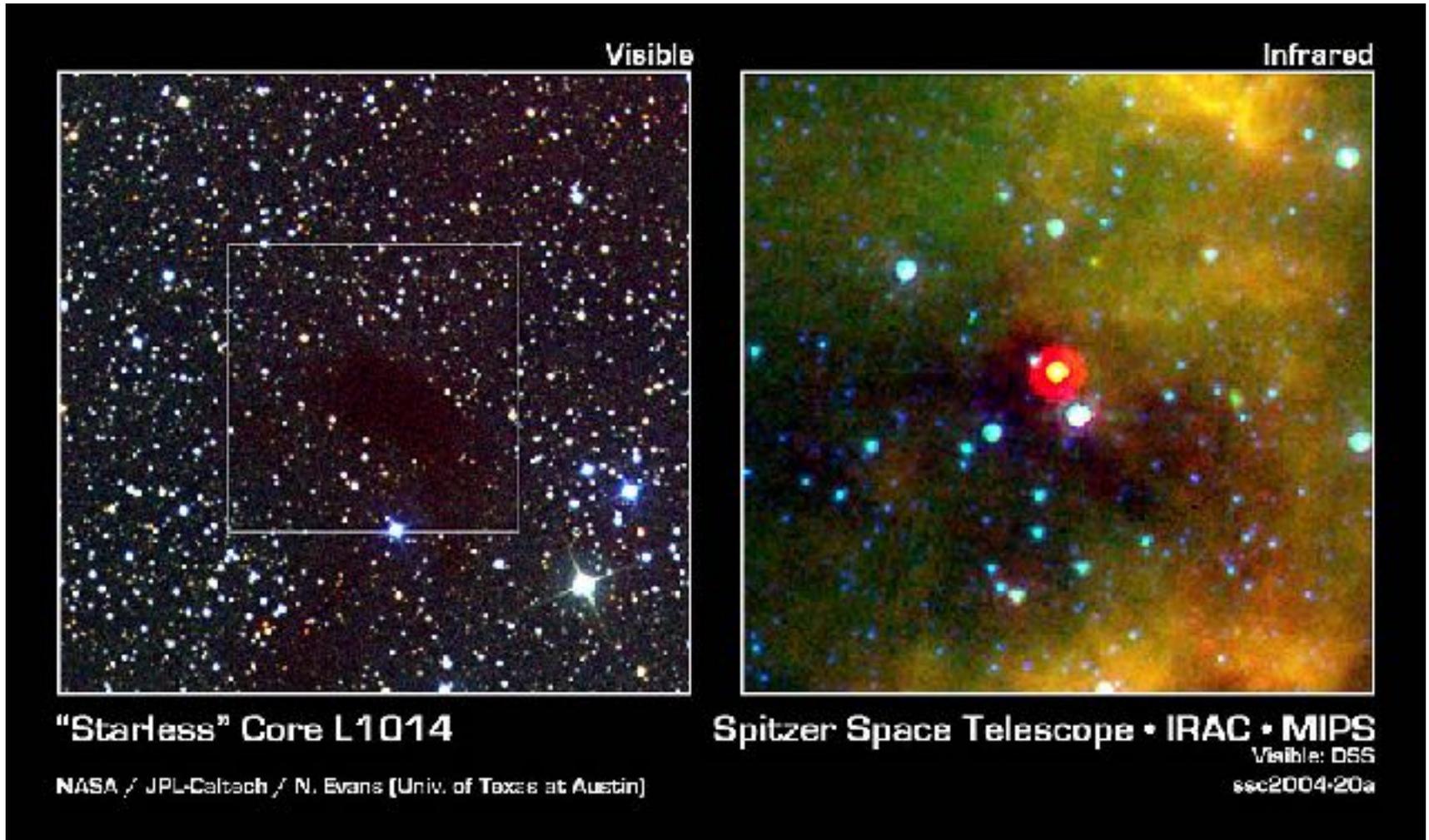
Nuage interstellaire:  
gaz + poussière

NB: nuage apparaît noir dans le visible (on le voit en négatif) car le gaz et la poussière interstellaire absorbent le rayonnement visible émis par les étoiles en arrière plan

*Fin du XX, début XXI : **preuves observationnelles directs** de la formation des étoiles dans le MIS*



*Fin du XX, début XXI : **preuves observationnelles directs** de la formation des étoiles dans le MIS*



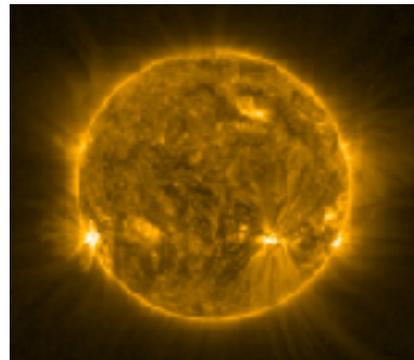
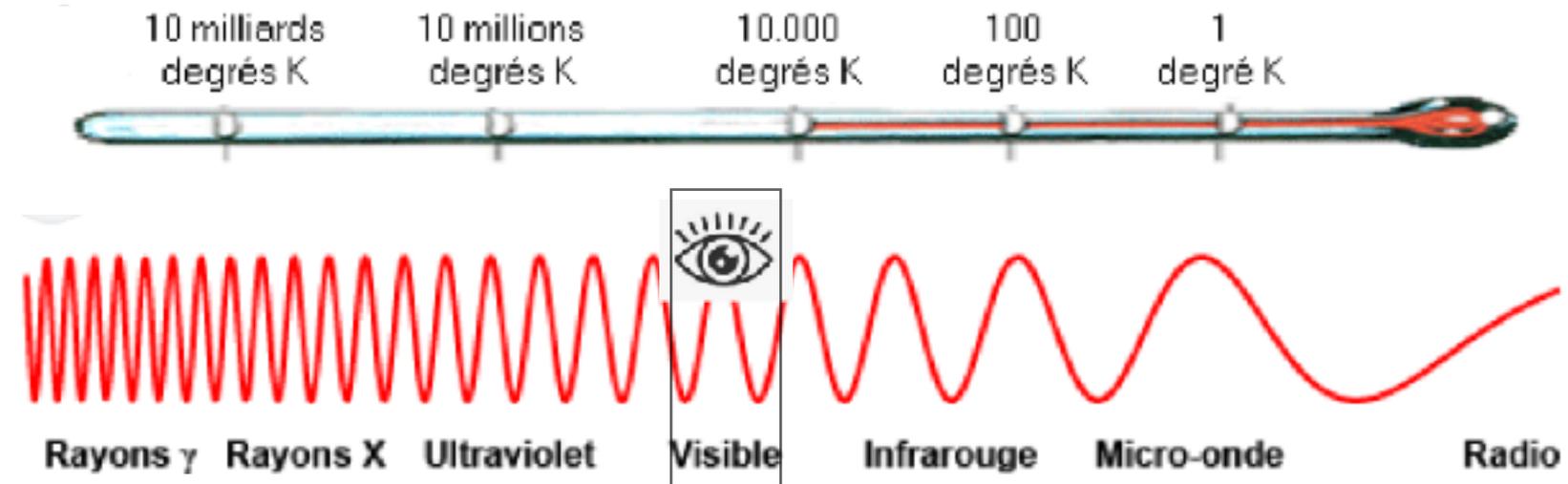
Grâce aux télescopes grande longueur d'onde, nous pouvons observer les nouvelles étoiles à peine former qui nous livrent leurs 1ers instants.

# Pourquoi seul le domaine grande longueur d'onde permet d'observer la naissance des étoiles ?

Quand les étoiles se forment, elles sont

1. **Froides** (les réactions nucléaires n'ont pas commencées)

**loi de Wien**



# Pourquoi seul le domaine grande longueur d'onde permet d'observer la naissance des étoiles ?

Quand les étoiles se forment, elles sont :

2. **Enfouies** dans le *cocon* de gaz et de poussière interstellaire qui leur a donné naissance. Ce *cocon* absorbe la lumière à courte longueur d'onde.



Mais quelle condition faut-il pour observer dans le domaine IR-submm ?

**S'affranchir de l'atmosphère**



GAMMA

X-RAY

ULTRAVIOLET

VISIBLE

INFRARED

MICROWAVE

RADIO



WEBB

ROMAN

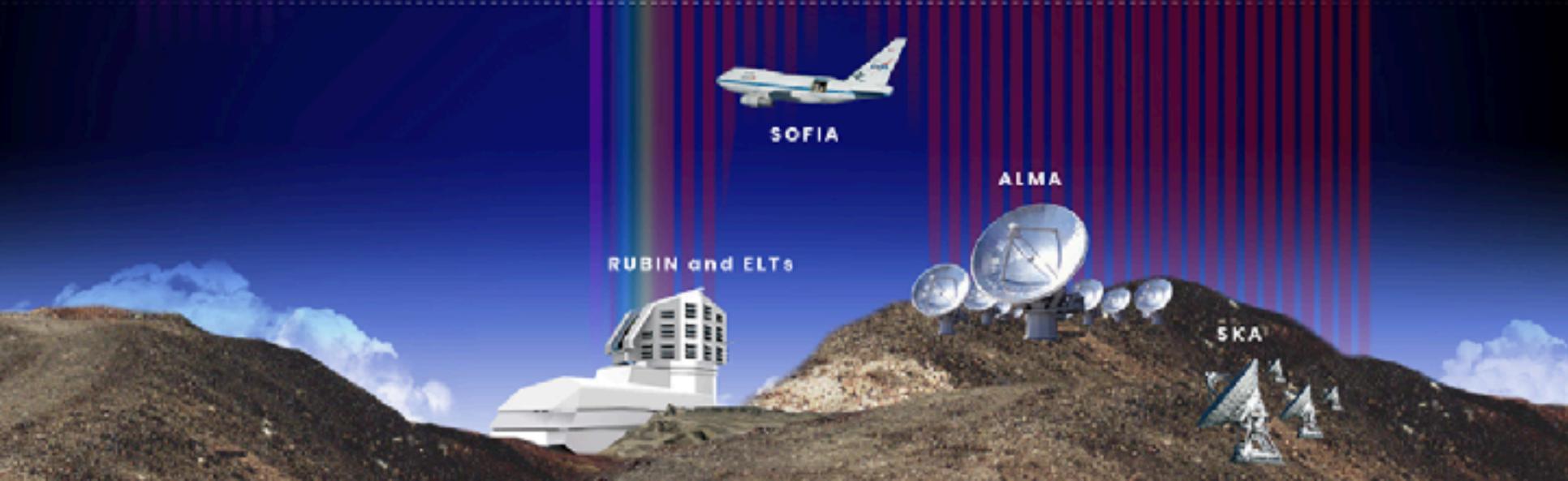
EUCLID

HUBBLE

CHANDRA

FERMI

ATMOSPHERE



SOFIA

ALMA

RUBIN and ELTs

SKA

Les observatoires spatiaux ont dévoilé à partir de 1983 l'émission infrarouge et submm du ciel

### **Découverte de l'Univers froid**

Etude des premiers signes de vie des étoiles et des planètes mais aussi des jeunes galaxies

# Observatoires Infrarouges



**IRAS**  
**1983**



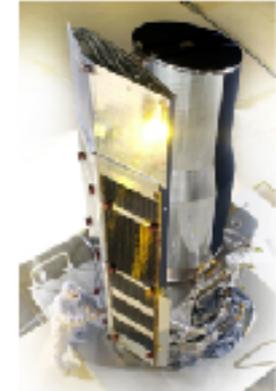
**COBE**  
**1989**



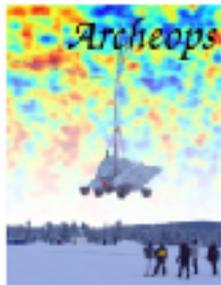
**ISO**  
**1995**



**PRONAOS**  
**1994**



**Spitzer**  
**2003-2009**



**ARCHEOPS**  
**2002**



**Planck**  
**2009-2012**



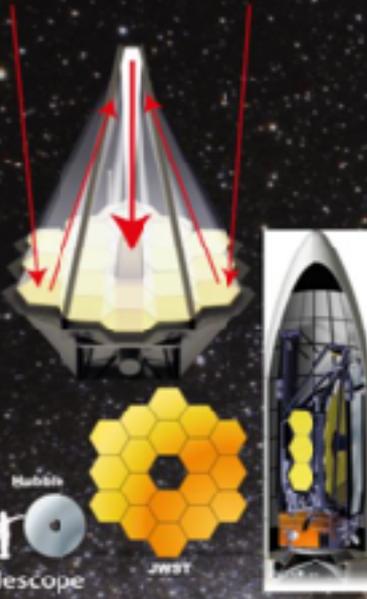
**Herschel**  
**2009-2013**



# Le télescope spatial James Webb

6,5 m, 25 m<sup>2</sup>

Satellite aux dimensions démesurées, de l'ordre de grandeur d'un terrain de tennis pour les protections solaires et un miroir de 6,5 m



Le télescope

6 tonnes

Lancement 25/12/2021 avec Ariane 5

Isim (module d'intégration des instruments)



Miroir en cours d'alignement au CEA/IRAP

4 instruments IR

Le bouclier thermique



taille = court de tennis

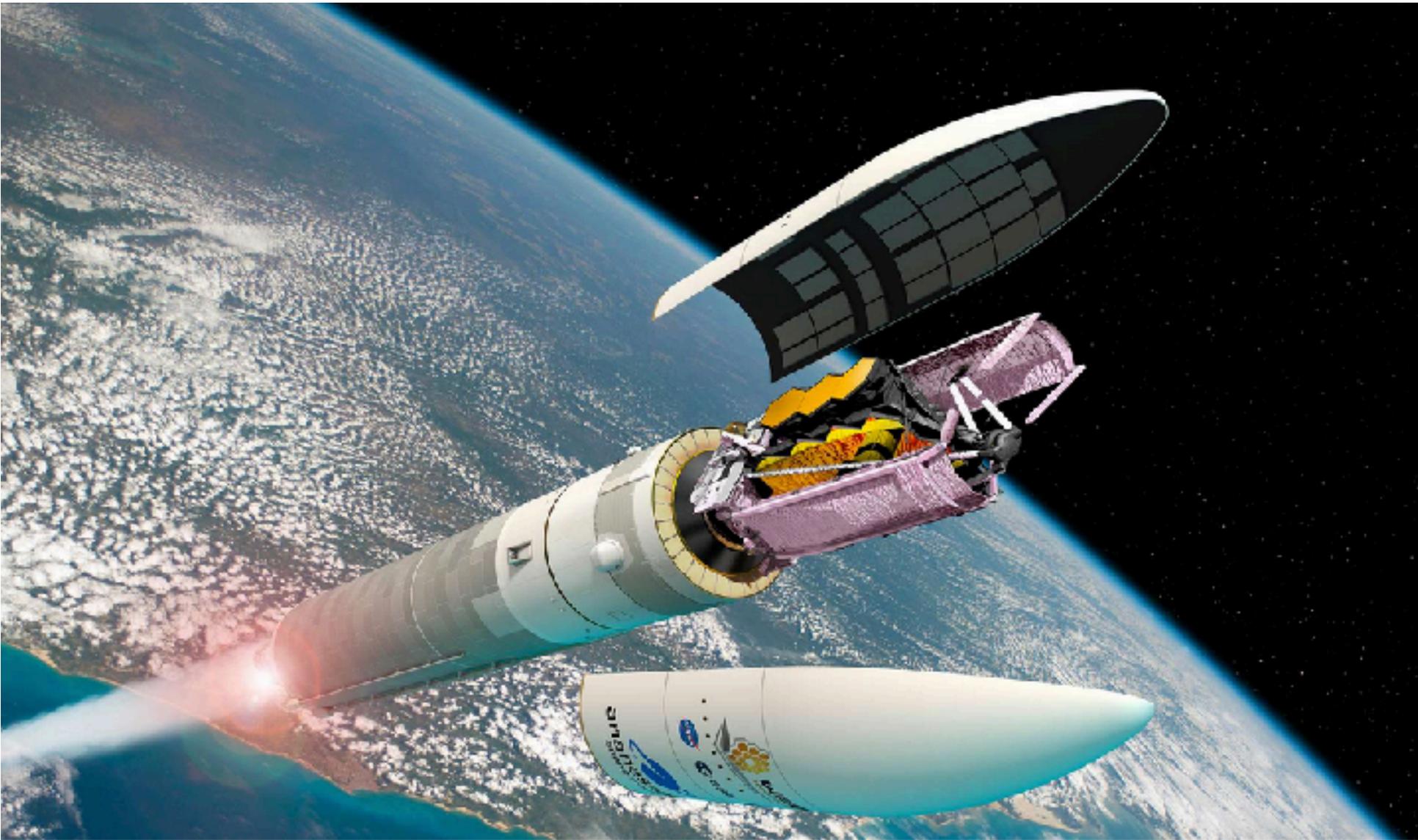


L'antenne

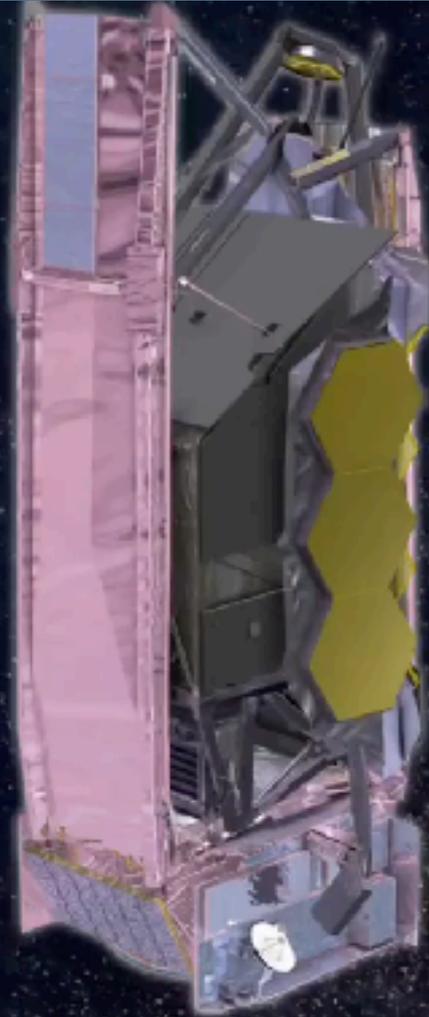


Le module de service

Lancement d'un grand télescope dans l'espace ? Besoin d'Ariane 5!

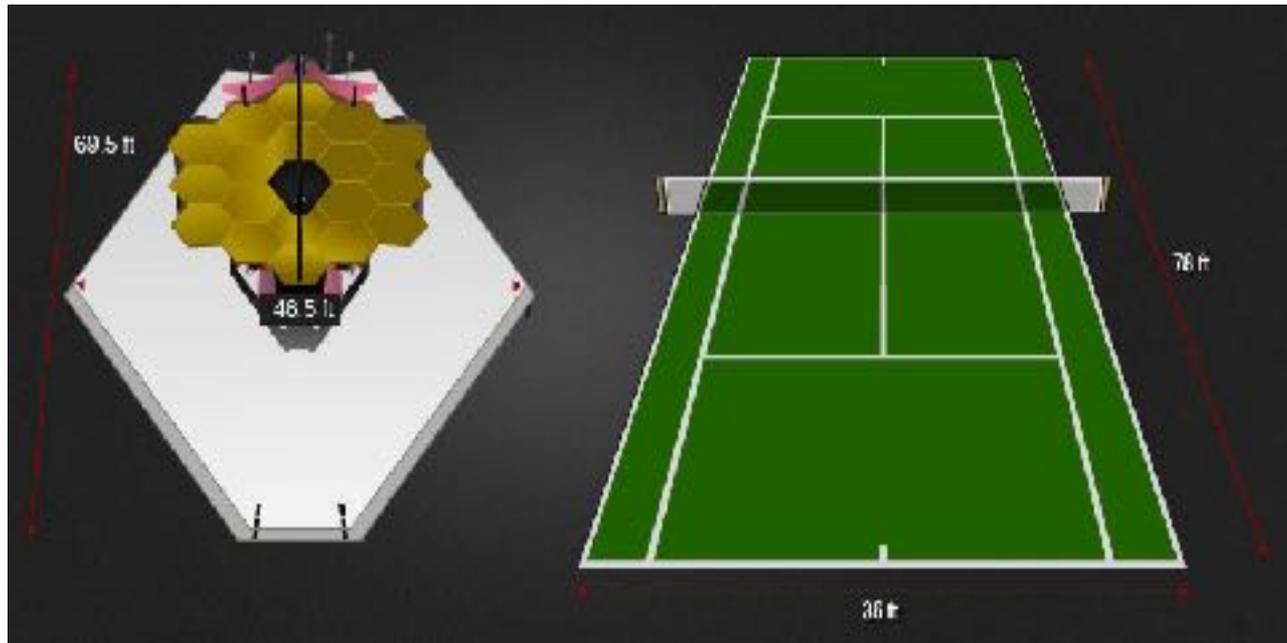


Vidéo du déploiement dans l'espace - 1:40



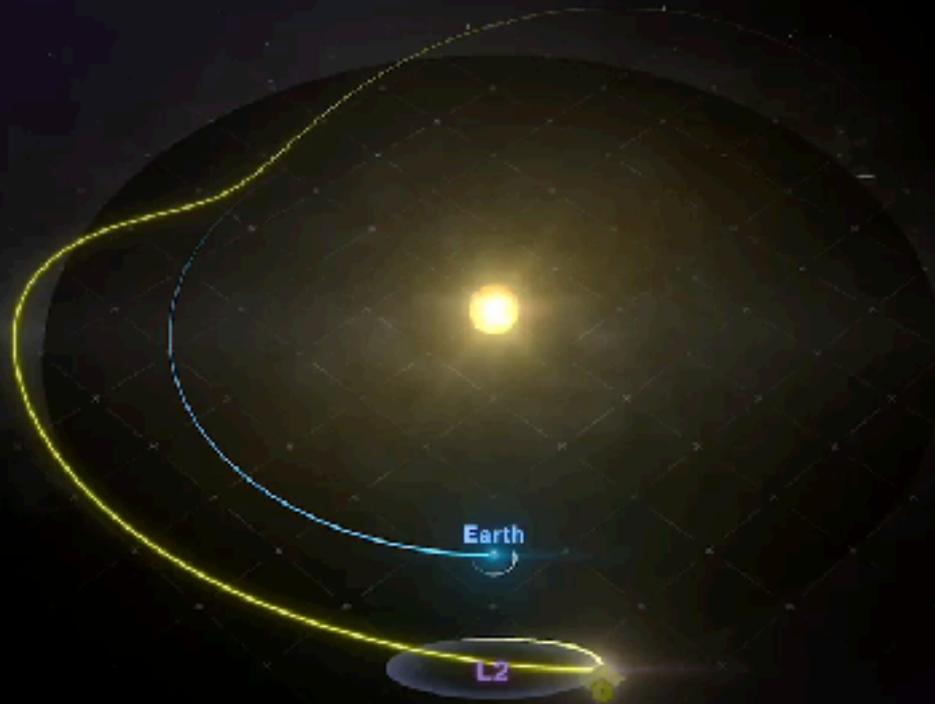
# Le télescope spatial James Webb

*Taille : 21.2 x 14.2 mètres*



Le bouclier thermique protège les parties les plus sensibles du télescope des rayons lumineux en provenance du Soleil, de la Terre et de la Lune

L'orbite de Webb – animation (20 sec) :

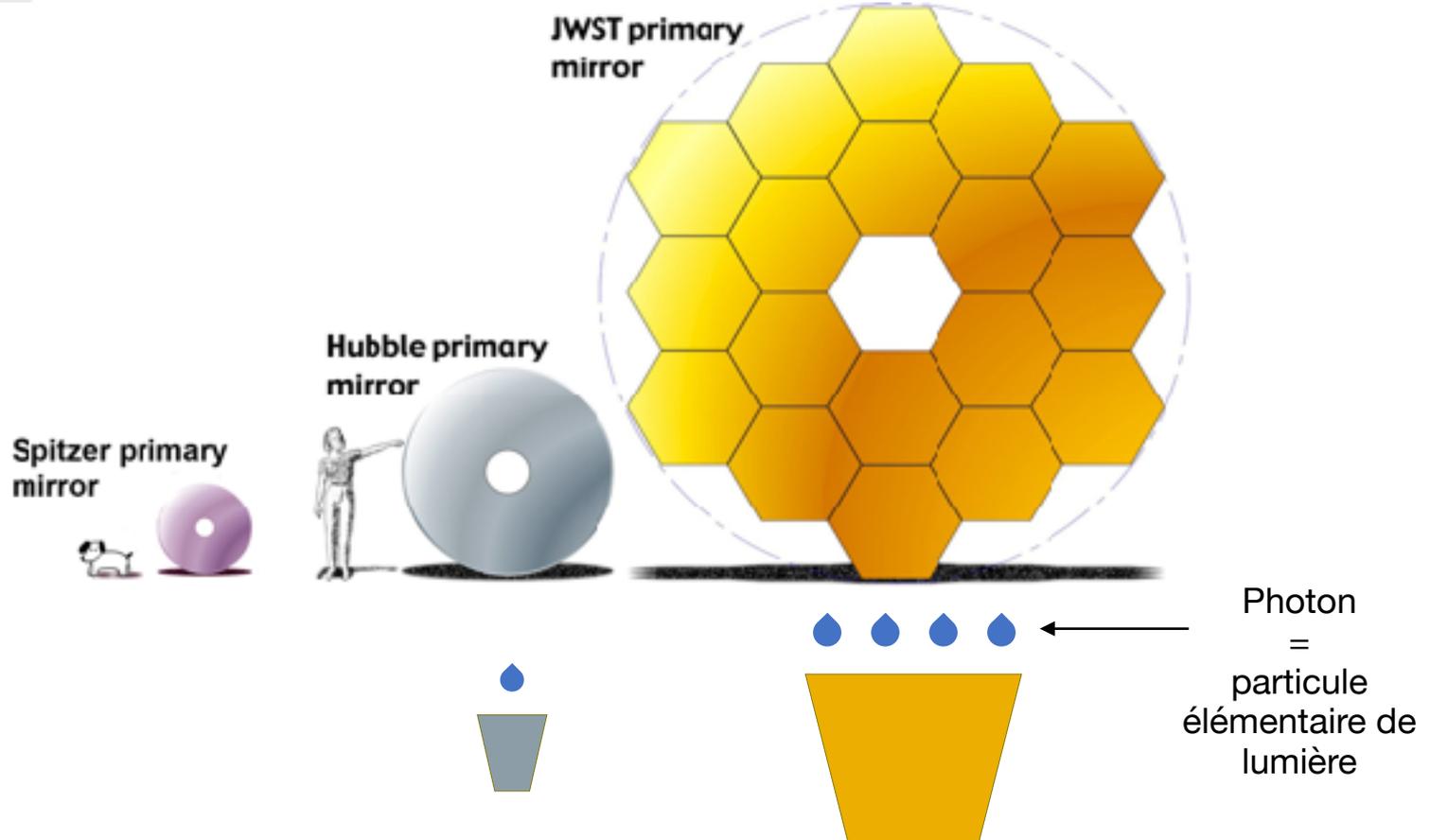


Côté chaud (vers le  
Soleil) : 85 °C

Côté froid (vers l'objet  
observé) : -233 °C

Le JWST est au point de Lagrange 2.

# Pourquoi utiliser un si grand télescope ?



Le JWST permet de voir des objets célestes très peu lumineux, très lointains.

JWST

12.5 h



NASA, ESA, CSA, and STScI

Un grand télescope permet aussi de voir avec plus de précision les objets célestes



Vue floue avec un petit télescope



La Nuit étoilée de Van Gogh

A cause de la diffraction, l'image d'une étoile n'est pas ponctuelle.

C'est une tâche avec comme diamètre  $d \propto \lambda/D$  avec  $\lambda$  = longueur d'onde d'observation

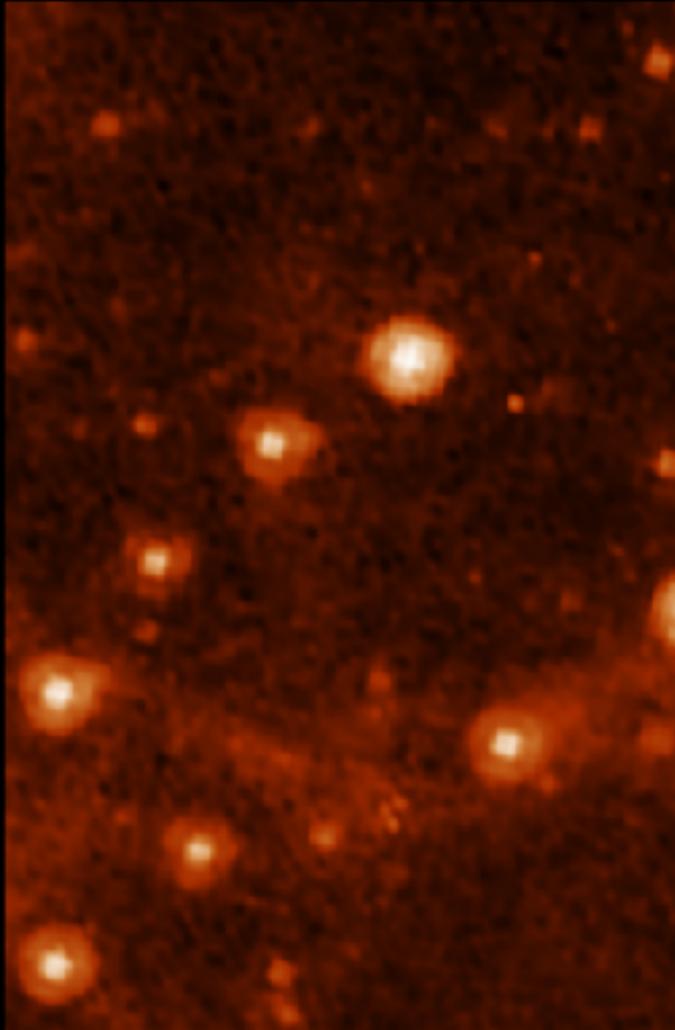
$D$  = diamètre du télescope

# Spitzer vs Webb

Diamètre du télescope

D=0.85 m

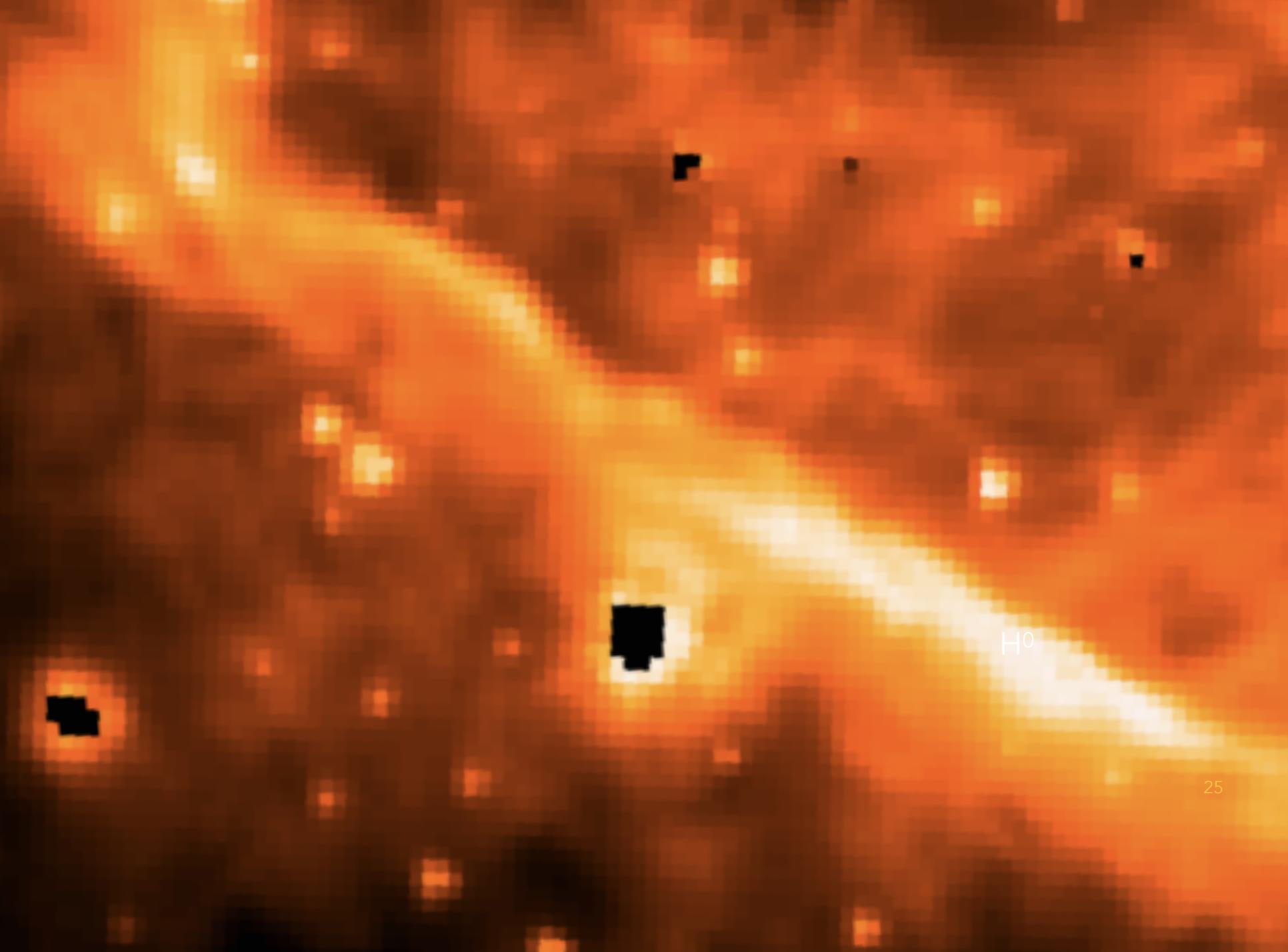
D=6,5 m



SPITZER IRAC 8.0  $\mu$



WEBB MIRI 7.7  $\mu$



H0



Galaxie 'phantom' (M74) situé à 32 millions d'années-lumière de la Terre



Galaxie 'phantom' (M74) situé à 32 millions d'années-lumière de la Terre



# **Zoom dans une région de formation d'étoiles de notre Galaxie**

Les slides suivantes donnent une image de plus en plus détaillée de la zone encadrée en rouge



Taille angulaire de l'image : plusieurs arc minutes

Nébuleuse de l'aigle (M16) située à  $\sim 2000$  pc (ou  $\sim 7000$  al)

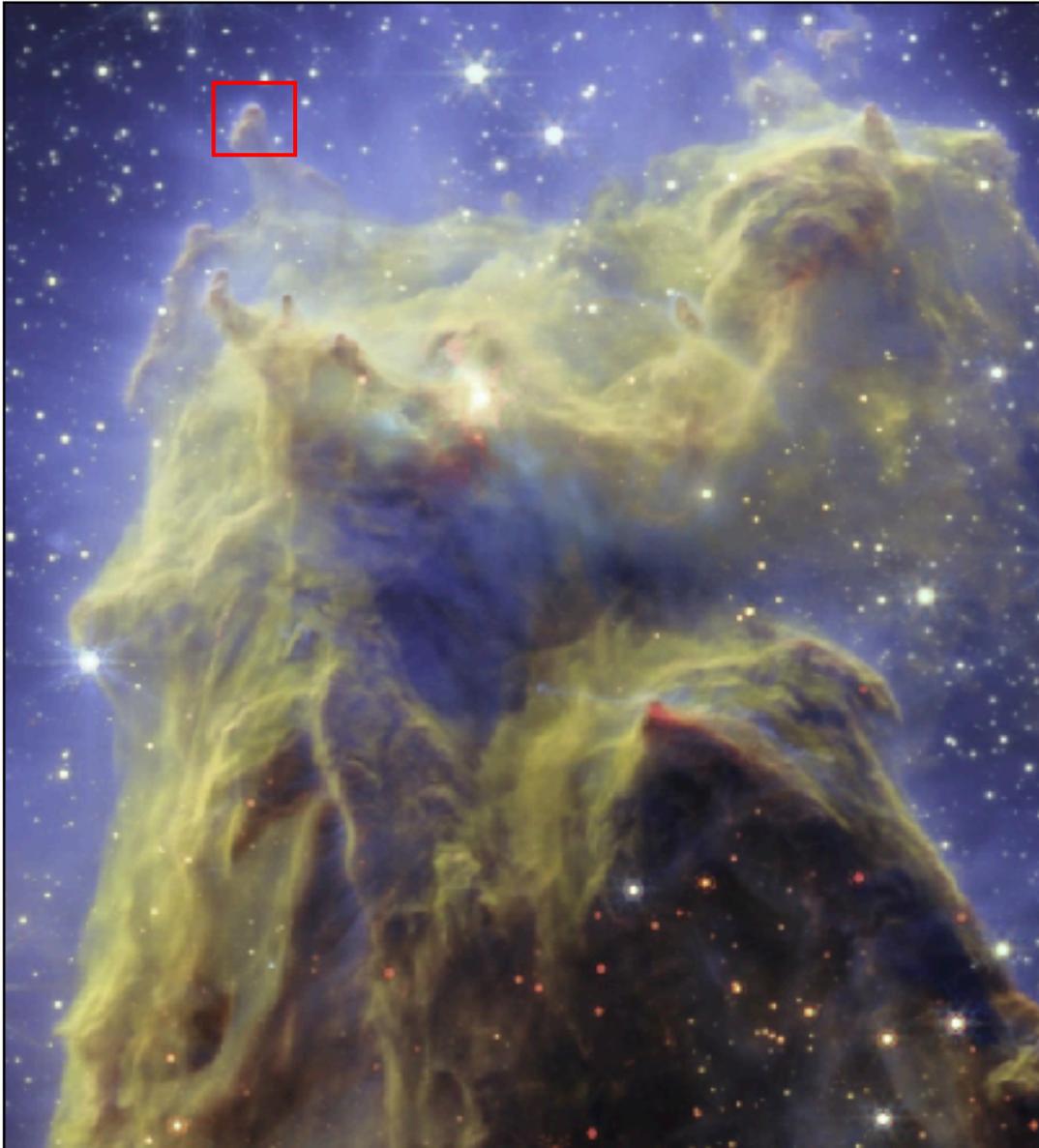


Picture credit: T.A. Rector & B.A. Wolpa

# Nébuleuse de l'aigle (M16) située à $\sim 2000$ pc (ou $\sim 7000$ al)

*Image obtenue avec le télescope Hubble et JWST*





*Image obtenue  
avec le télescope  
JWST*

1 pixel = taille de ... ?



Taille angulaire d'un pixel :

$$\alpha \approx 0.1'' = 0.1^\circ/60/60$$

$$\alpha \approx \text{dimension} / \text{distance de l'objet}$$

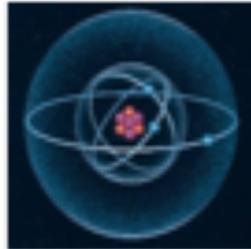
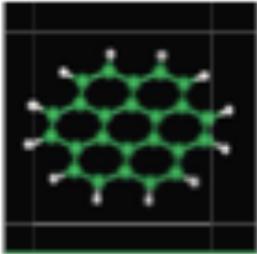
Avec la distance de l'objet = 2000 pc, on trouve la dimension d'un pixel :

$l=200$  au > Taille de notre Système Solaire

## b) Composition du MIS dans notre Galaxie

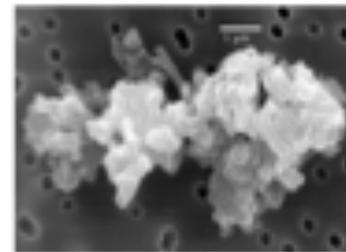
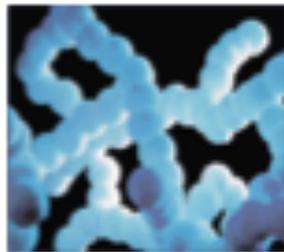
### Gaz interstellaire

- ~ 99% de la masse interstellaire
- Hydrogène (70%), hélium (28%) & "métaux" (1%)
- Sous forme moléculaire, atomique ou ionisée

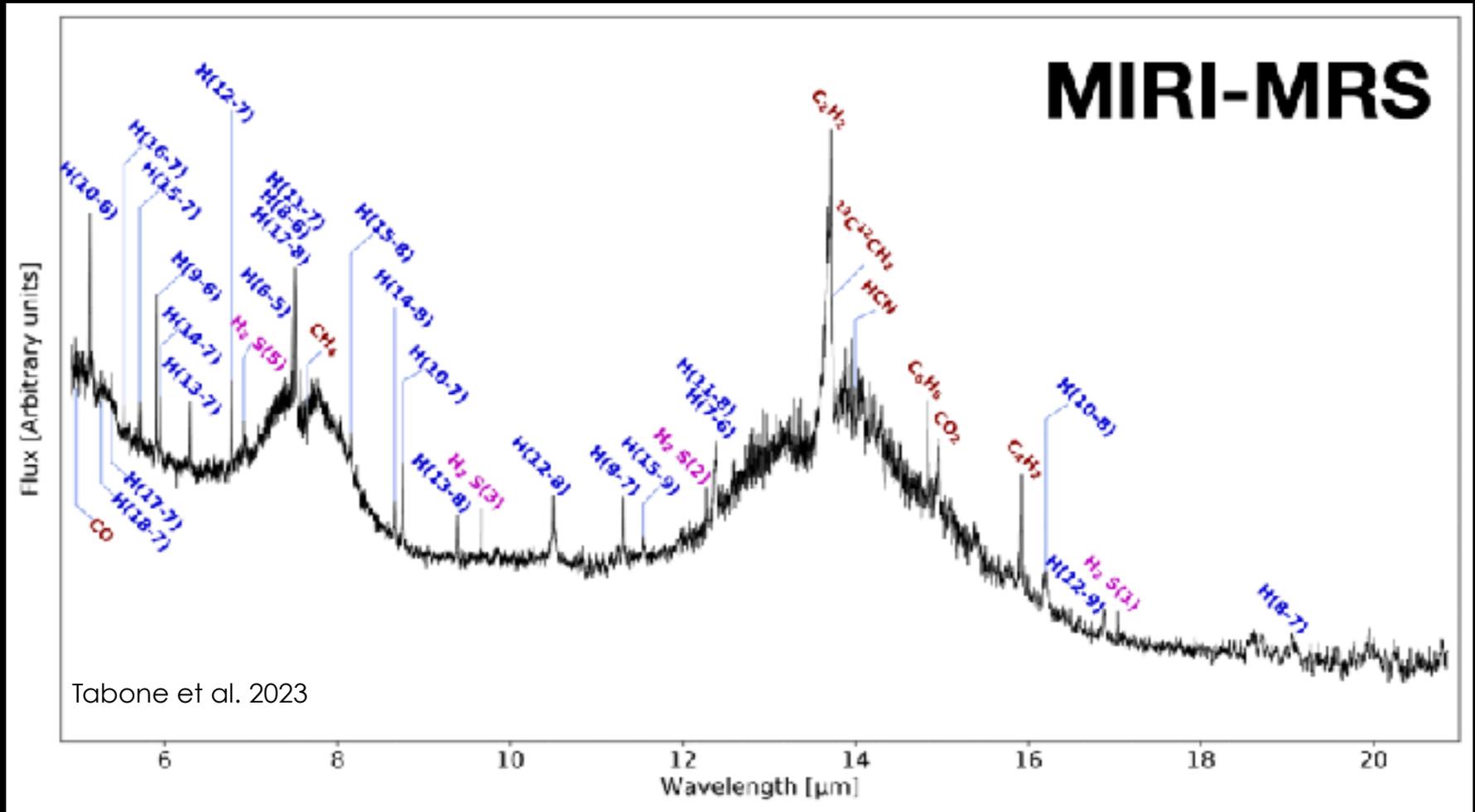


### Poussière interstellaire

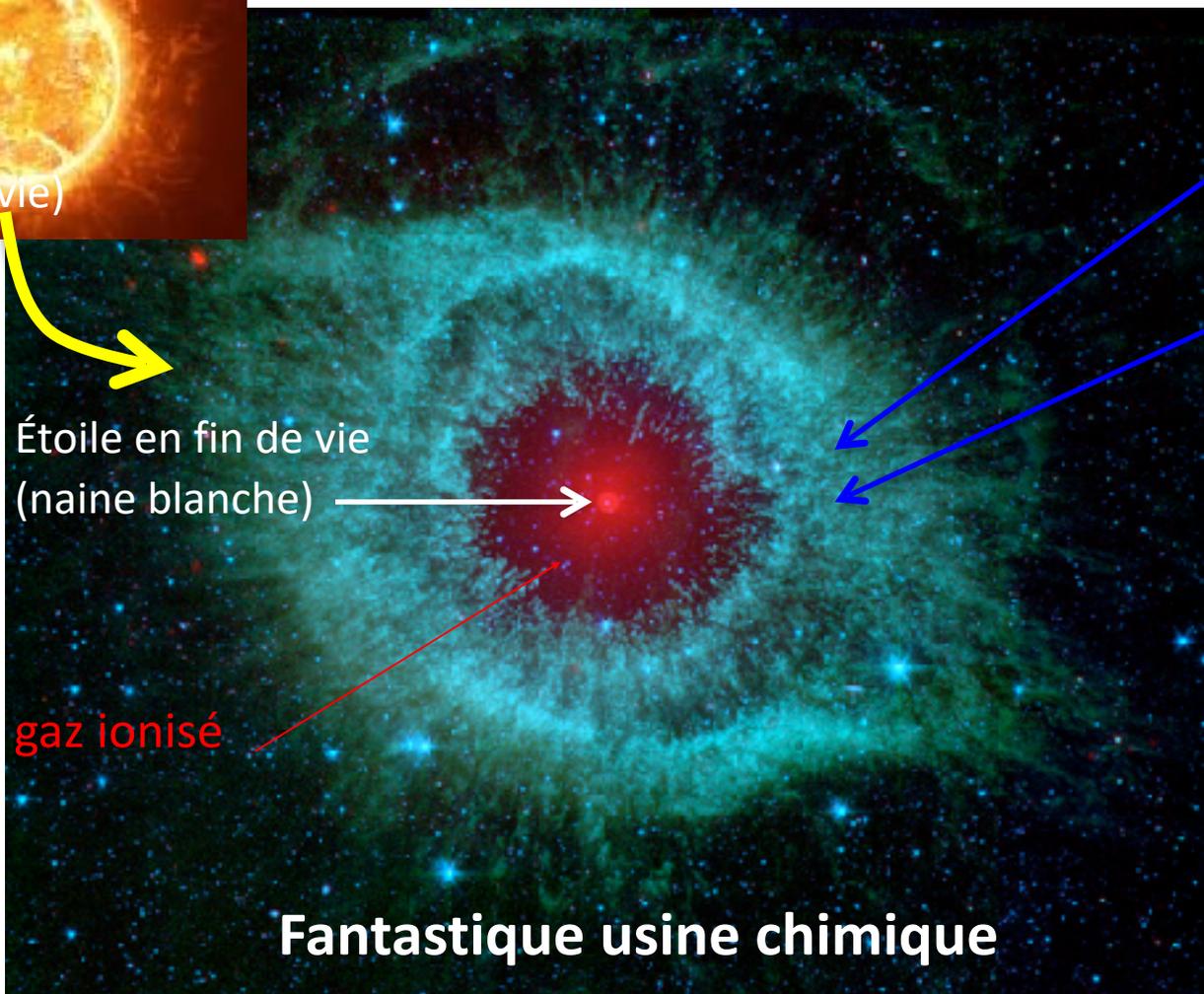
- ~ 1% de la masse interstellaire mais importante (absorption..)
- Grains de silicates ( $\text{Si}_2\text{O}_3$ ) & de composés carbonés (C)



# Comment étudier la composition du milieu interstellaire ?



**Milieu interstellaire = milieu dans lequel les étoiles se forment, évoluent et éjectent en fin de vie les éléments lourds créés par fusion nucléaire des atomes légers à l'intérieur des étoiles**



Étoile en fin de vie  
(naine blanche)

gaz ionisé

coquille de  
matière  
en expansion

contenant  
des éléments  
lourds :

- C, N, O, Mg...
- cobalt, iode,  
or..
- Molécules..
- Poussières..

**Fantastique usine chimique**

# Comment change la composition du MIS avec l'âge d'une galaxie?

- Composition chimique initiale d'une galaxie : H + He
- Composition chimique du MIS change au fur et à mesure de la transformation opérée par les étoiles
- Plus la galaxie est vieille, plus les atomes H ont été transformés par les étoiles en éléments lourds (« métaux »)
- On définit la **métallicité Z** = masse des éléments plus lourds que l'hélium (« métaux » ) / masse de tous les éléments
- **Z élevée dans les galaxies évoluées et dans les régions de formation d'étoiles**

# Population des étoiles en fonction de leurs métallicités

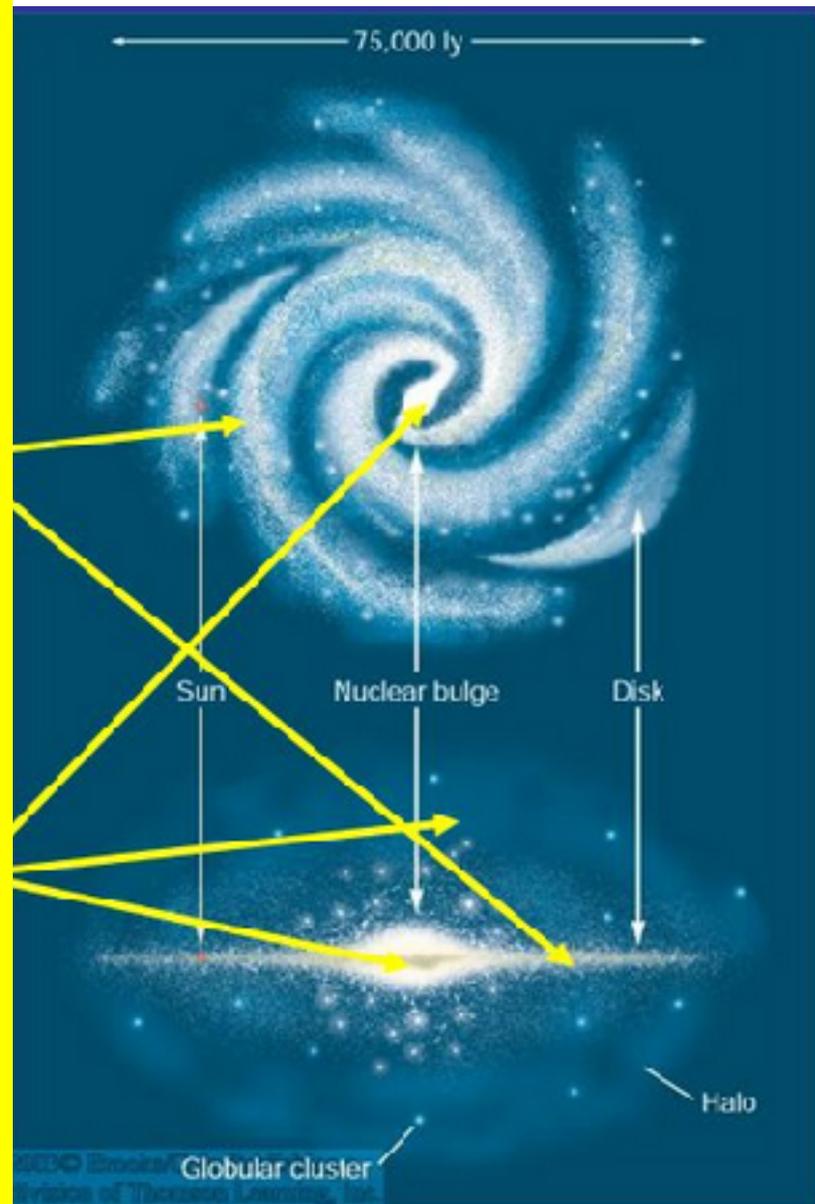
- ◆ Etoiles de **population I**:
  - Z élevée
  - « récemment » formées
  - localisées dans une région où la concentration d'étoiles est importante: le disque

- ◆ Etoiles de **population II**:
  - Z faible
  - formées il y a plus de  $5 \cdot 10^9$  ans
  - localisées dans le bulbe et le halo

- ◆ Etoiles de **population III**:
  - premières étoiles formées dans l'Univers à partir d'H et He

Pop I

Pop II



## c) Conditions physiques dans le MIS : Gamme de température ? Nombre de particules par $\text{cm}^3$ ?

### Température

■ Très variable

$T \sim -263^\circ \rightarrow 1\,000\,000^\circ$

### Densité

■ Très variable

$n \sim 0.01 \text{ H} / \text{cm}^3 \rightarrow 10\,000\,000 \text{ H} / \text{cm}^3$

$n$  (Atmosphère Terrestre)  $\sim 10^{19} \text{ H} / \text{cm}^3$

=> milieu extrêmement ténu!

### Pression thermique

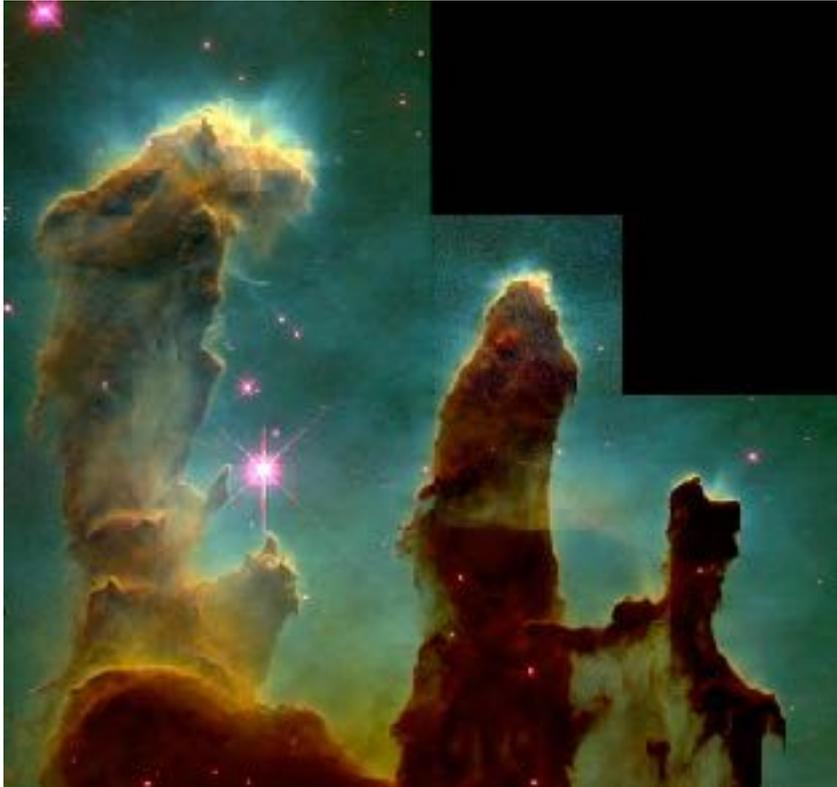
■ Relativement uniforme

■ Extrêmement faible

$\sim 0.000000000000000001 \text{ atm}$  en moyenne

# Nébuleuse de l'aigle (M16) située à $\sim 2000$ pc (ou $\sim 7000$ al)

10 pc

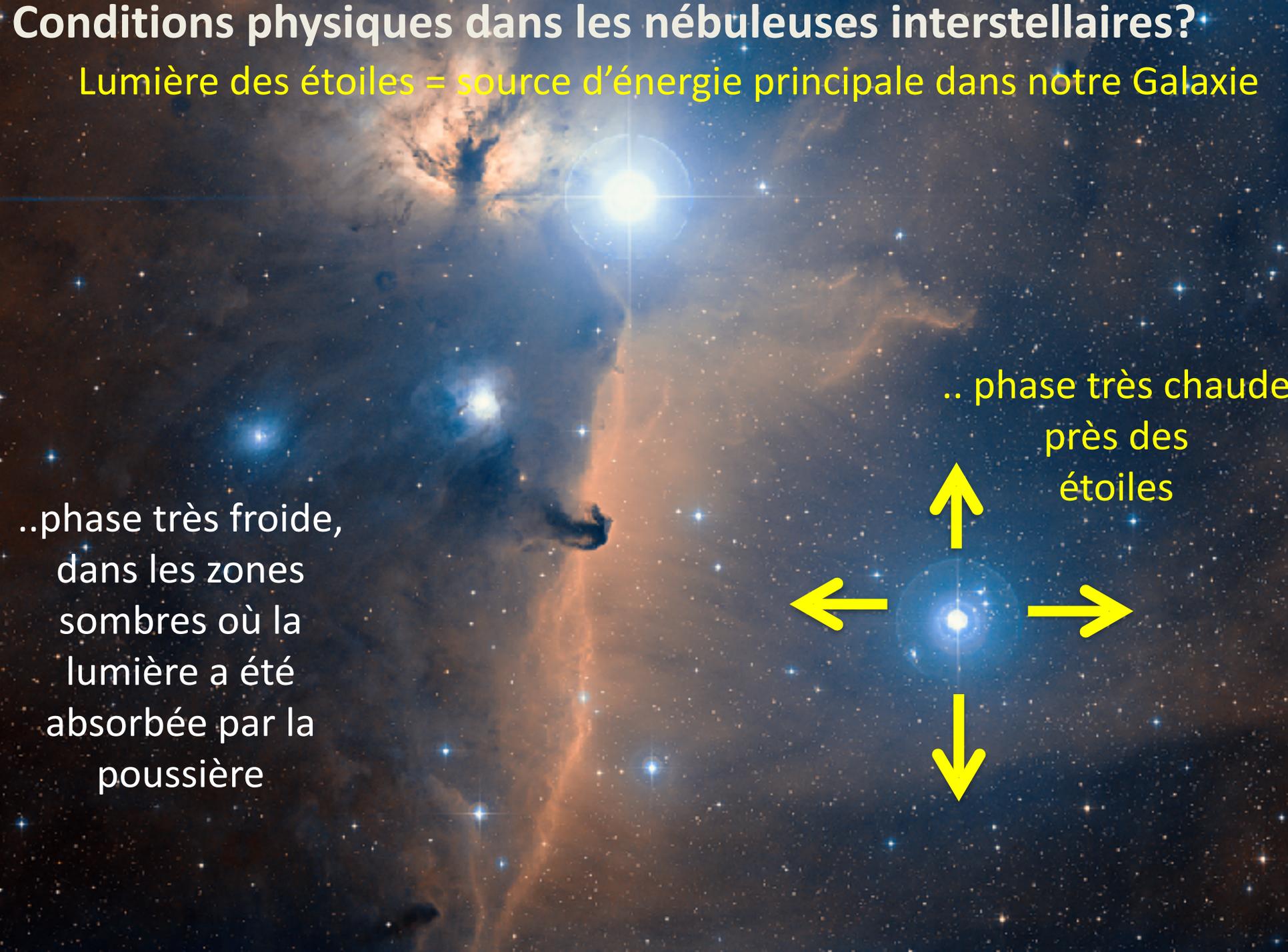


Picture Credit: J. Hester & P. Scowen

Comment fait-on pour observer ces nébuleuses malgré le fait que le milieu soit extrêmement ténu ?

# Conditions physiques dans les nébuleuses interstellaires?

Lumière des étoiles = source d'énergie principale dans notre Galaxie

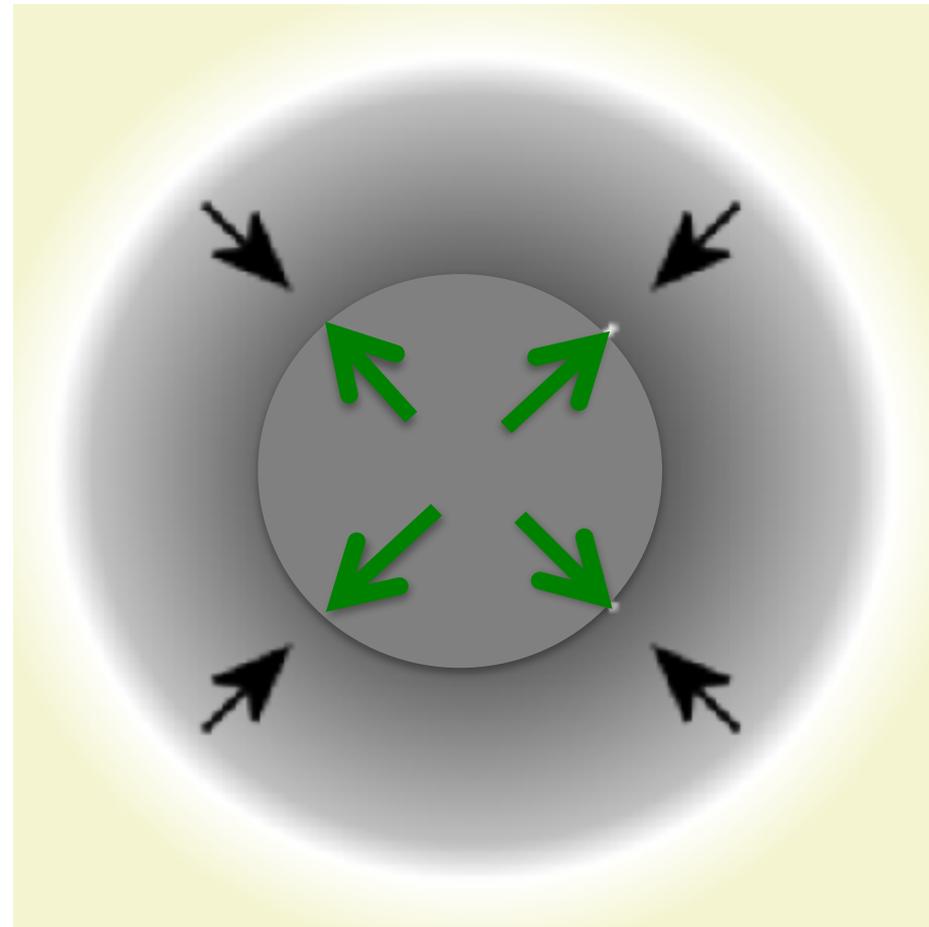


..phase très froide,  
dans les zones  
sombres où la  
lumière a été  
absorbée par la  
poussière

.. phase très chaude  
près des  
étoiles

## d) Equilibre des nuages interstellaires

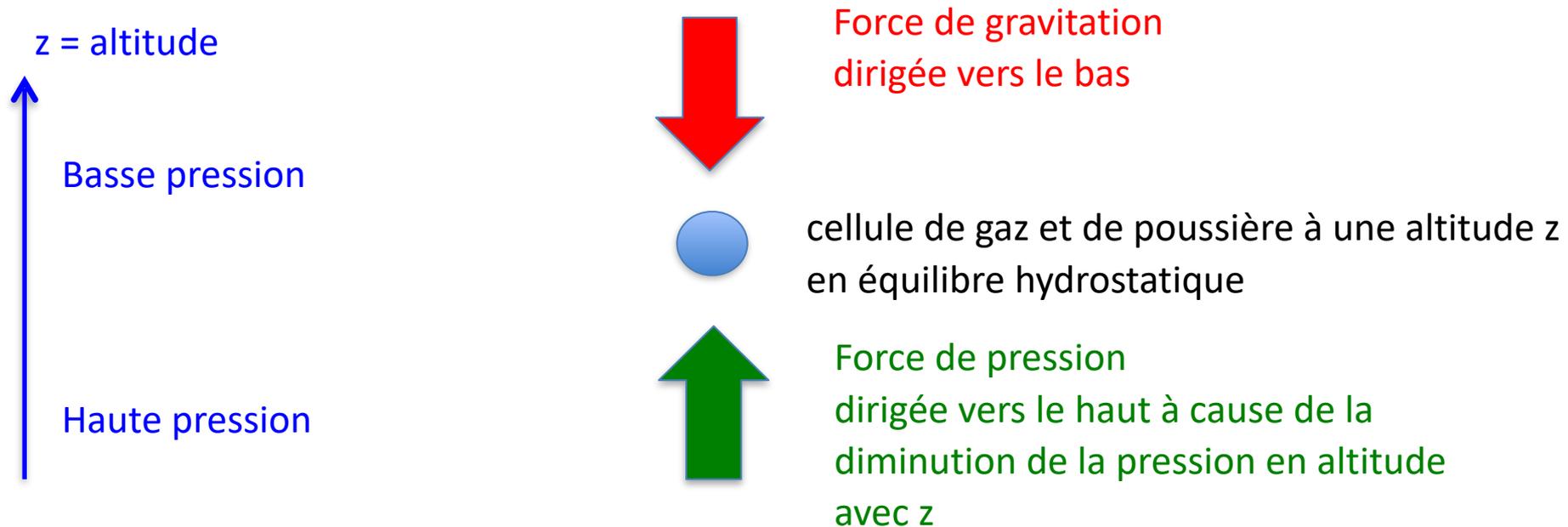
- Un nuage interstellaire composé de gaz et de poussière est à priori à l'équilibre: les forces de gravité dirigées vers le centre du nuage sont compensées par la pression thermique des atomes et molécules qui le composent



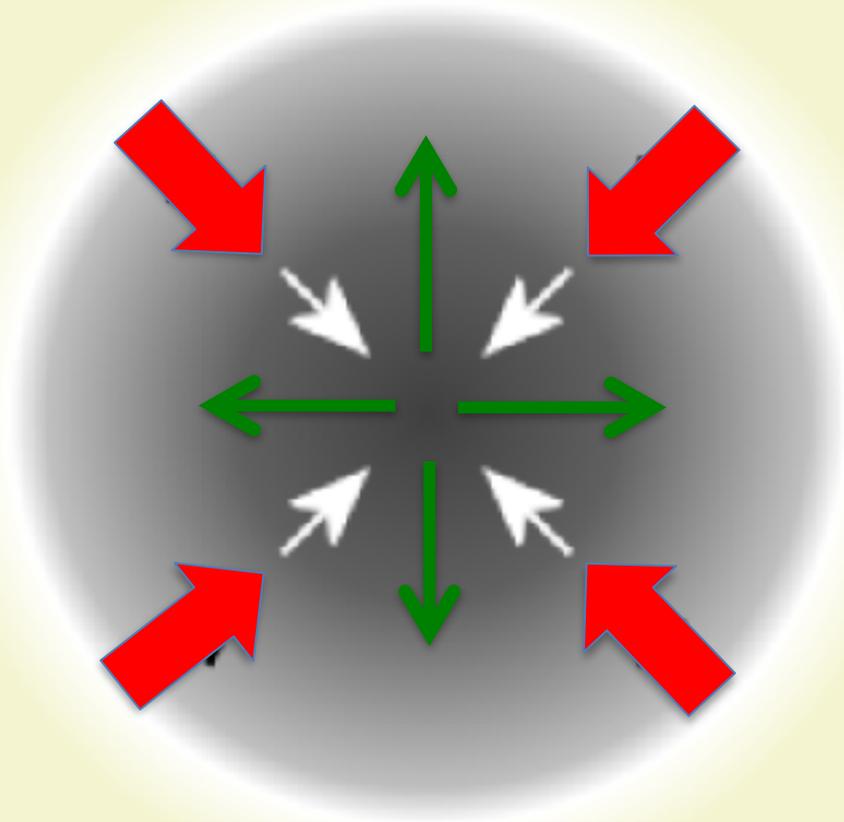
**Force de gravité**  
**= - Force de pression**  
**thermique**

***Nuage à l'équilibre***  
***hydrostatique***

# Analogie avec les particules dans l'atmosphère terrestre



# Effondrement gravitationnel des nuages interstellaires



Pour un immense nuage de gaz

- qui s'étend sur de très grande distance (i.e., importante accumulation de matière)
- il y a un déséquilibre entre les
  - (1) **forces de compression** radiale, i.e. **forces d'attraction gravitationnelle**
  - (2) **forces de pression thermique**, i.e. **force d'expansion** qui compense l'attraction gravitationnelle
- Le nuage va s'effondrer sur lui même

**Effondrement gravitationnel = contraction d'un corps massif sous l'effet de sa propre attraction gravitationnelle**

**=> permet la formation de structures très denses et chaudes :  
les étoiles**

# Questions:

Dans quelle phase du milieu interstellaire, peut-on s'attendre à l'effondrement gravitationnel, et ainsi à la formation d'étoiles ?

Comment se déroule l'effondrement des nuages ?

Les étoiles se forment-elles seules ou en groupe ?

