

# Effondrement gravitationnel des nuages interstellaires et formation des étoiles

## Questions:

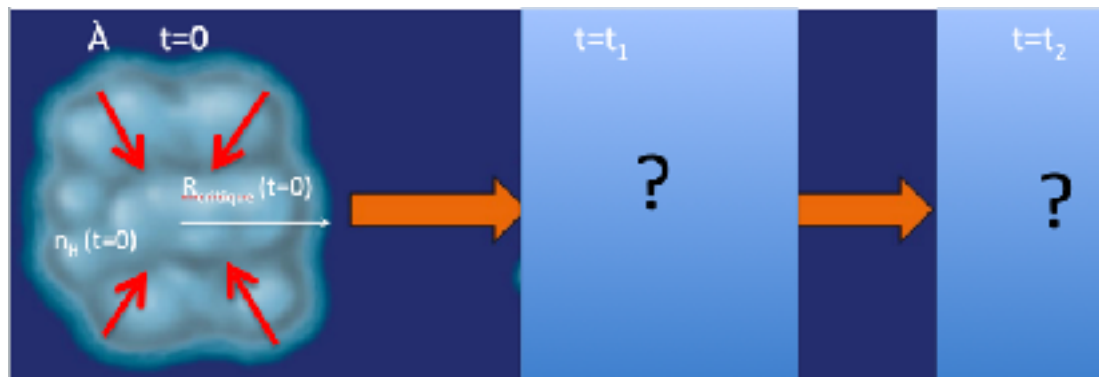
### 1) Dans quelles régions du MIS, l'effondrement gravitationnel va-t-il avoir lieu, et ainsi former de nouvelles étoiles ?

Afin de répondre à cette question, on considérera la condition d'équilibre hydrostatique d'un nuage interstellaire (i.e., forces de gravité = force de pression thermique) et on déterminera  $R_{\text{critique}}$  et  $M_{\text{critique}}$  le rayon et la masse critique du nuage au delà desquels le nuage devient instable gravitationnellement. Pour  $R=R_{\text{critique}}$  et  $M=M_{\text{critique}}$  il y a équilibre hydrostatique, pour  $R>R_{\text{critique}}$  et  $M>M_{\text{critique}}$  il y a effondrement gravitationnel.

- 1) Exprimer  $R_{\text{critique}}$  (unité: m) en fonction de  $T$  (la température dans le nuage) et  $n_{\text{H}}$  (la densité d'hydrogène dans le nuage, soit le nombre d'atomes d'hydrogène par  $\text{m}^3$ )
- 2) Exprimer  $M_{\text{critique}}$  (unité: kg) en fonction de  $T$  et  $n_{\text{H}}$
- 3) Calculer  $R_{\text{critique}}$  (unité: pc) et  $M_{\text{critique}}$  (unité:  $M_{\text{solaire}}$ ) pour les 3 phases du MIS
- 4) En déduire quelle est la région du MIS la plus instable gravitationnellement et en conséquence les régions où peuvent se former les étoiles.

### 2) Comment se déroule l'effondrement des nuages ?

Pour répondre à cette question, on considérera la variation de  $R_{\text{critique}}$  en fonction de la densité  $n_{\text{H}}$  du nuage et du temps  $t$ .



### 3) Les étoiles se forment-elles seules ou en groupe ?

Pour répondre à cette question, on considérera la réponse à la question 2.

1) Dans quelles régions du MIS, l'effondrement gravitationnel va-t-il avoir lieu ?

1.1) Exprimer  $R_{\text{critique}}$  (unité: m) en fonction de T (la température dans le nuage) et  $n_H$  (la densité d'hydrogène dans le nuage, soit le nombre d'atomes d'hydrogène par  $m^3$ )

1.2) Exprimer  $M_{\text{critique}}$  (unité: kg) en fonction de T et  $n_H$

- Condition d'équilibre :

$$3kT/m_H = 2 G M_{\text{critique}}/R_{\text{critique}}$$

- $M_{\text{critique}} = V \rho$

$$= 4/3 \pi R_{\text{critique}}^3 \rho$$

$$= 4/3 \pi R_{\text{critique}}^3 n_H m_H$$

$$\Rightarrow R_{\text{critique}} = (9 k / (8 \pi G m_H^2))^{0.5} (T/n_H)^{0.5} \sim 1,6 \cdot 10^{20} \times (T/n_H)^{0.5} \text{ en m}$$

$$\Rightarrow M_{\text{critique}} \sim 3 \cdot 10^{34} \times (T^3/n_H)^{0.5} \text{ en kg}$$

## Données: $n$ , $T$ les régions (ou phases) du milieu interstellaire dans notre Galaxie

Phases	densité $n_H$ ( $m^{-3}$ )	température $T$ (K)	volume (%)	masse (%)
Atomique-chaude-ionisée	$10^2$ - $10^5$	5000 - $10^6$	0.6	0.1
Atomique-tiède-neutre	$10^7$	100	0.39..	0.4
Moléculaire-froide-neutre	$10^{10}$	10	0.0005	0.5

**Remarque: l'essentiel de la masse interstellaire se trouve dans le MIS dense et froid**

### 1.3) Calcul de $R_{\text{critique}}$ et $M_{\text{critique}}$ pour les 3 phases du milieu interstellaire

- Dans la phase dense, froide et moléculaire:  $T=10 \text{ K}$ ,  $n_{\text{H}}=10^{10} \text{ m}^{-3}$

$$R_{\text{critique}} = 5,1 \cdot 10^{15} \text{ m} = 0,16 \text{ pc}$$

$$M_{\text{critique}} \sim 9 \cdot 10^{30} \text{ kg} \sim 4,5 M_{\text{solaire}} \quad (M_{\text{solaire}} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg})$$

C'est dans cette phase que  $R_{\text{critique}}$  et  $M_{\text{critique}}$  sont les + faibles

- Dans le gaz atomique tiède:  $T=100 \text{ K}$ ,  $n_{\text{H}}=10^7 \text{ m}^{-3}$

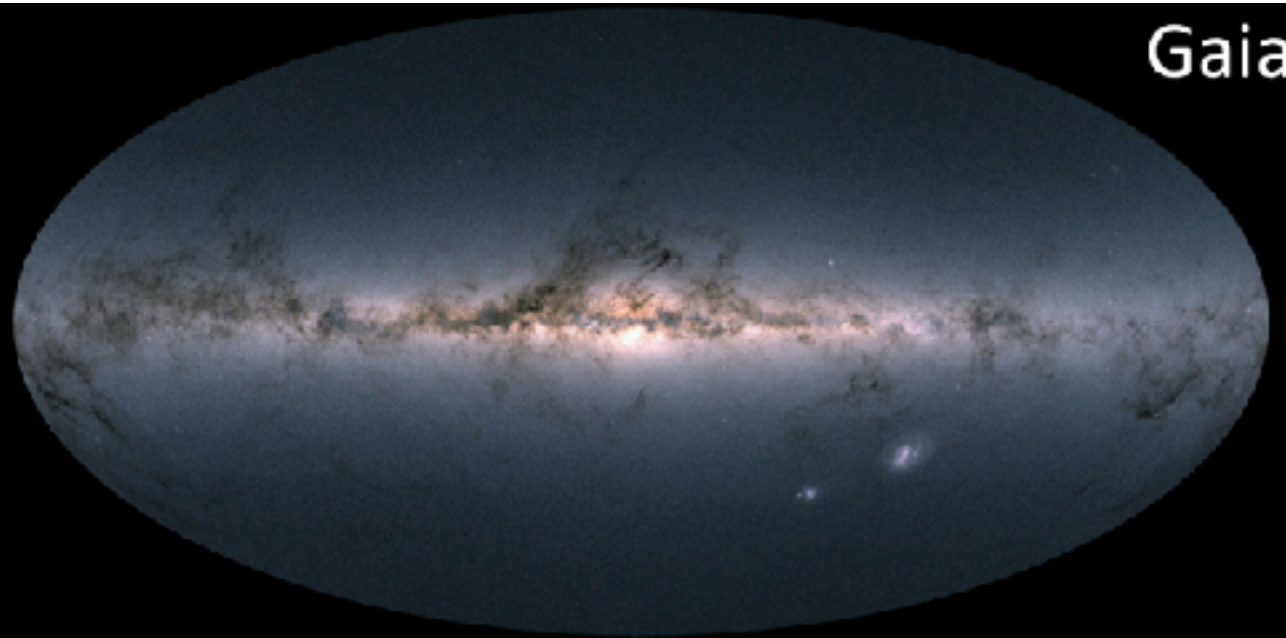
$$R_{\text{critique}} \sim 16 \text{ pc (100 fois grand)}.$$

Masse critique beaucoup + élevée

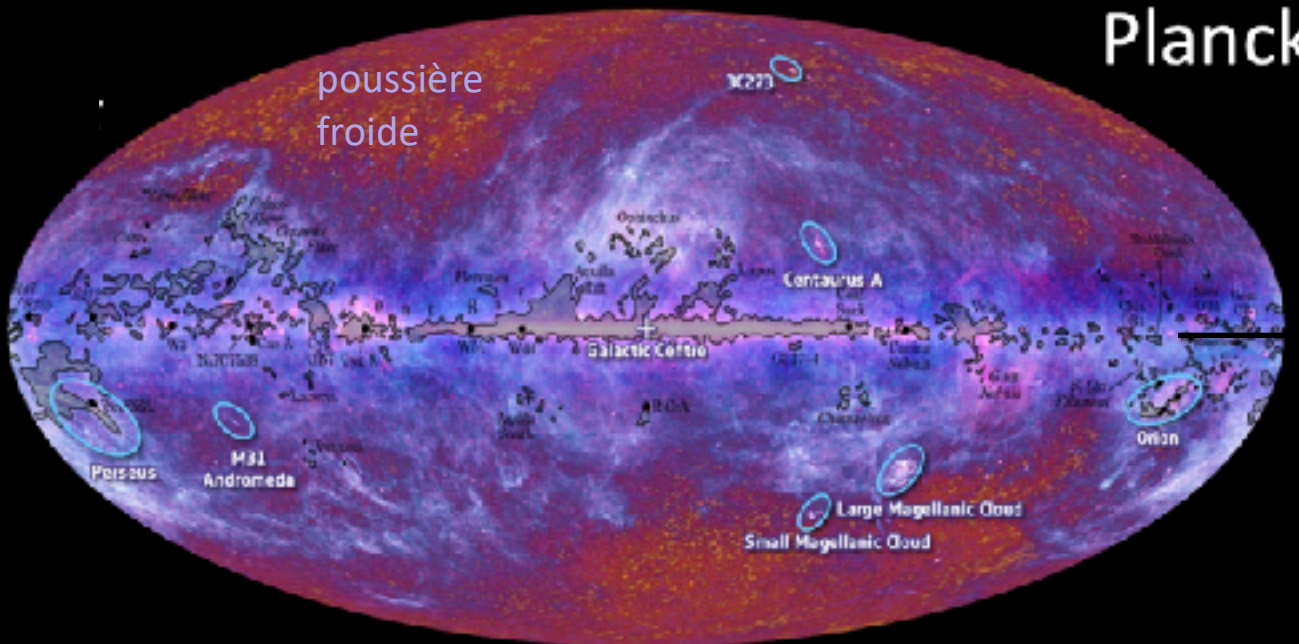
## 1ère Conclusion:

- Dans la phase atomique tiède une structure de l'ordre de 1-10 pc pourra être stable, alors qu'elle ne sera pas dans la phase moléculaire froide
- La phase moléculaire dense et froide est la phase la plus instable gravitationnellement. Les étoiles se forment donc dans cette phase.
- Les grands complexes moléculaires denses et froids, qui se situent dans le disque de notre Galaxie, sont donc des sites très actifs de formation stellaire

# Vue globale de notre galaxie



Carte dans le domaine visible trace la lumière des étoiles + absorption par la poussière interstellaire



Carte dans le domaine micro-onde trace l'émission du milieu interstellaire (qui cache l'émission du fond diffus cosmologique)

Grand complexe de gaz moléculaire dans le disque galactique

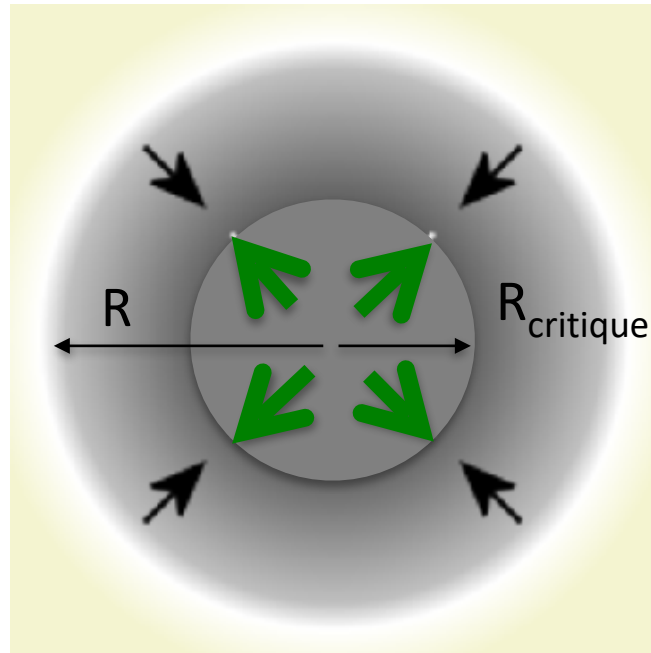
- Remarque 1: si on prend un nuage d'une certain **rayon R fixe** et d'une certaine **masse M fixe mais** que sa **température T diminue**, que se passe-t-il ?

$$\Rightarrow R_{\text{critique}} \sim (T/n)^{0.5} \quad \text{et} \quad M_{\text{critique}} \sim (T^3/n)^{0.5} \quad \text{diminuent}$$

$$\Rightarrow R > R_{\text{critique}} \quad \text{et} \quad M > M_{\text{critique}}$$

Les forces de gravités l'emportent sur la force d'agitation thermique.

**Le nuage s'effondre.**



- Remarque 2: si on prend un nuage d'une certain **rayon R fixe** et d'une certaine **masse M fixe mais** que sa **densité  $n_H$  augmente**, que se passe-t-il ?

$$\Rightarrow R_{\text{critique}} \sim (T/n)^{0.5} \quad \text{et} \quad M_{\text{critique}} \sim (T^3/n)^{0.5} \quad \text{diminuent}$$

$$\Rightarrow R > R_{\text{critique}} \quad \text{et} \quad M > M_{\text{critique}}$$

Les forces de gravités l'emportent sur la force d'agitation thermique.

**Le nuage s'effondre.**



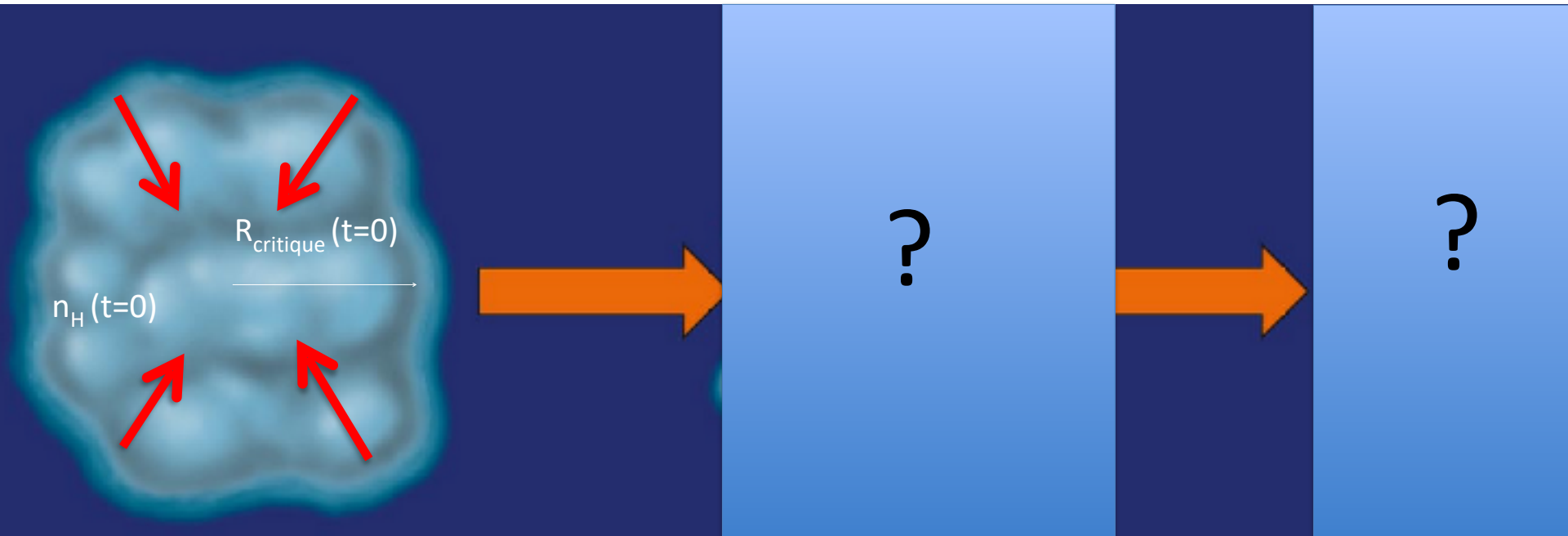
## 2) Comment se déroule l'effondrement des nuages ?

Pour répondre à cette question, on considérera la variation de  $R_{\text{critique}}$  en fonction de la densité  $n_H$  du nuage et du temps  $t$ .

À  $t=0$

$t=t_1$

$t=t_2$



$$\begin{aligned} n_H(t=t_1) &> n_H(t=0) \\ R_{\text{critique}}(t=t_1) &< R_{\text{critique}}(t=0) \end{aligned}$$

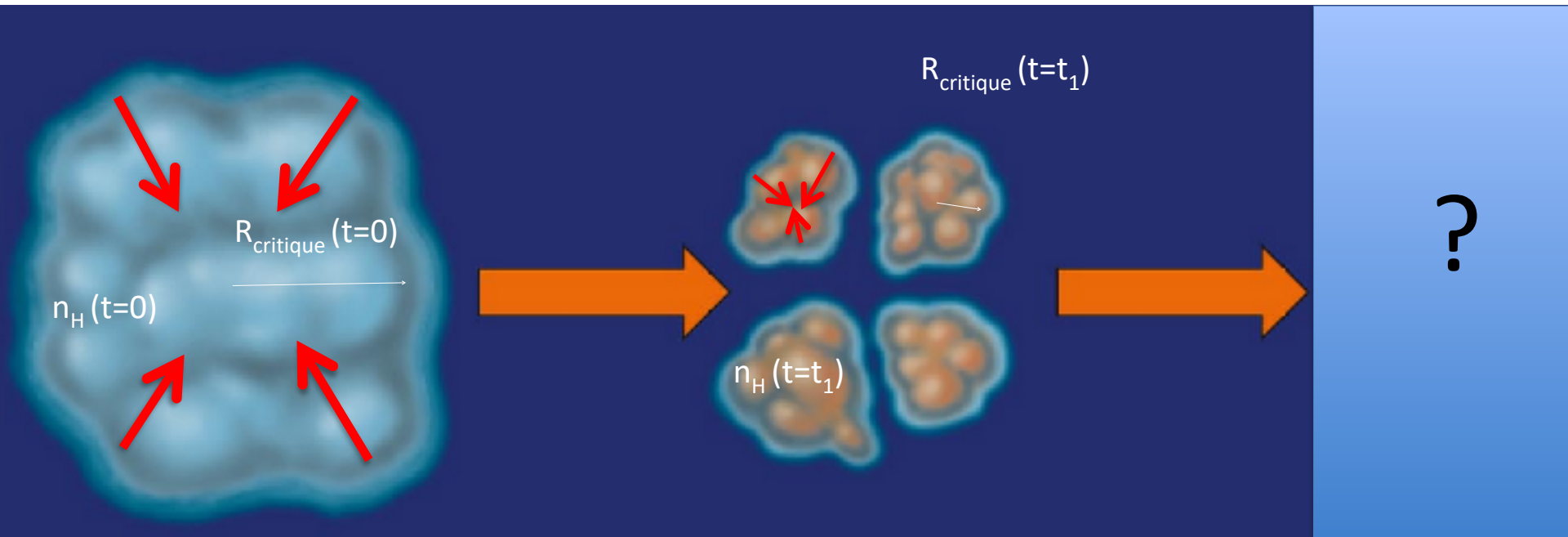
car  $R_{\text{critique}}$  et  $M_{\text{critique}} \sim 1/n_H^{0.5}$  diminuent  
(de plus la  $T$  diminue car le taux de refroidissement est proportionnel à  $n_H^2$ )  
des structures plus petites vont s'effondrer à leurs tours...

# Effondrement des nuages interstellaires

À  $t=0$

$t=t_1$

$t=t_2$



$$\begin{aligned} n_H(t=t_1) &> n_H(t=0) \\ R_{\text{critique}}(t=t_1) &< R_{\text{critique}}(t=0) \end{aligned}$$

car  $R_{\text{critique}}$  et  $M_{\text{critique}} \sim 1/n_H^{0.5}$  diminuent

(de plus la  $T$  diminue car le taux de refroidissement est proportionnel à  $n_H^2$ )  
des structures plus petites vont s'effondrer à leurs tours...

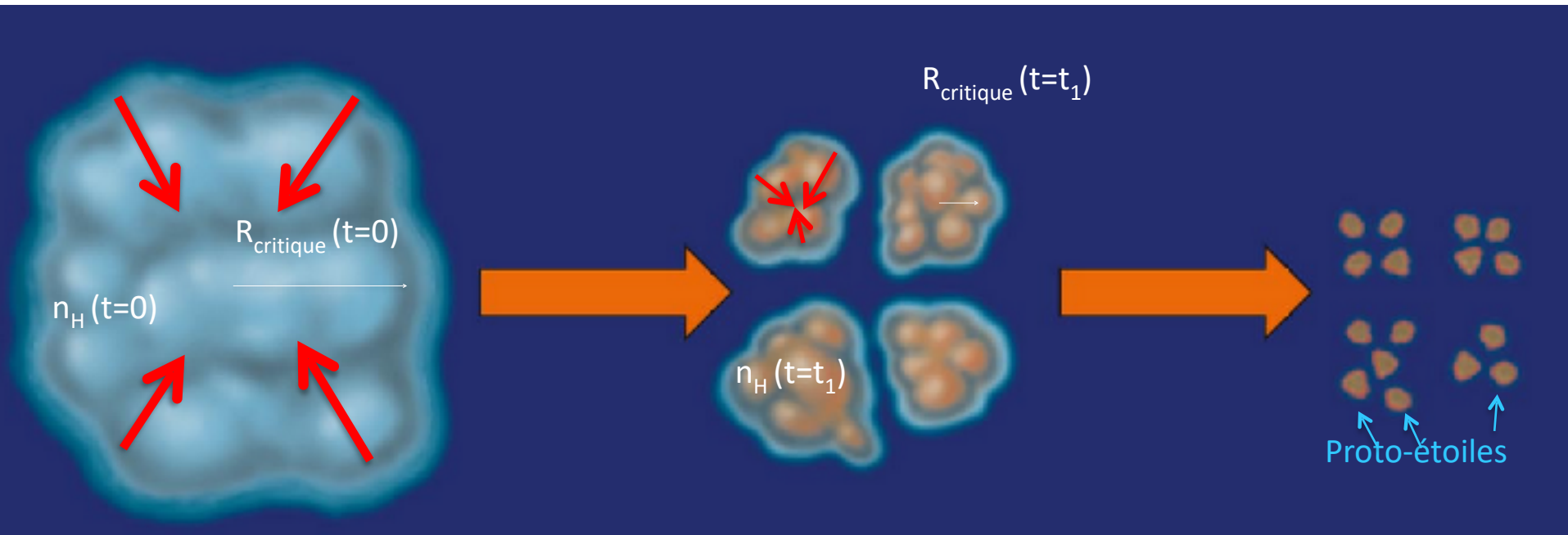
⇒

# Effondrement des nuages interstellaires

À  $t=0$

$t=t_1$

$t=t_2$



$$\begin{aligned} n_H(t=t_1) &> n_H(t=0) \\ R_{\text{critique}}(t=t_1) &< R_{\text{critique}}(t=0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_H(t=t_2) &> n_H(t=t_1) \\ R_{\text{critique}}(t=t_2) &< R_{\text{critique}}(t=t_1) \end{aligned}$$

⇒ toute inhomogénéité va s'accroître, le nuage se fragmente en sous-structures

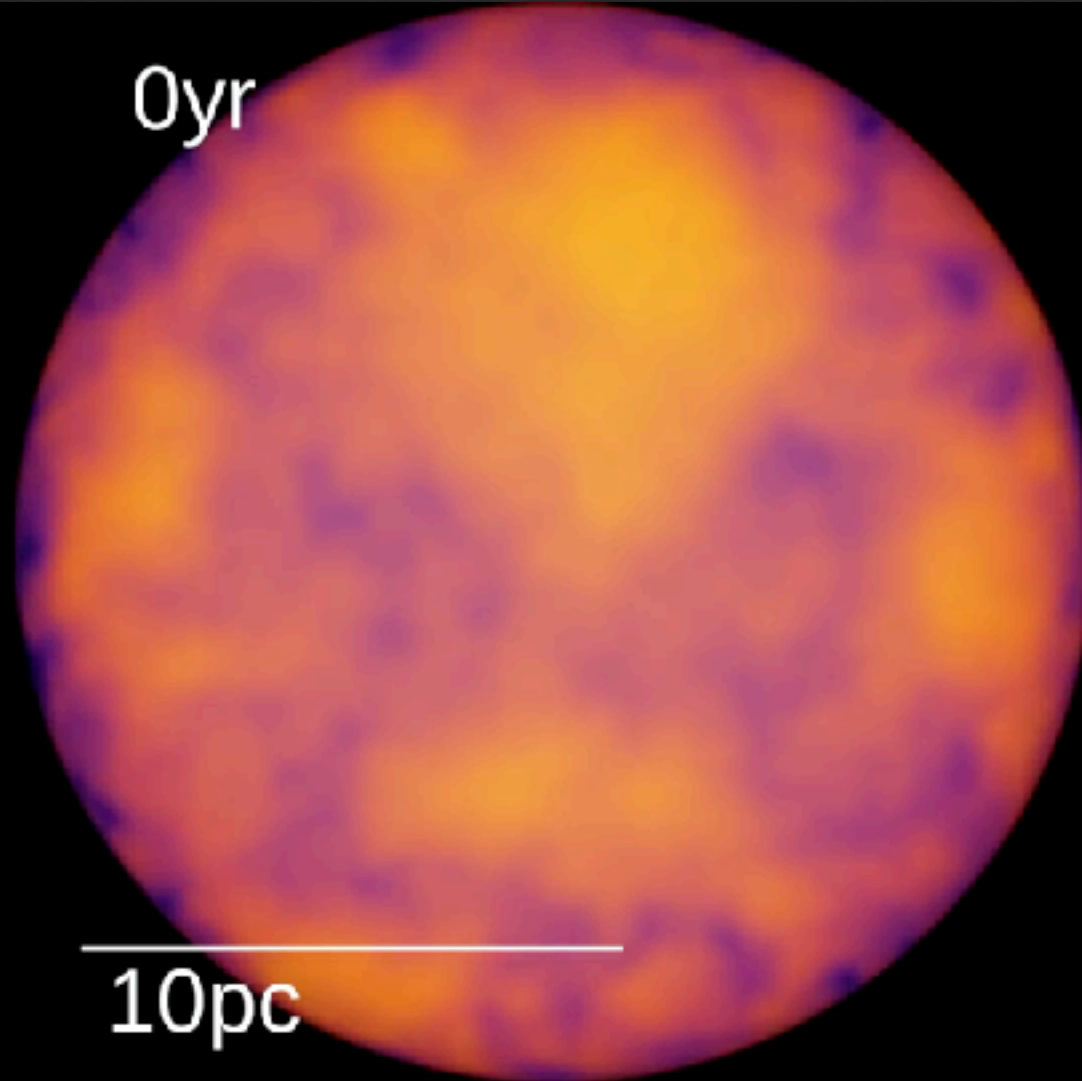
## Conclusion:

- A mesure que le nuage se contracte, des sous-ensembles de ce nuage vont à leur tour atteindre la masse critique et commencer à s'effondrer sur eux-mêmes... Et ainsi de suite...
- Un nuage de plusieurs centaines de milliers de masses solaires va, de fil en aiguille, de morcellements en morcellements, donner naissance à des dizaines de milliers de proto-étoiles.

**Les étoiles naissent par ensemble de plusieurs étoiles!**

# Simulation numérique de régions de formation d'étoiles : les étoiles naissent par ensemble de plusieurs étoiles

*Starforge*



## Autres conséquences importantes du 'phénomène de morcellements des nuages':

- 1) On ne peut pas avoir formation d'une étoile de masse très élevée.
- 2) Nous ne pouvons pas former un Soleil isolé à partir d'un petit nuage d'une masse solaire.

Le Soleil s'est nécessairement formé à partir d'un nuage plus massif.  
Le Soleil s'est formé simultanément à plusieurs autres étoiles.  
Le Soleil a perdu de vue ses soeurs et frères depuis bien longtemps...  
Les étoiles se dispersent par les effets dynamiques.

## Remarque importante:

Pourquoi le processus de morcellements s'arrête dans les proto-étoiles ?

1. La capacité à absorber le rayonnement (=l'opacité) augmente au fur et à mesure que la densité croît. Les prototo-étoiles étant très denses, elles absorbent le rayonnement
2. Comme l'évacuation de la chaleur (=refroidissement) se fait essentiellement par émission du rayonnement IR, les proto-étoiles évacuent moins bien la chaleur
3. En conséquence, un effet de serre se produit: la température des proto-étoiles augmente
4. La masse critique ( $M_{\text{critique}} \sim (T^3/n)^{0.5}$ ) se remet donc à croître, interdisant tout nouveau morcellement.