

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – SOMMES-NOUS SEULS ?

Vincent Minier

CEA/Irfu, Laboratoire AIM Paris Saclay

Université de Nantes, Centre François Viète

Email: vincent.minier@cea.fr

Site Web: <http://explornova.cea.fr/cours>



UNIVERSITÉ DE NANTES



15 novembre 2013

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES

5 séances

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
2. Le cycle de la naissance des étoiles.
3. Les planètes naissent dans un disque.
4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs.
5. Sommes-nous seuls ? Imaginaire (représentations) et science (connaissances). Ex: Nébuleuses, Exoplanètes.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Quelques unités et conversions en astronomie:

- Une année-lumière [al] = distance parcourue par la lumière en une année, soit:

$$299\,792\,458 \text{ m/s} \times 365 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$$

- Une unité astronomique [ua] = distance Terre-Soleil, soit:

$$149\,597\,870\,700 \text{ m} = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$$

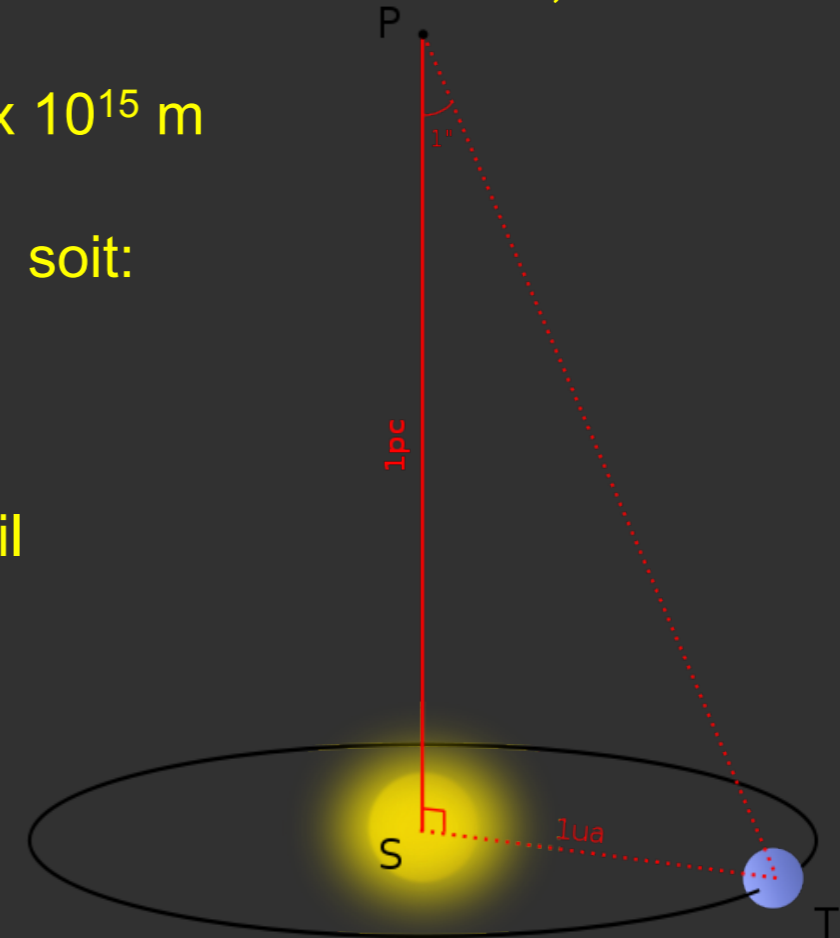
- Un parsec [pc], soit à laquelle la distance Terre-Soleil est vue sous un angle de 1 seconde d'arc ($1''$), soit

$$3,08 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al} = 206\,265 \text{ ua}$$

$$1 \text{ al} = 63\,286 \text{ ua}$$

- Les masses s'expriment en masse solaire, soit la masse du soleil, notée M_{\odot} , soit $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Ultra Deep Field (Hubble space telescope)

GOODS-Nord (Hubble space telescope)

≈ 100 milliards de galaxies dans l'Univers observable

Credit image: Hubble space telescope

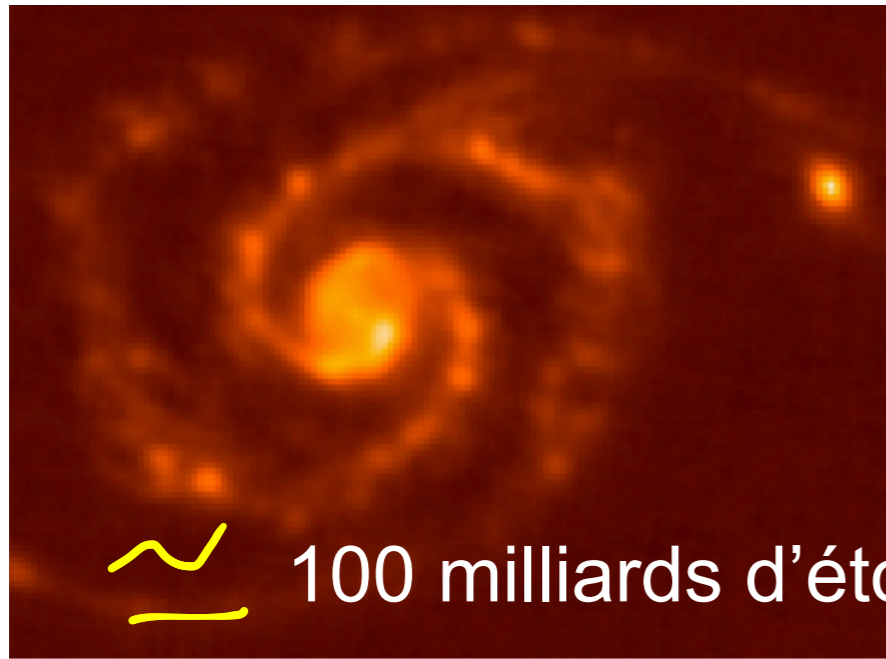


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ



≈ 100 milliards d'étoiles dans une galaxie comme la nôtre



Crédit image: V. Minier & Novae Factory

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

M51: vue dans l'infrarouge lointain par Herschel (matière interstellaire brille).



M51: vue dans le visible par Hubble (les étoiles brillent).



Une galaxie contient:

- Des étoiles
- De la matière interstellaire (entre les étoiles)

La matière interstellaire est composée:

- De gaz (atomique et moléculaire), soit 99% de la masse totale.
- De poussière (petits grains de silicate ou de carbone), soit 1% de la masse totale.

La matière interstellaire a les propriétés suivantes:

- Très froide (~ 20 Kelvin ou $-253,15^\circ\text{C}$).
- Très diffuse.
- Invisible.
- Elle rayonne de la lumière dans l'infrarouge lointain.
- C'est le matériau de base pour fabriquer des étoiles.

Crédit image: V. Minier & Novae Factory

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

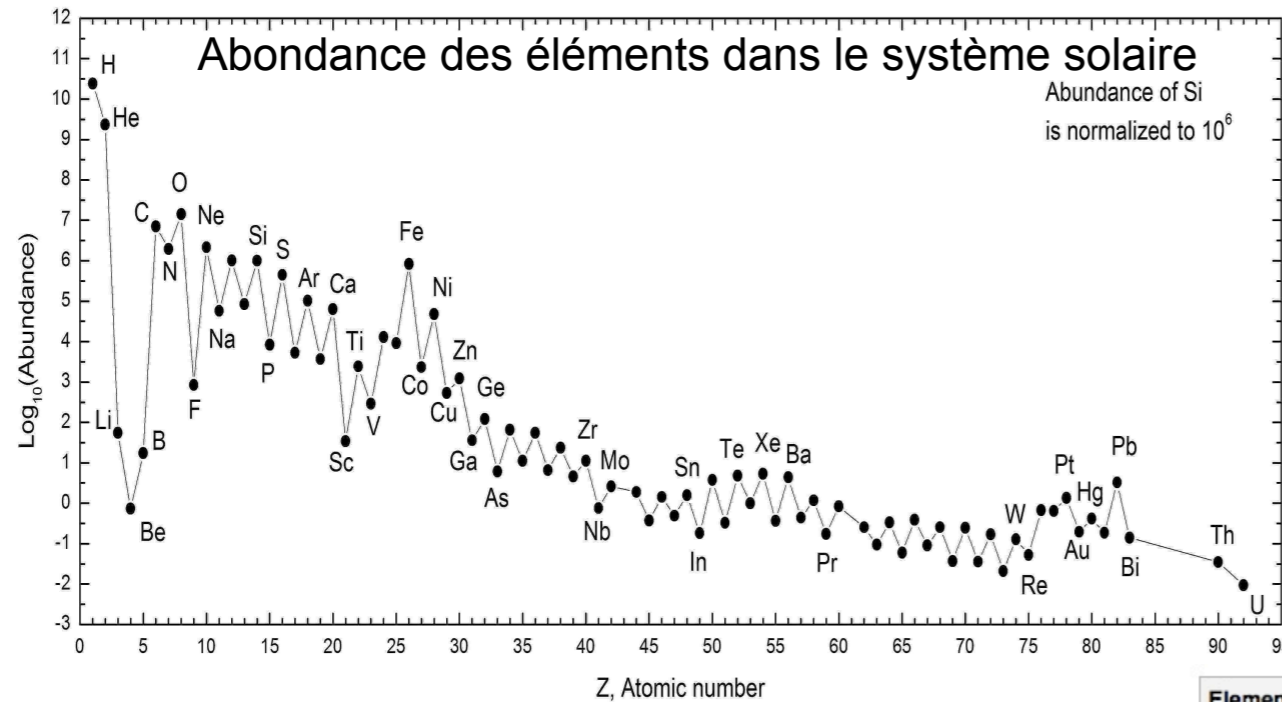


Tableau périodique des éléments

1	2											13	14	15	16	17	18		
1A	2A											3A	4A	5A	6A	7A	8A		
hydrogène 1 H 1,00794	hélium 2 He 4,002602											aluminium 13 Al 26,9815386	silicium 14 Si 28,0855	phosphore 15 P 30,973762	soufre 16 S 32,065	chlorure 17 Cl 35,4527	argon 18 Ar 39,948		
lithium 3 Li 6,941	béryllium 4 Be 9,012182											gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,62	arsenic 33 As 74,92160	sélénium 34 Se 78,96	brome 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80		
sodium 11 Na 22,98976928	magnésium 12 Mg 24,3050	scandium 21 Sc 44,955912	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,9415	chrome 24 Cr 51,9961	manganèse 25 Mn 54,938045	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933195	nickel 28 Ni 58,6934	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,39	cadmium 48 Cd 112,411	indium 49 In 114,818	étain 50 Sn 118,710	antimoine 51 Sb 121,760	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90447	xénon 54 Xe 131,29	
potassium 19 K 39,0983	calcium 20 Ca 40,078	yttrium 39 Y 88,90585	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,90638	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 97,9072	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 106,42	palladium 46 Pd 106,90550	argent 47 Ag 107,8682	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,3833	plomb 82 Pb 207,2	bière 83 Bi 208,98040	polonium 84 Po [209]	astate 85 At [209,9871]	radon 86 Rn [222,0175]		
rubidium 37 Rb 85,4678	strontium 38 Sr 87,62	zinc	gallium	germanium	arsenic	sélénium	brome	krypton											
caésium 55 Cs 132,9054519	barium 56 Ba 137,327	lanthanides 57-71	hafnium 72 Hf 178,49	tantalum 73 Ta 180,94788	wolfram 74 W 183,84	réthénium 75 Re 186,207	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,225	platine 78 Pt 195,084	or 79 Au 196,966569	mercure	thallium	plomb	bière	polonium	astate	radon		
francium 87 Fr [223,018683]	radium 88 Ra [226,0254]	actinides 89-103	thorium 90 Th 232,0377	protactinium 91 Pa 231,03688	uranium 92 U 238,02891	néptunium 93 Np [237,04817]	plutonium 94 Pu [244,0642]	américium 95 Am [243,0614]	curium 96 Cm [247,0703]	berkélium 97 Bk [247,0703]	californium 98 Cf [251,0794]	éinsteinium 99 Es [252,0830]	fermium 100 Fm [257,0951]	mendelevium 101 Md [258,1038]	nobelium 102 No [259,1038]	lawrencium 103 Lr [262,1033]			

Les éléments chimiques les plus abondants dans le milieu interstellaire, dans le système solaire, sont également parmi les plus abondants sur Terre et dans le corps humain.

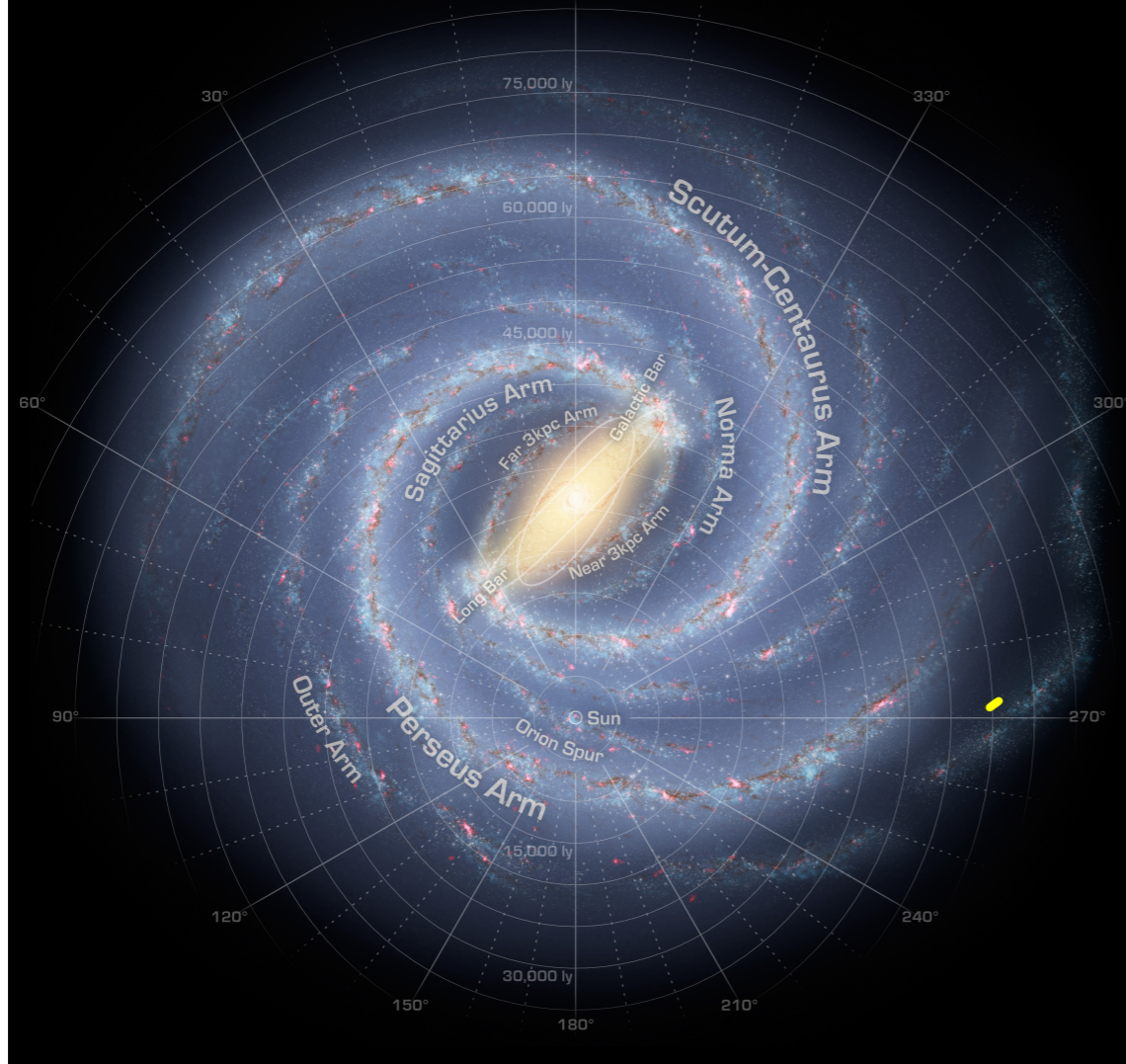
Element	Percent of Mass ^[1]	Mass (kg) ^[2]
Oxygen	65	43
Carbon	18	16
Hydrogen	10	7
Nitrogen	3	1.8
Calcium	1.5	1.0
Phosphorus	1	0.780
Potassium	0.25	0.140
Sulfur	0.25	0.140
Sodium	0.15	0.100
Chlorine	0.15	0.095
Magnesium	0.05	0.019
Iron	0.006	0.0042
Fluorine	0.0037	0.0026
Zinc	0.0032	0.0023
Silicon	0.002	0.0010

Dans le corps humain

Element	Percent of Atoms ^[3]	Atoms
Hydrogen	63	4.22×10^{27}
Oxygen	24	1.61×10^{27}
Carbon	12	8.03×10^{26}
Nitrogen	0.58	3.9×10^{25}
Calcium	0.24	1.6×10^{25}
Phosphorus	0.14	9.6×10^{24}
Sulfur	0.038	2.6×10^{24}
Sodium	0.037	2.5×10^{24}
Potassium	0.033	2.2×10^{24}
Chlorine	0.024	1.6×10^{24}
Magnesium	0.0070	4.7×10^{23}
Silicon	0.0058	3.9×10^{23}
Fluorine	0.0012	8.3×10^{22}
Iron	0.00067	4.5×10^{22}

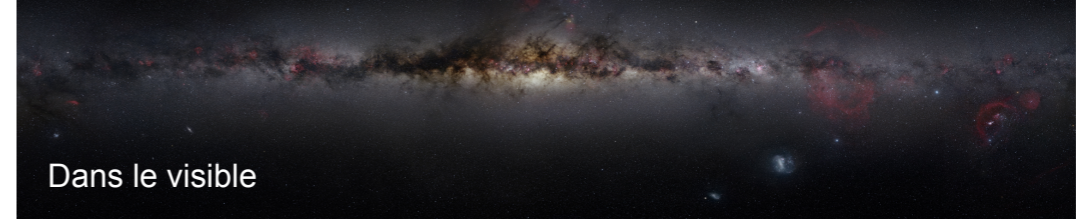
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Image théorique de notre galaxie vue de face



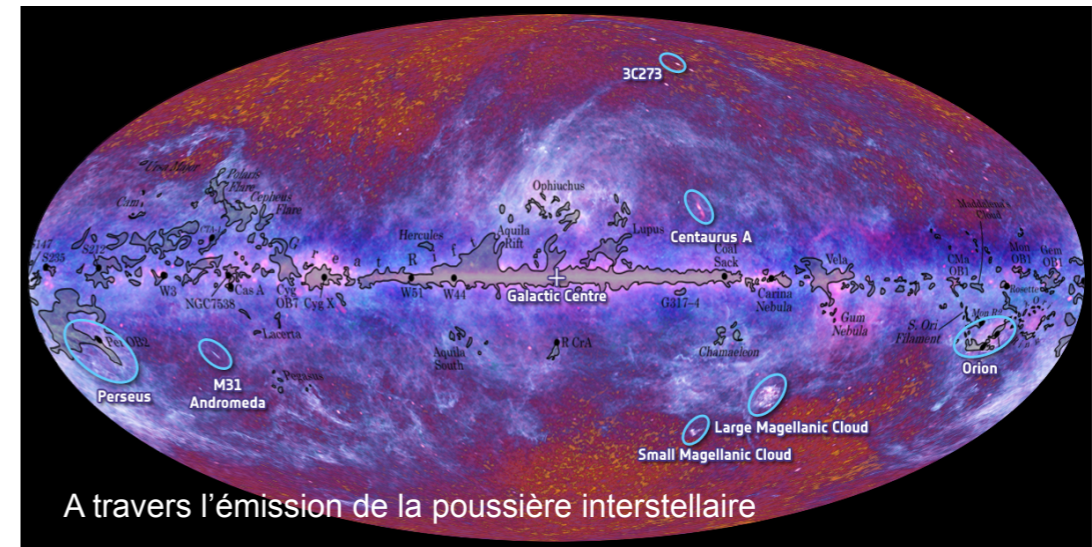
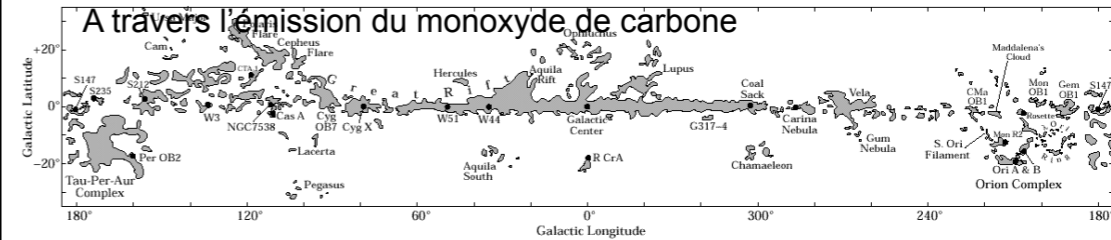
Crédit image: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt

Vue de notre galaxie depuis la Terre ou en orbite



Dans le visible

A travers l'émission du monoxyde de carbone



A travers l'émission de la poussière interstellaire

Crédit image: Nick Risinger; Dame et al. 2001 -

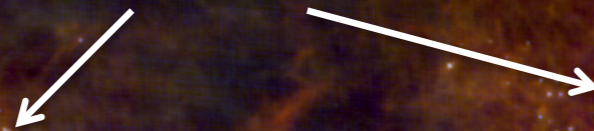
<http://www.cfa.harvard.edu/mmw/MilkyWayinMolClouds.html>; Planck/ESA.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Le nuage moléculaire Vela C contient:

- du gaz sous forme de molécule (H₂, CO, H₂O...).
- de la poussière interstellaire.

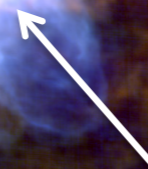
Cocons d'étoiles



La poussière interstellaire rayonne et indique:

- des dimensions de 30 pc x 2 pc
- une température moyenne de 20 Kelvin.
- une masse total de 3×10^4 masses solaires (M_{\odot}).
- une masse volumique de l'ordre de 10^{-17} kg/m³.

Jeunes étoiles
chauffant la poussière

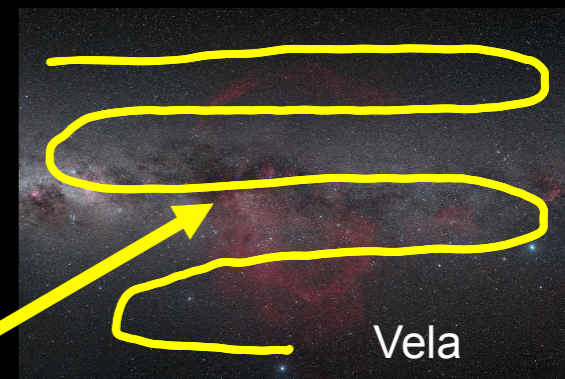
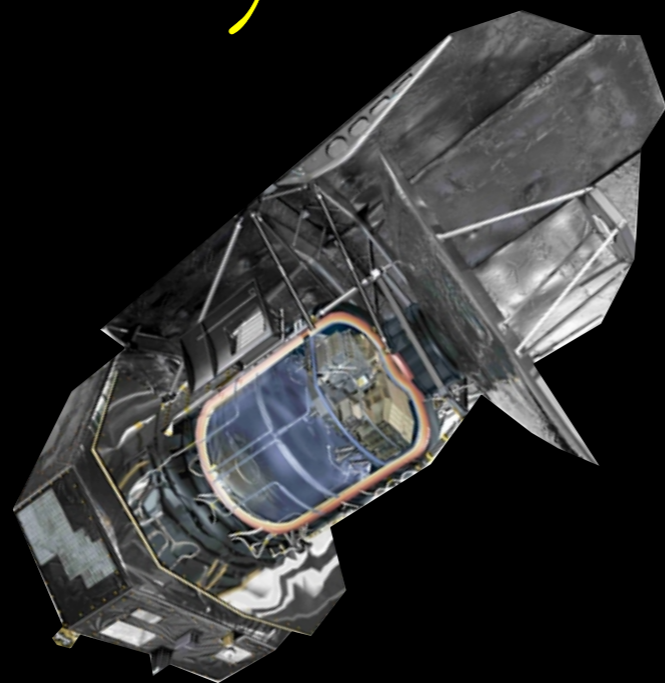


Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

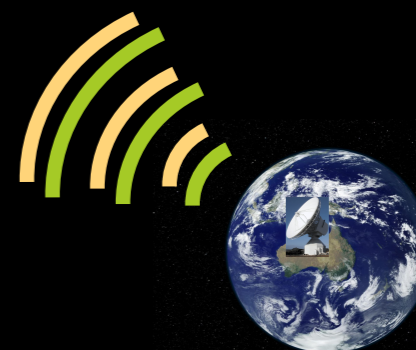
Emission de la poussière interstellaire dans 3 bandes Herschel (Hill et al. 2011) dans la région Vela C: 70 (bleu), 160 (vert), 250 (rouge) μm .

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

Observatoire spatial
Herschel
(2009 - 2013)

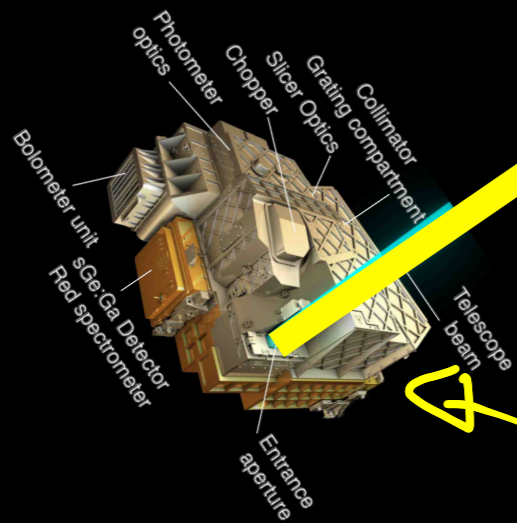


Zone
observée

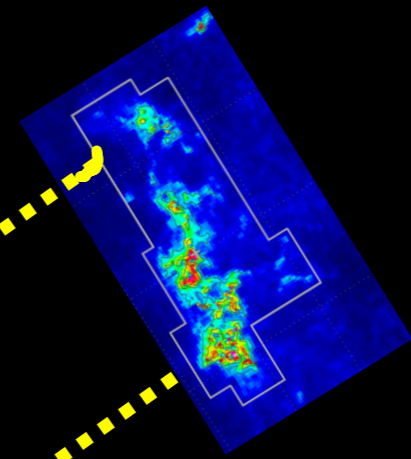


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ

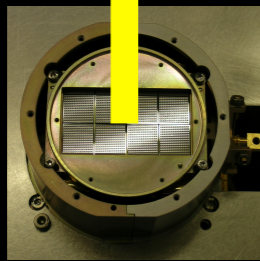
L'instrument PACS



Résolution
angulaire
 $\approx \lambda / D$



miroir



Caméra: 2048 pixels

0,3 K = -272,85°C

Cryoréfrigérateur



$D = 3,5\text{m}$
 $\lambda = 100\ \mu\text{m}$

Crédit images: ESA - CEA

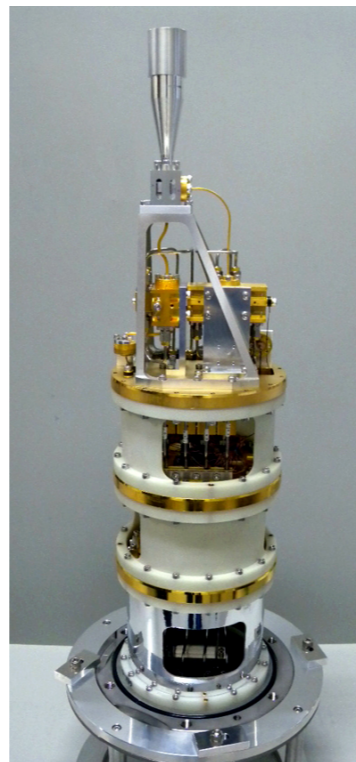
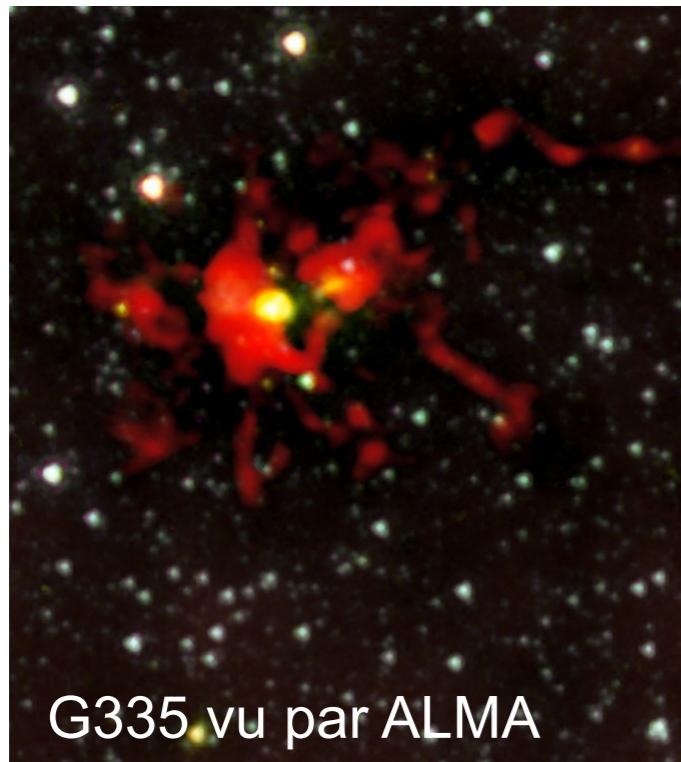


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1. RÉSUMÉ



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.

Séance #2

2. Le cycle de la naissance des étoiles.

- A. Formation stellaire et filaments interstellaires.
- B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.
- C. Fonction de masse initiale.
- D. Formation induite des étoiles.
- E. Scénario pour le Soleil.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.

Vidéo ExplorNova 360°

[Site ExplorNova 360°](http://explornova360.com) (<http://explornova360.com>), chercher les Nuages moléculaires et cliquer dessus !

Ou lien direct vers vidéo Vela C:

http://www.dailymotion.com/video/xog5n6_picturing-star-motion-le-nuage-moleculaire-de-vela-c_tech

à visionner

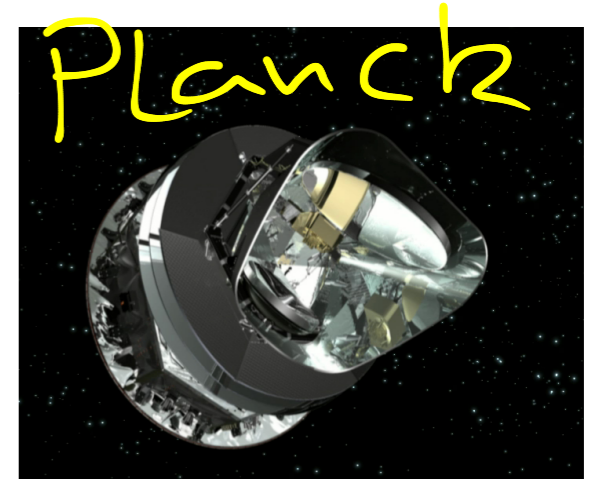
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.

Séance #2

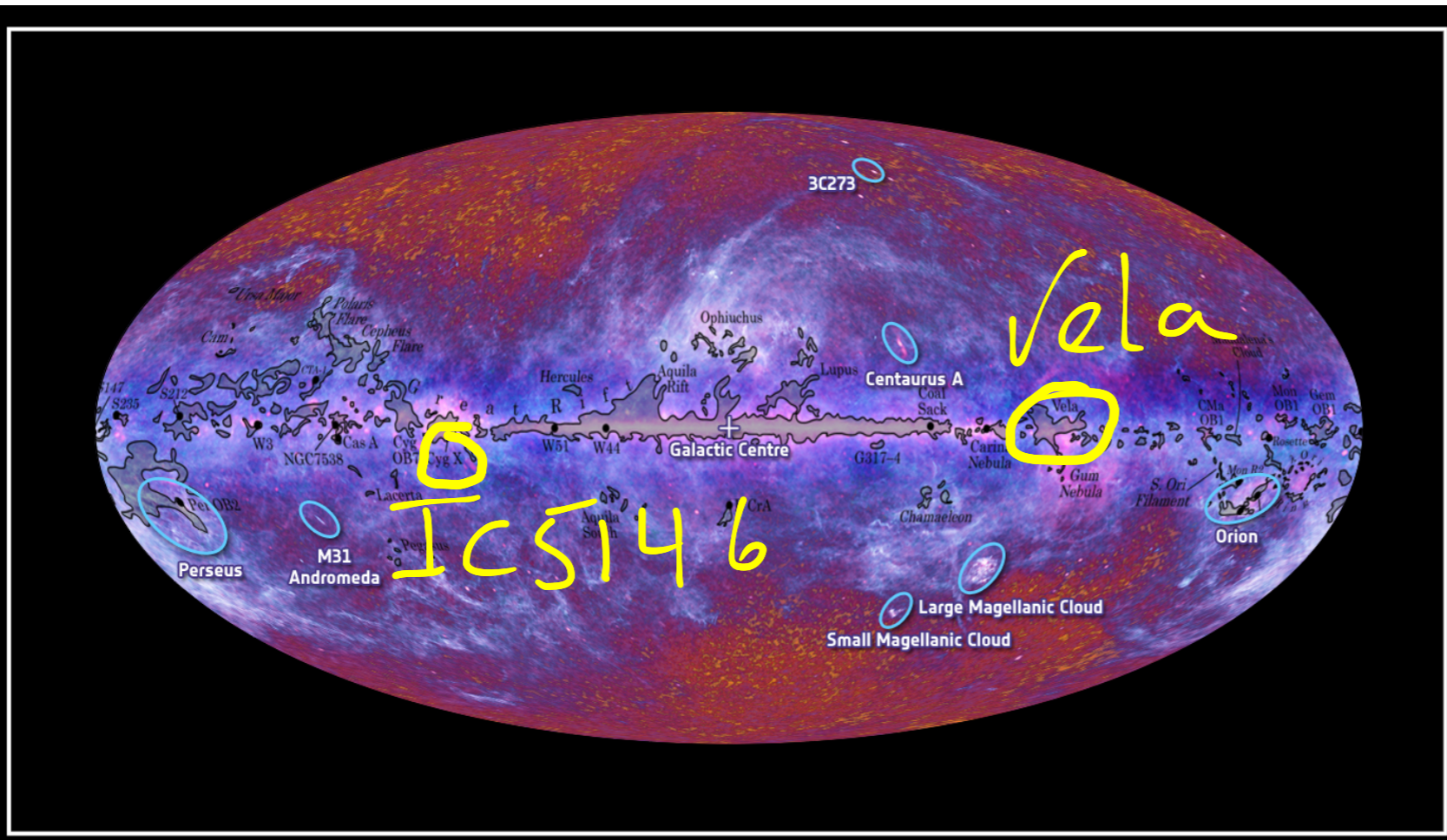
2. Le cycle de la naissance des étoiles.

- A. Formation stellaire et filaments interstellaires.**
- B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.
- C. Fonction de masse initiale.
- D. Formation induite des étoiles.
- E. Scénario pour le Soleil.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.



Crédit images: ESA



The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

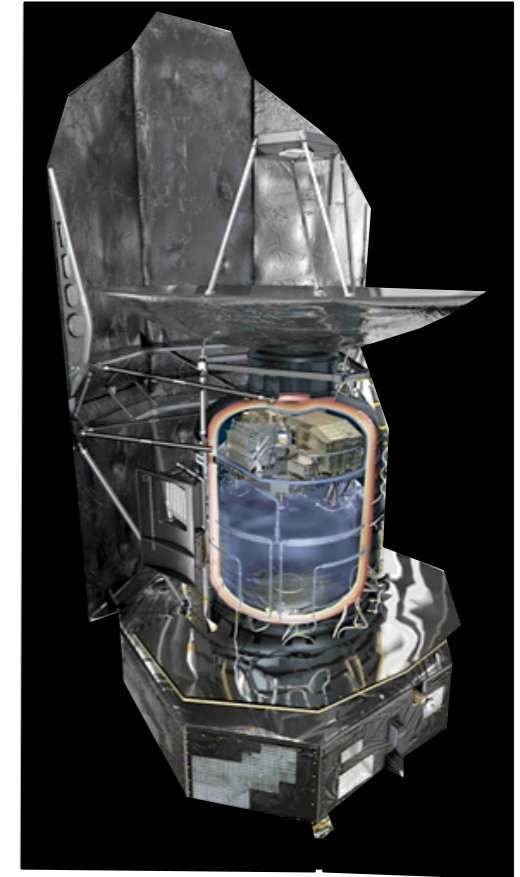


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

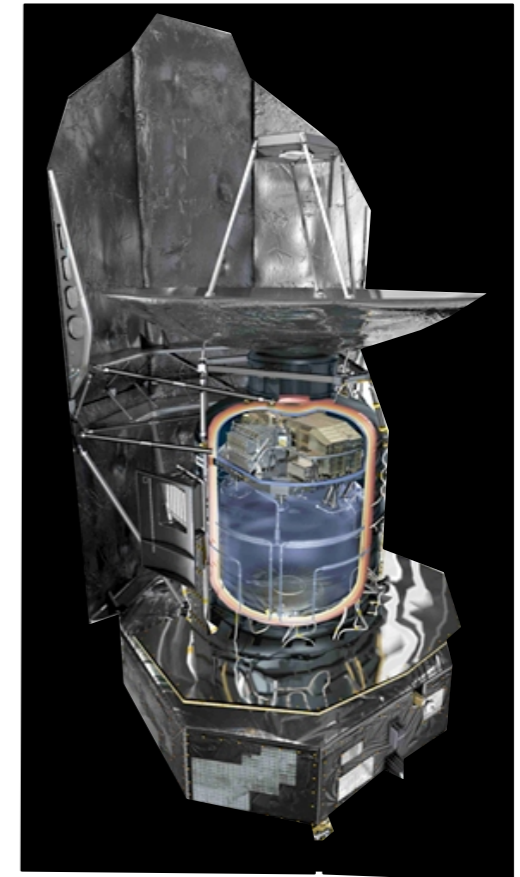
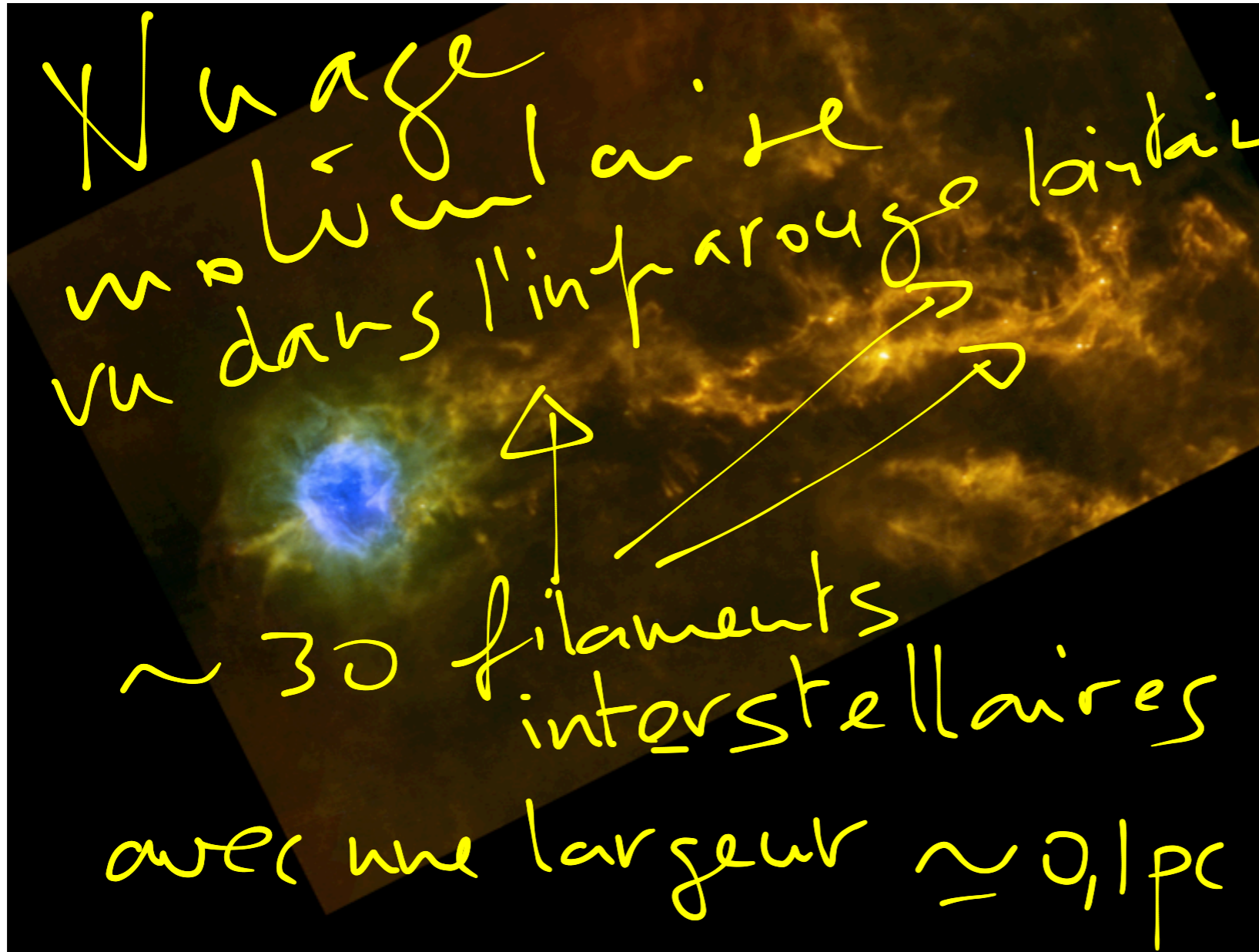
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.



Herschel

Crédit image: Adam Block/NOAO/AURA/NSF

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.



Herschel

Crédit image: Gould Belt/André – Herschel/ESA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.

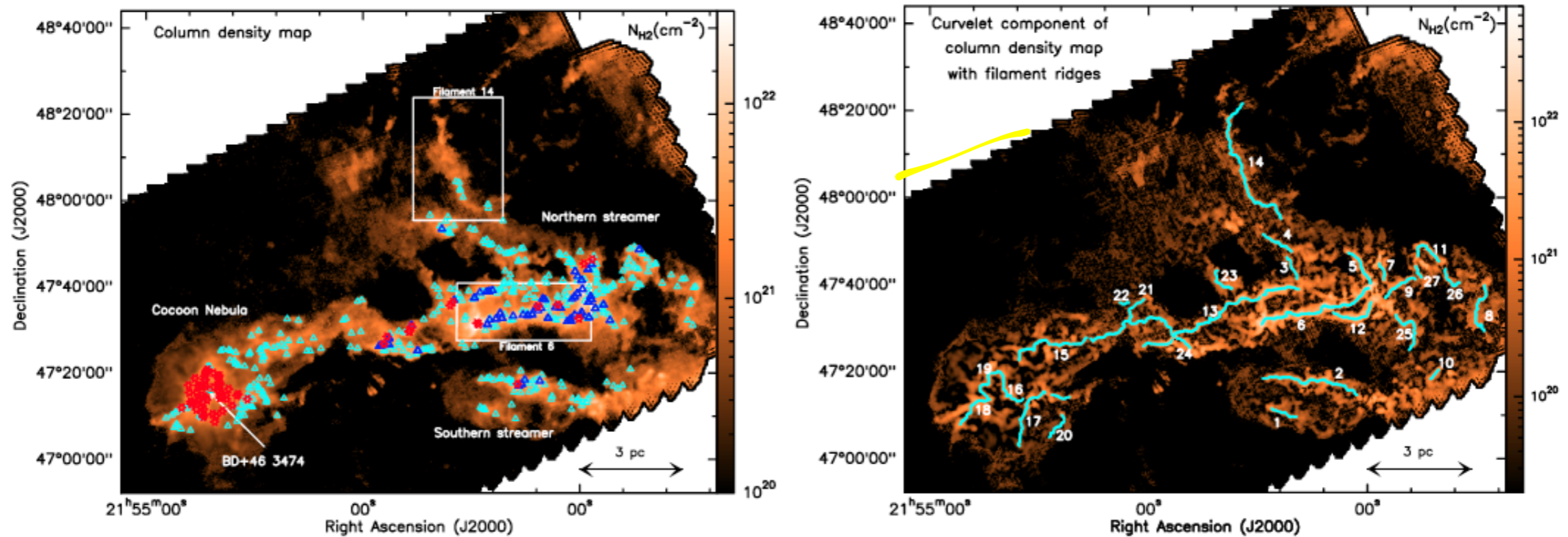


Fig. 1. (a) Column density map derived from our SPIRE/PACS observations of IC5146. The resolution corresponds to the 36.9'' HPBW resolution of SPIRE at 500 μ m. The positions of the YSOs and starless cores detected with *Herschel* (using *get-sources*, a source-finding algorithm described in [Men'shchikov et al. 2010](#)) are plotted as red stars and blue triangles respectively; bound starless cores are in dark blue (cf. Fig. 6b and [Könyves et al. 2010](#), for classification details). The locations of the two filaments (6 and 14) whose radial profiles are shown in Fig. 2 and online Fig. 4 are marked by the white rectangles. (b) *Curvelet* component of the column density map, with the network of 27 identified filaments shown in blue.

Crédit image: D. Arzoumanian/Gould Belt - Herschel/ESA

Les étoiles naissent dans les filaments

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.



Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

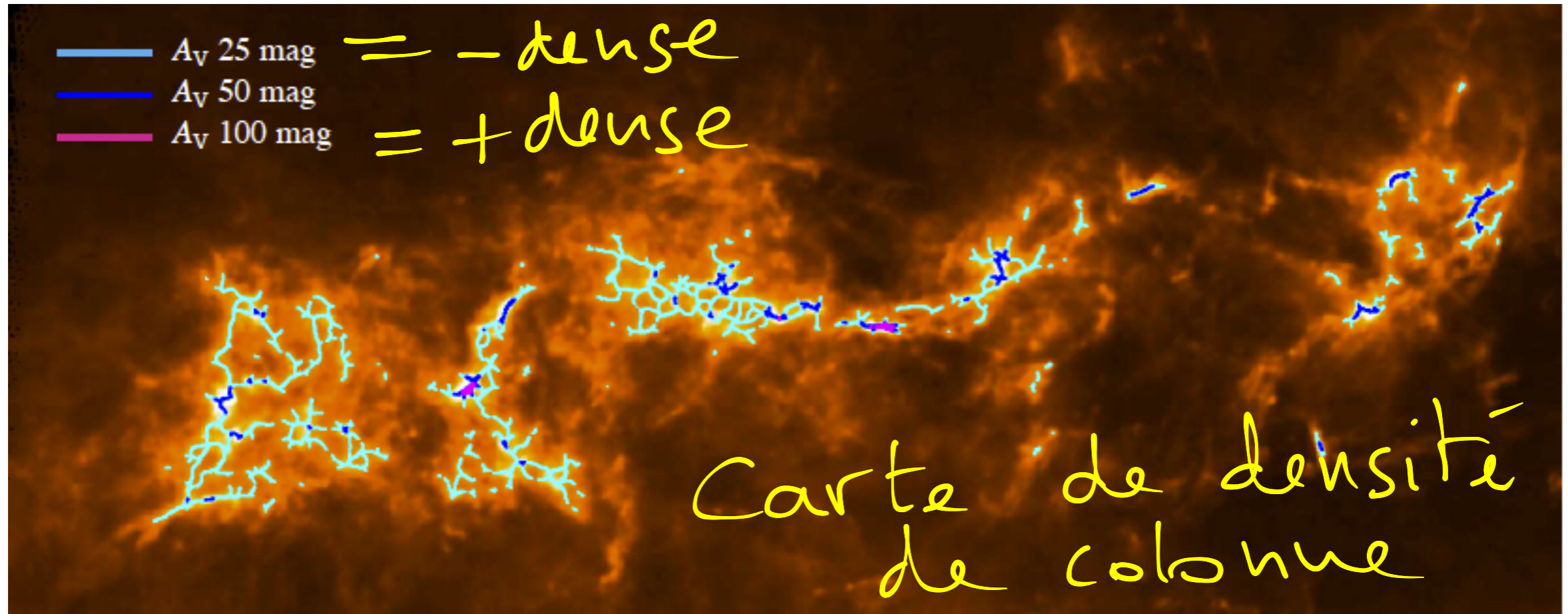
Emission de la poussière interstellaire dans 3 bandes Herschel (Hill et al. 2011) dans la région Vela C: 70 (bleu), 160 (vert), 250 (rouge) μm .

+ chaud

+ froid

Températures:
10 - 50 K

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.A.



Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

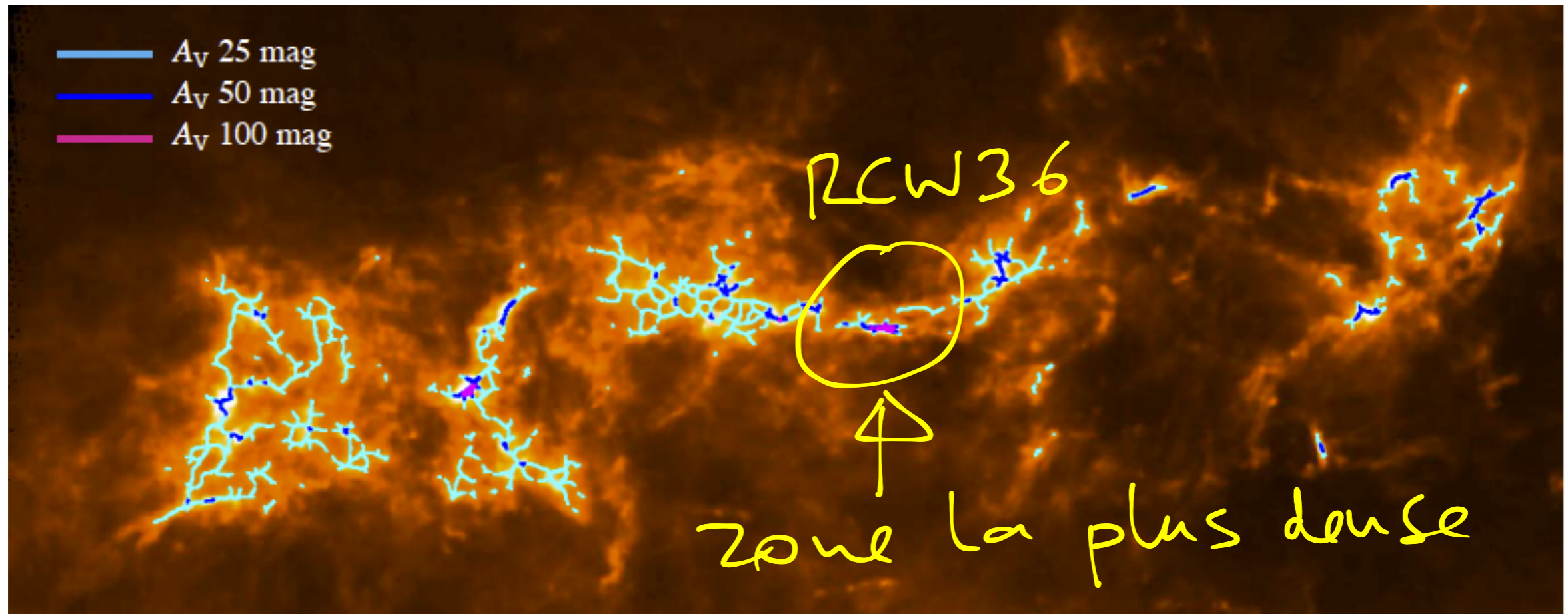
Carte de densité de colonne dans la région Vela C avec en surimpression le squelette de filaments interstellaires (Hill et al. 2011). Chaque filament a une couleur correspondant à sa densité. Les plus denses correspondent à A_V le plus grand. A_V est l'extinction du filament, c'est-à-dire sa capacité à absorber la lumière dans le visible et à « éteindre » le filament.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.

Séance #2

2. Le cycle de la naissance des étoiles.
 - A. Formation stellaire et filaments interstellaires.
 - B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.**
 - C. Fonction de masse initiale.
 - D. Formation induite des étoiles.
 - E. Scénario pour le Soleil.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.



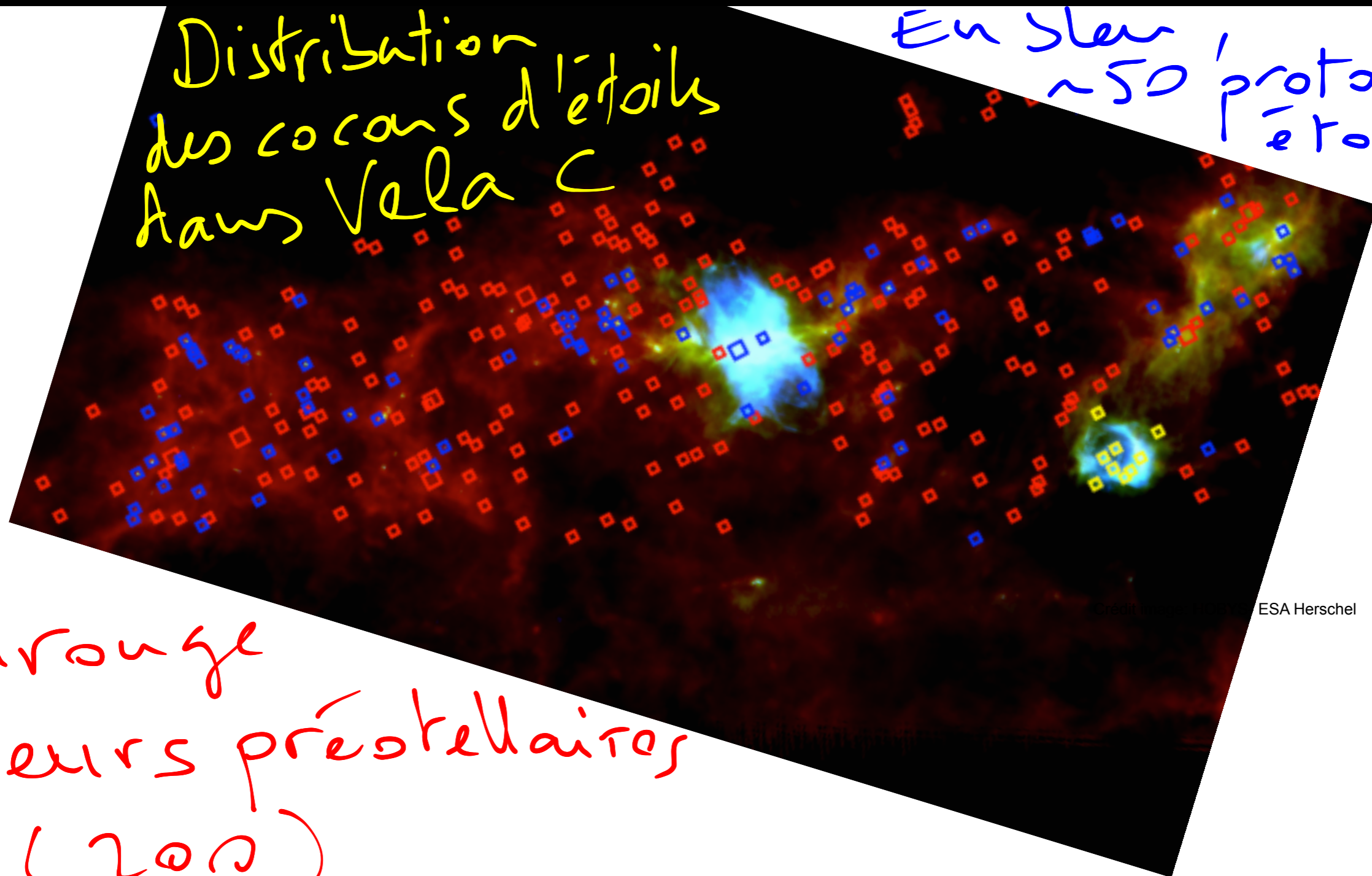
Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

Carte de densité de colonne dans la région Vela C avec en surimpression le squelette de filaments interstellaires (Hill et al. 2011). Chaque filament a une couleur correspondant à sa densité. Les plus denses correspondent à A_V le plus grand. A_V est l'extinction du filament, c'est-à-dire sa capacité à absorber la lumière dans le visible et à « éteindre » le filament.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.

Distribution
des coeurs d'étoiles
dans Vela C

En bleu
~50 proto-
étoiles



ESA Herschel

En rouge
coeurs préstellaires
(200)

Crédit image: Giannini /HOBYS – Herschel/ESA



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.

Cœurs préstellaires et protoétoiles

=
=
Cocons d'étoiles
=
=
poches de gaz
et de poussière

En moyenne :

$$\phi = 0,05 \text{ pc}, T \sim 10 \text{ K}, M = 5 M_{\odot}$$

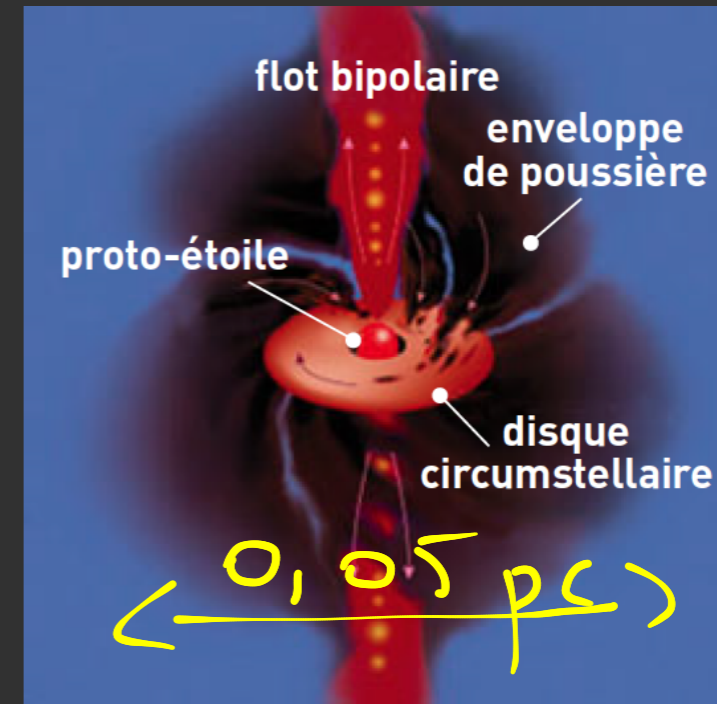


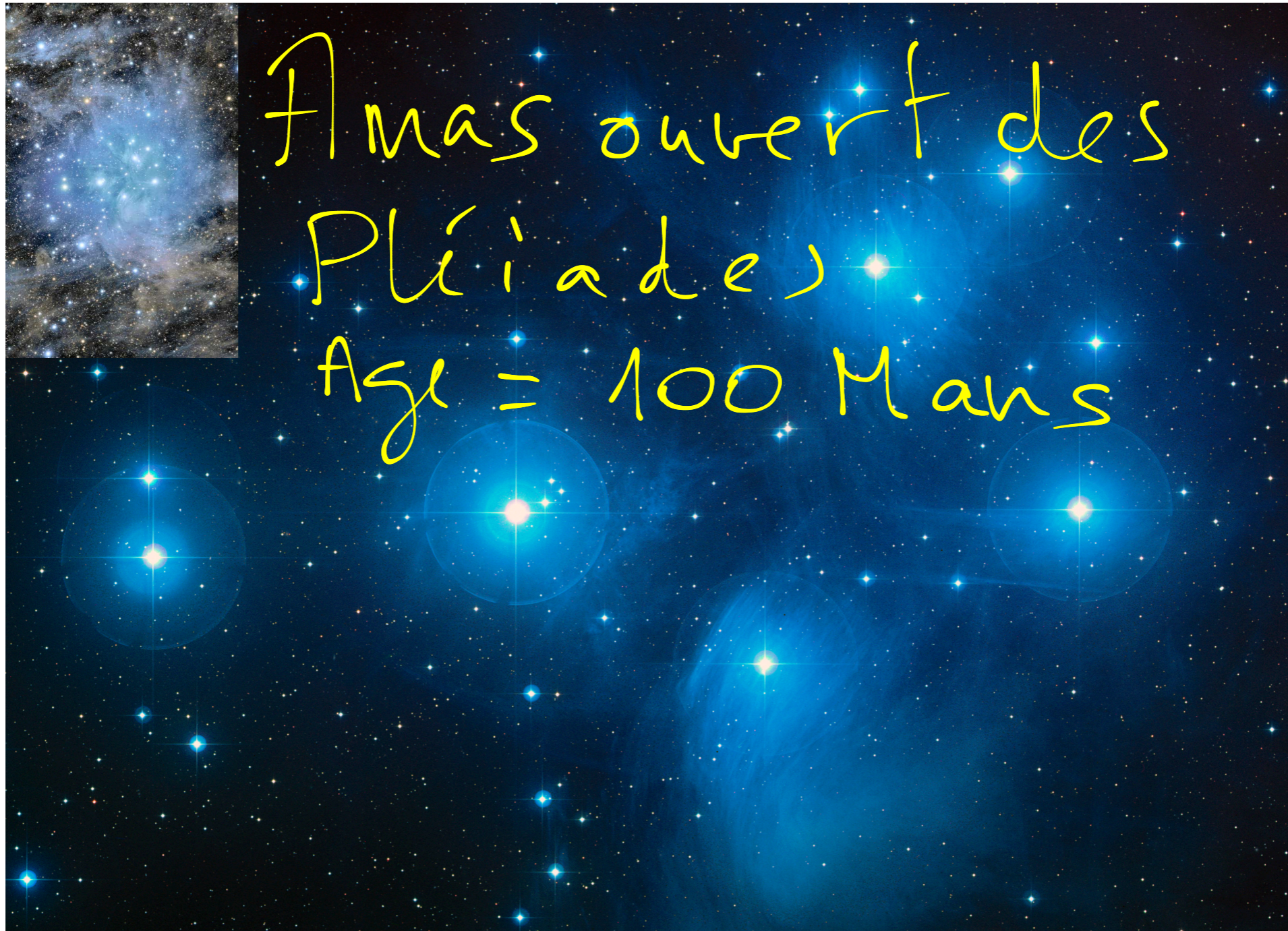
schéma d'une
protoétoile

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.



Crédit image: APOD 2007, Robert Gendler

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.B.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.C.

Séance #2

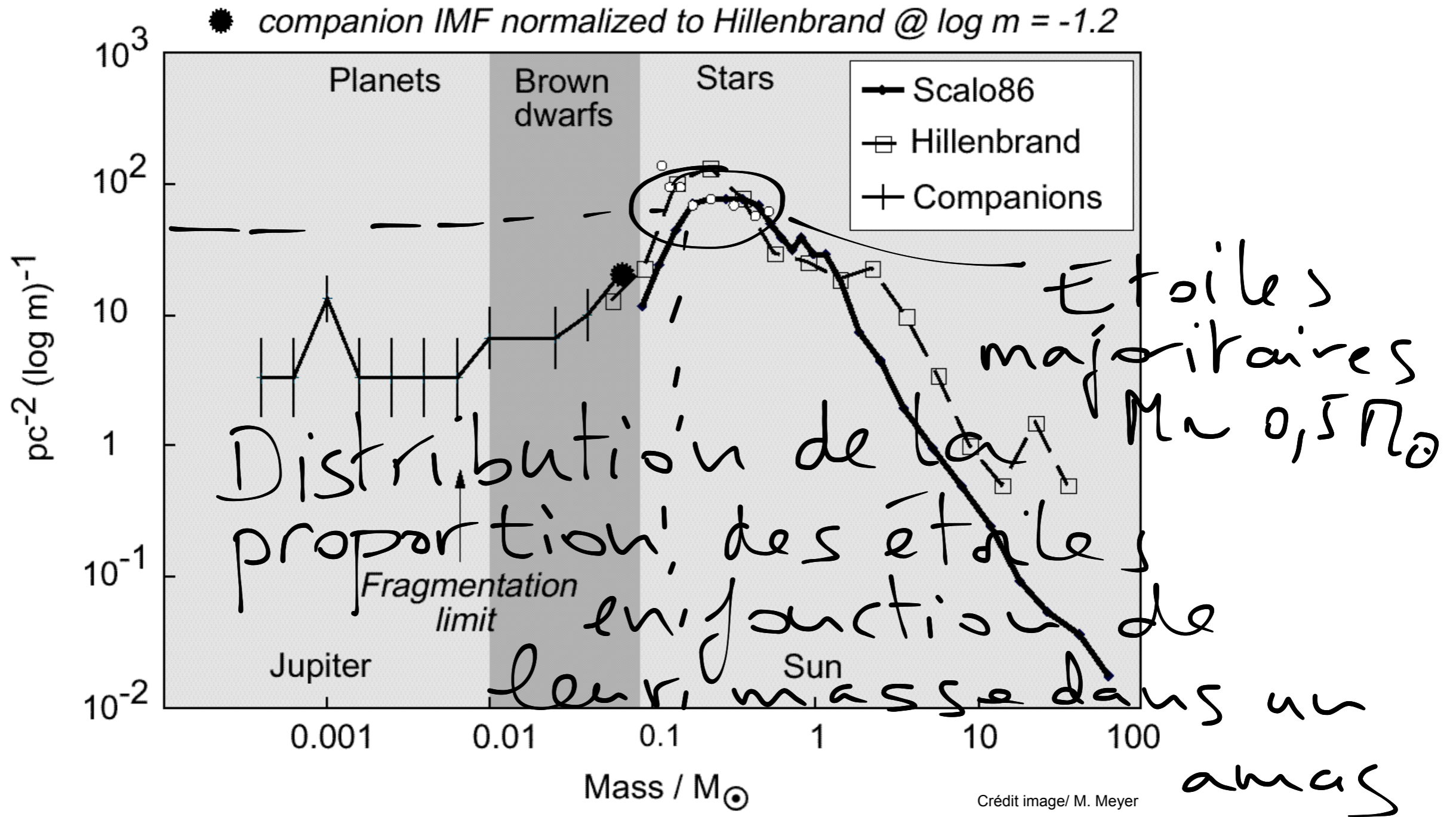
2. Le cycle de la naissance des étoiles.
 - A. Formation stellaire et filaments interstellaires.
 - B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.
 - C. Fonction de masse initiale.**
 - D. Formation induite des étoiles.
 - E. Scénario pour le Soleil.

Notation :

1 Mans = 1 millions d'années

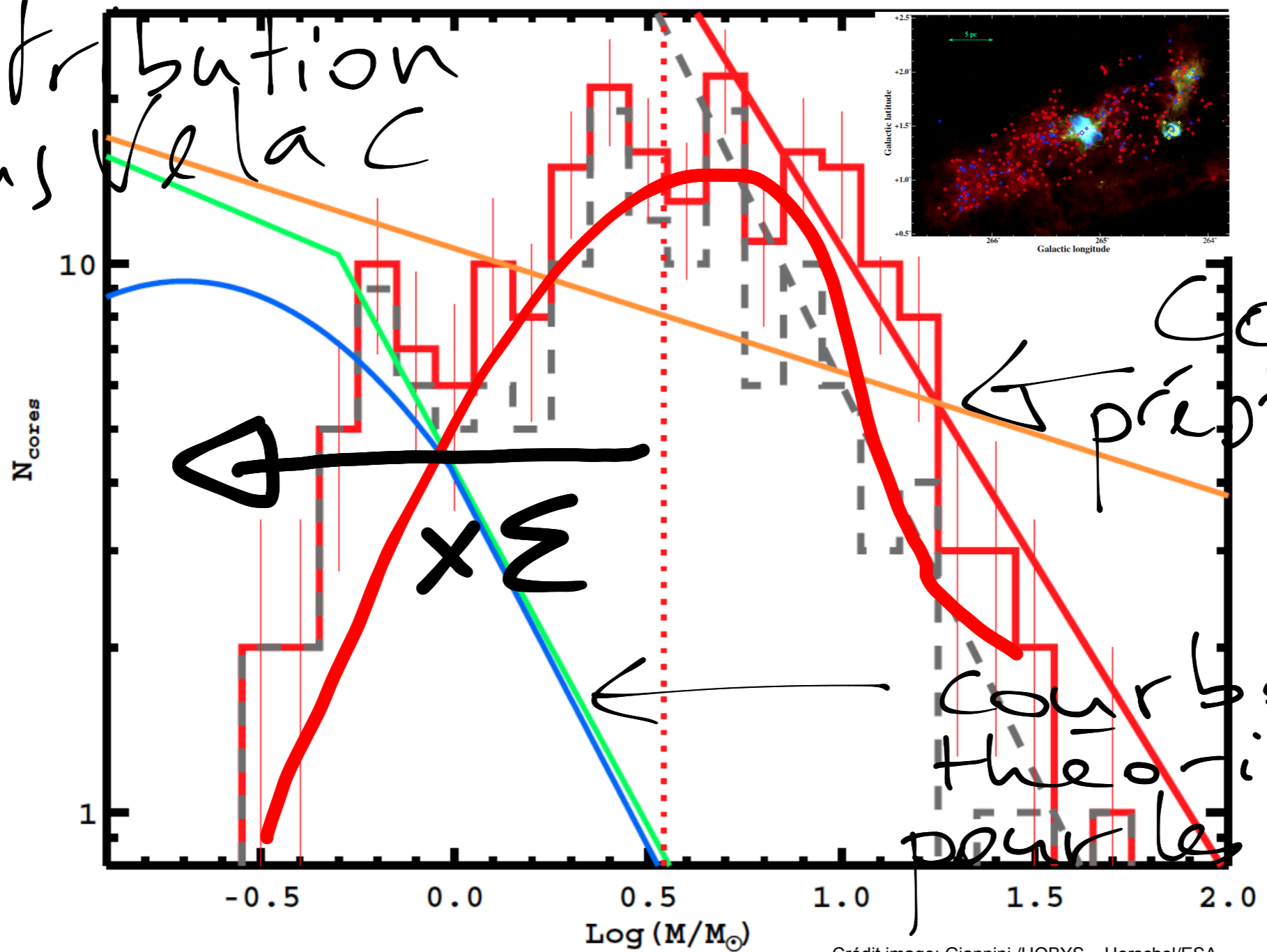
1 Mdans = 1 milliard d'années

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.C.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.C.

Distribution dans la C



↑
x 3

← Coeurs préstellaires

← Courbe théorique pour les étoiles

Crédit image: Giannini /HOBYS – Herschel/ESA

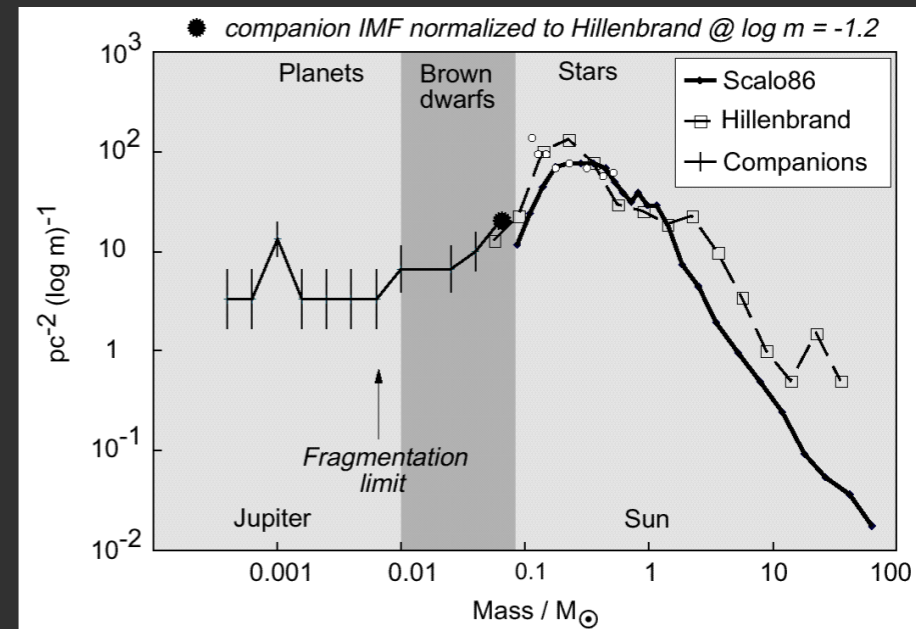
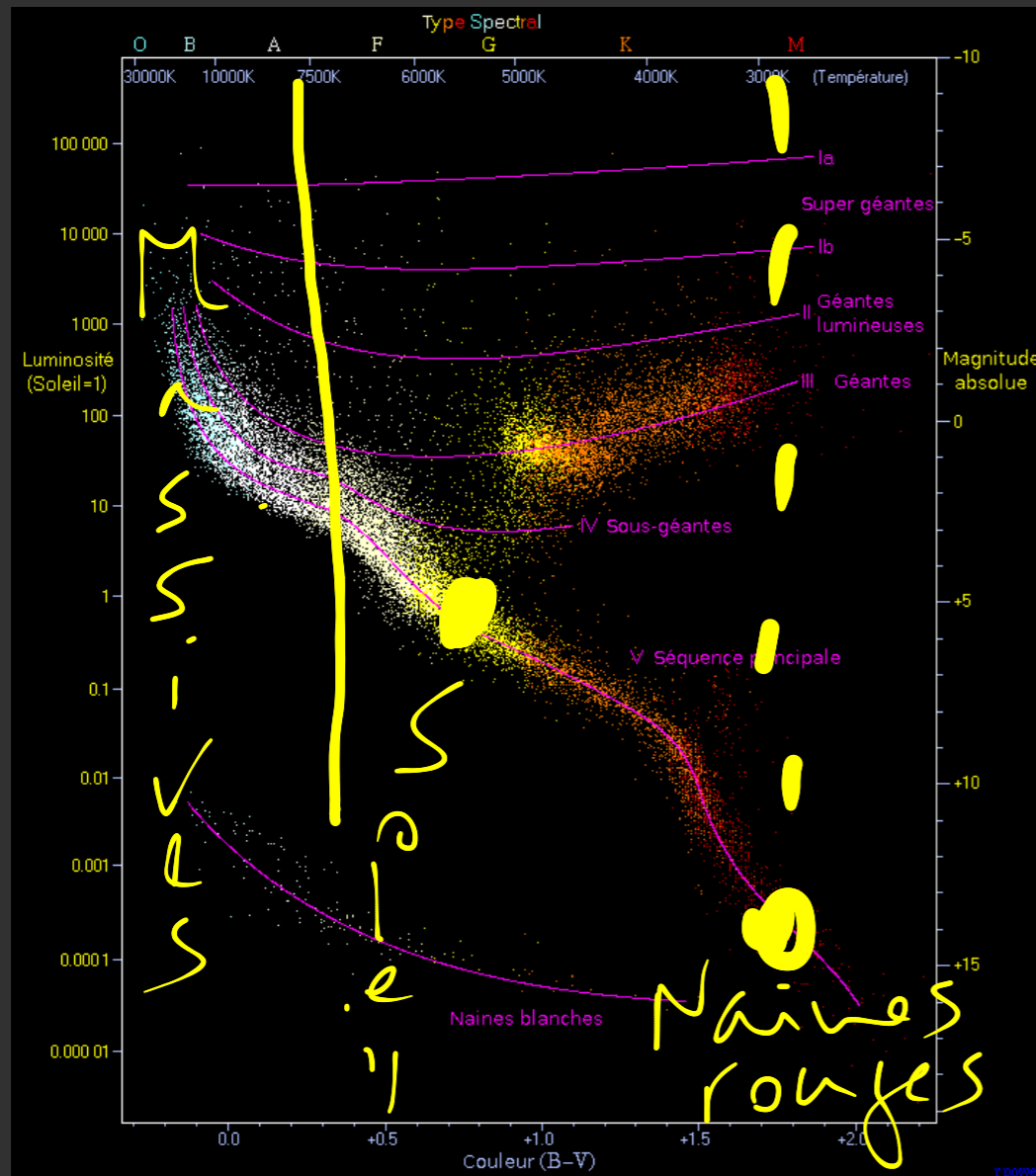


Auteur: Vincent Minier



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.C.

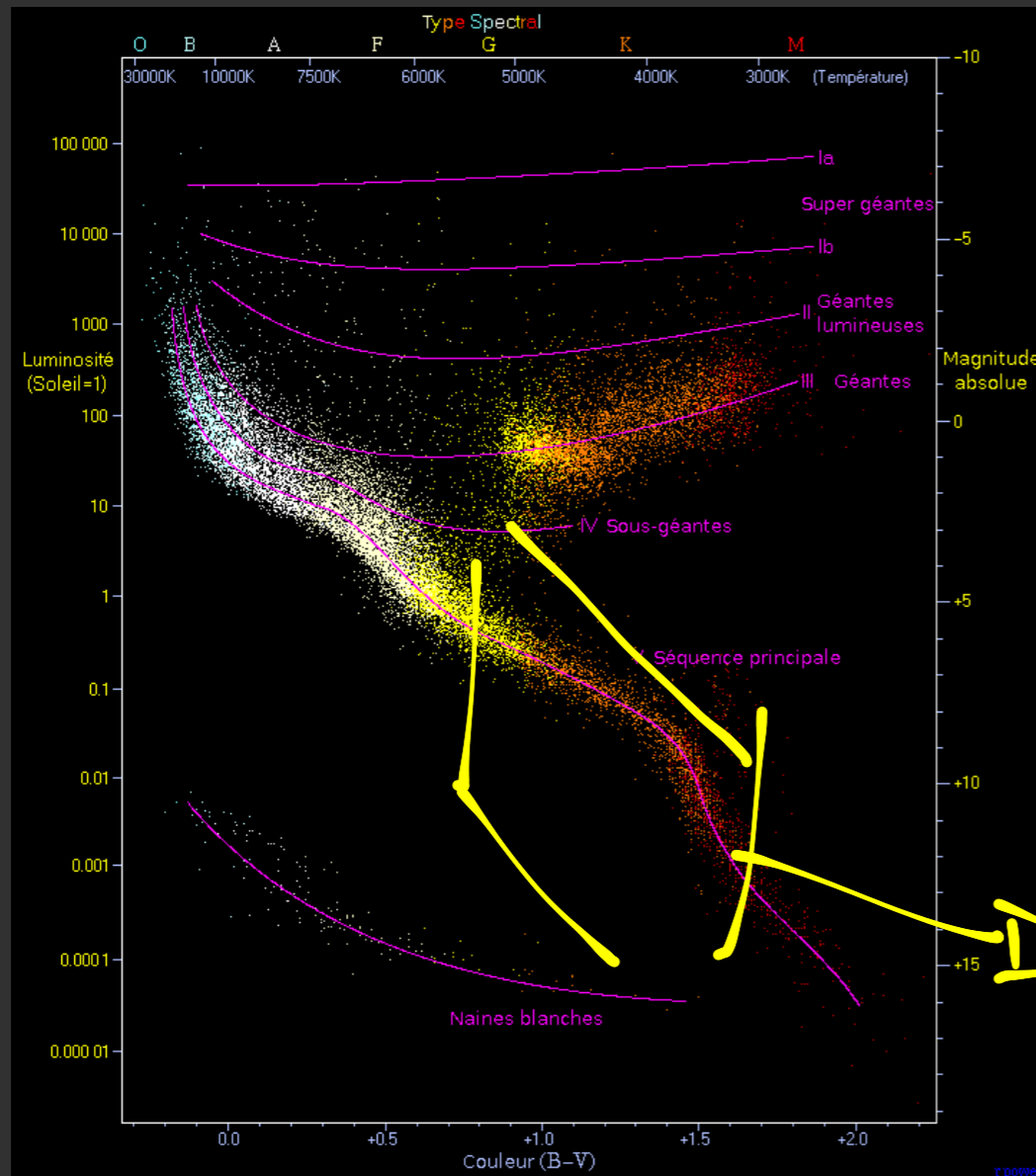
Nombre de soleils ou d'étoiles pouvant accueillir une planète habitable ?



Etoiles massives:
 UV + vie courte
 Naines rouges:
 > 10 Mdans

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.C.

Nombre de soleils ou d'étoiles pouvant accueillir une planète habitable ?



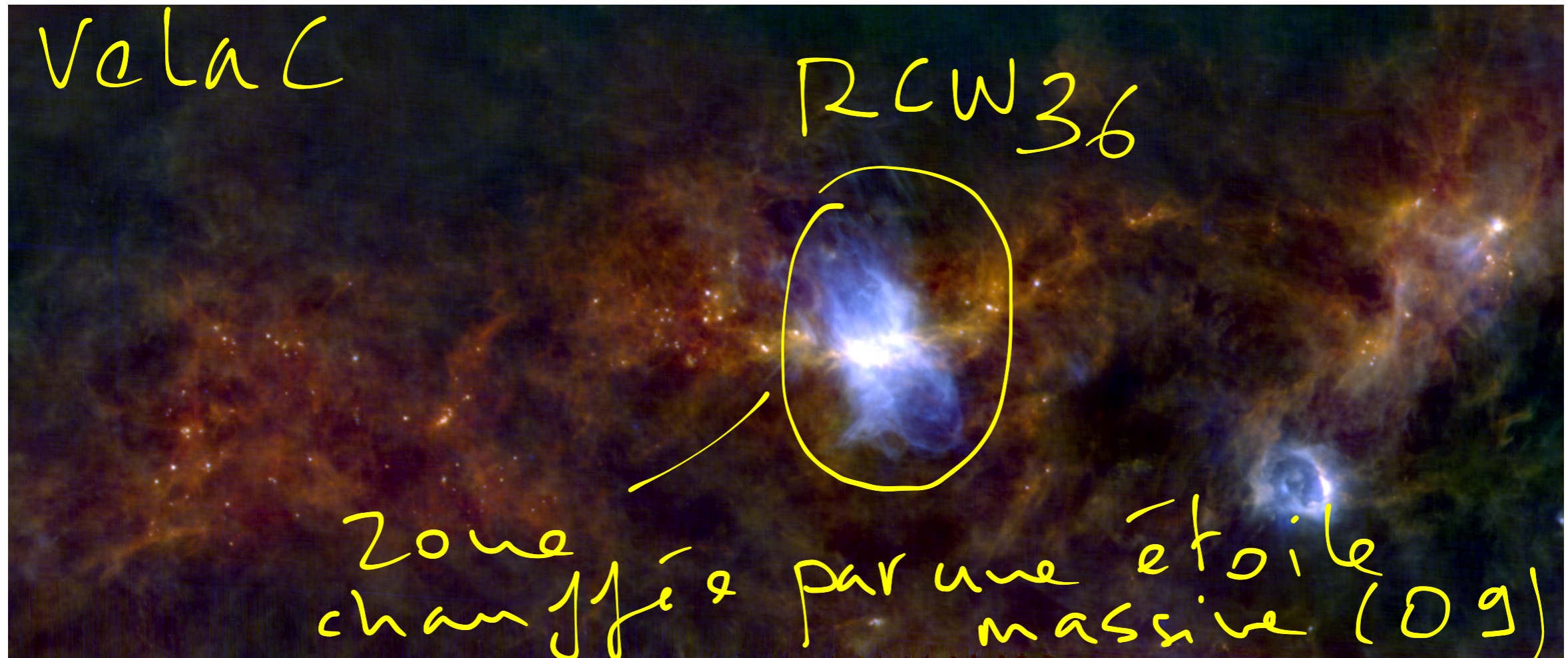
Sur Terre,
vie primitive
après > 100 ans
vie "intelligente"
depuis 1 Ma ans
⇒ D'étoiles
entre soleil et
maintenir rouges pour donner le temps à la
vie

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.

Séance #2

2. Le cycle de la naissance des étoiles.
 - A. Formation stellaire et filaments interstellaires.
 - B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.
 - C. Fonction de masse initiale.
 - D. Formation induite des étoiles.**
 - E. Scénario pour le Soleil.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.



Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

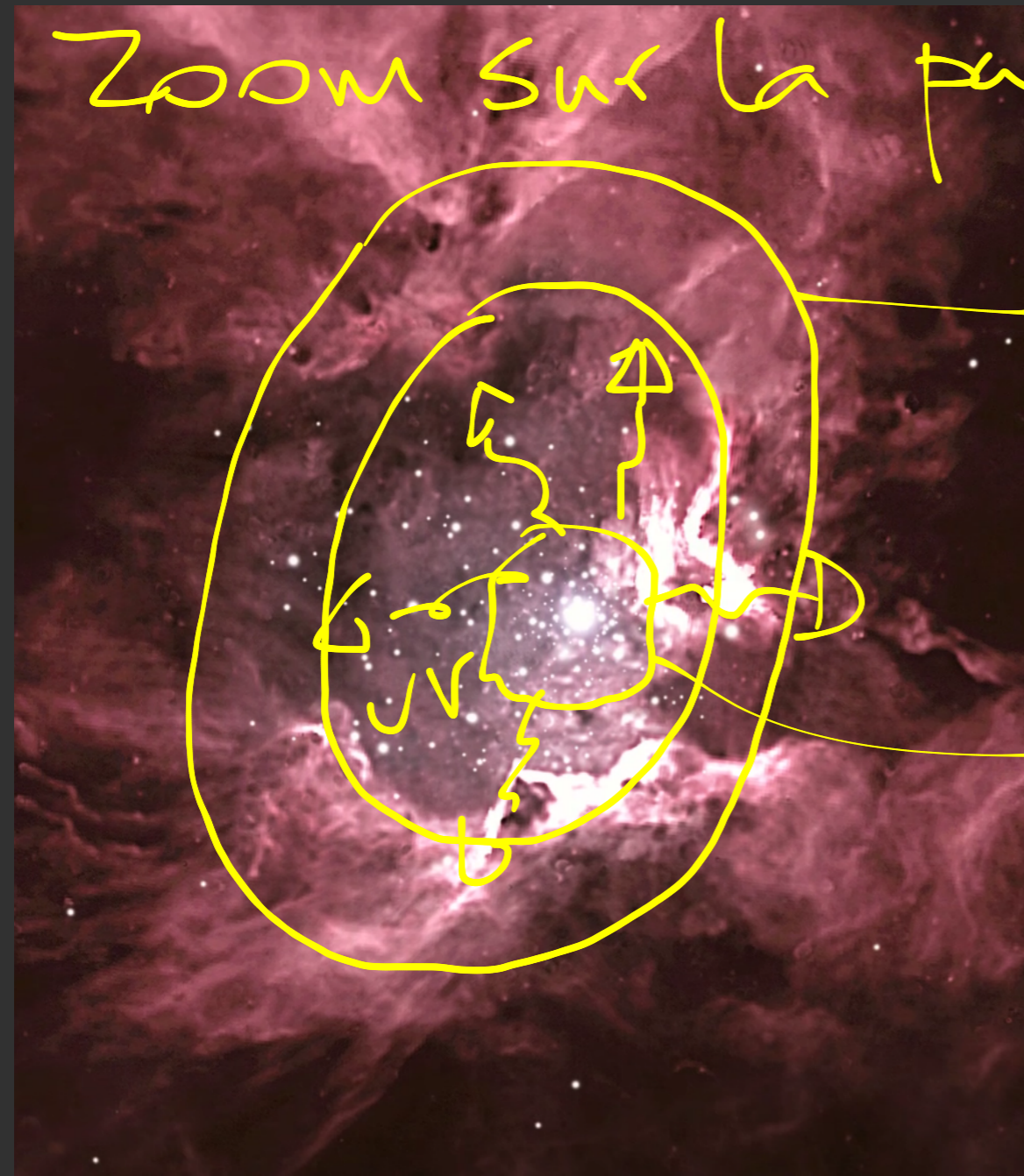
Emission de la poussière interstellaire dans 3 bandes Herschel (Hill et al. 2011) dans la région Vela C: 70 (bleu), 160 (vert), 250 (rouge) μm .

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.



Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.



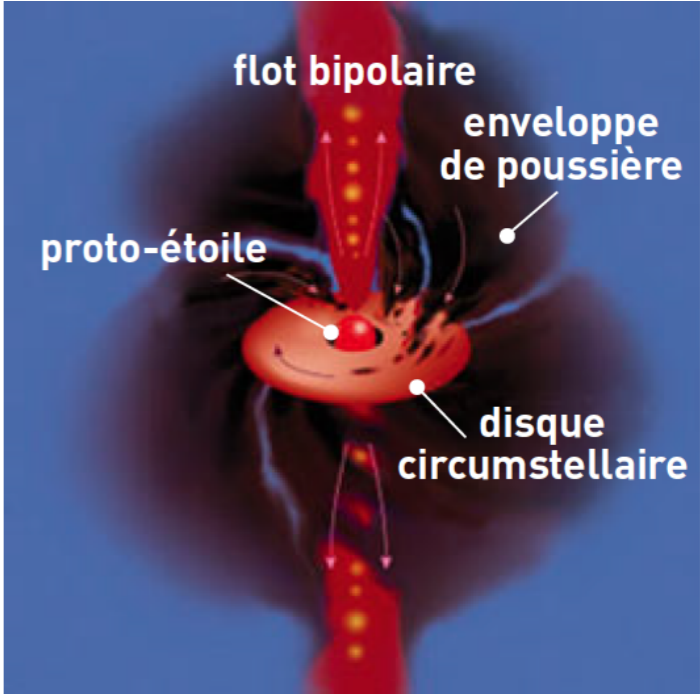
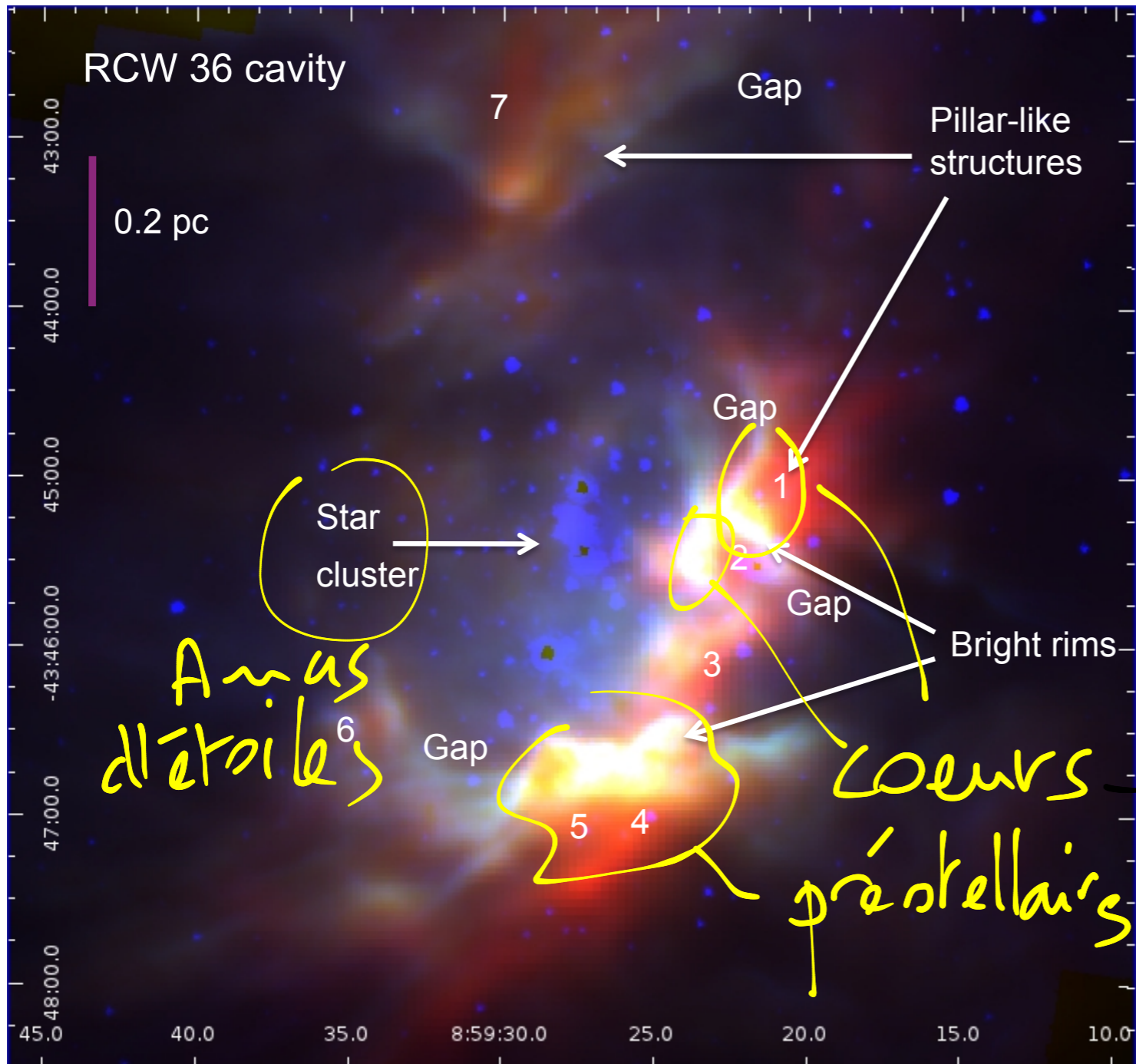
Zoom sur la partie centrale de RCW 36

Anneau de matière compressée

Amas d'étoiles + 1 étoile massive
=> Irradiation UV

Crédit image: V. Minier & Novae Factory

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.



Amas d'étoiles

Coeurs protellaires

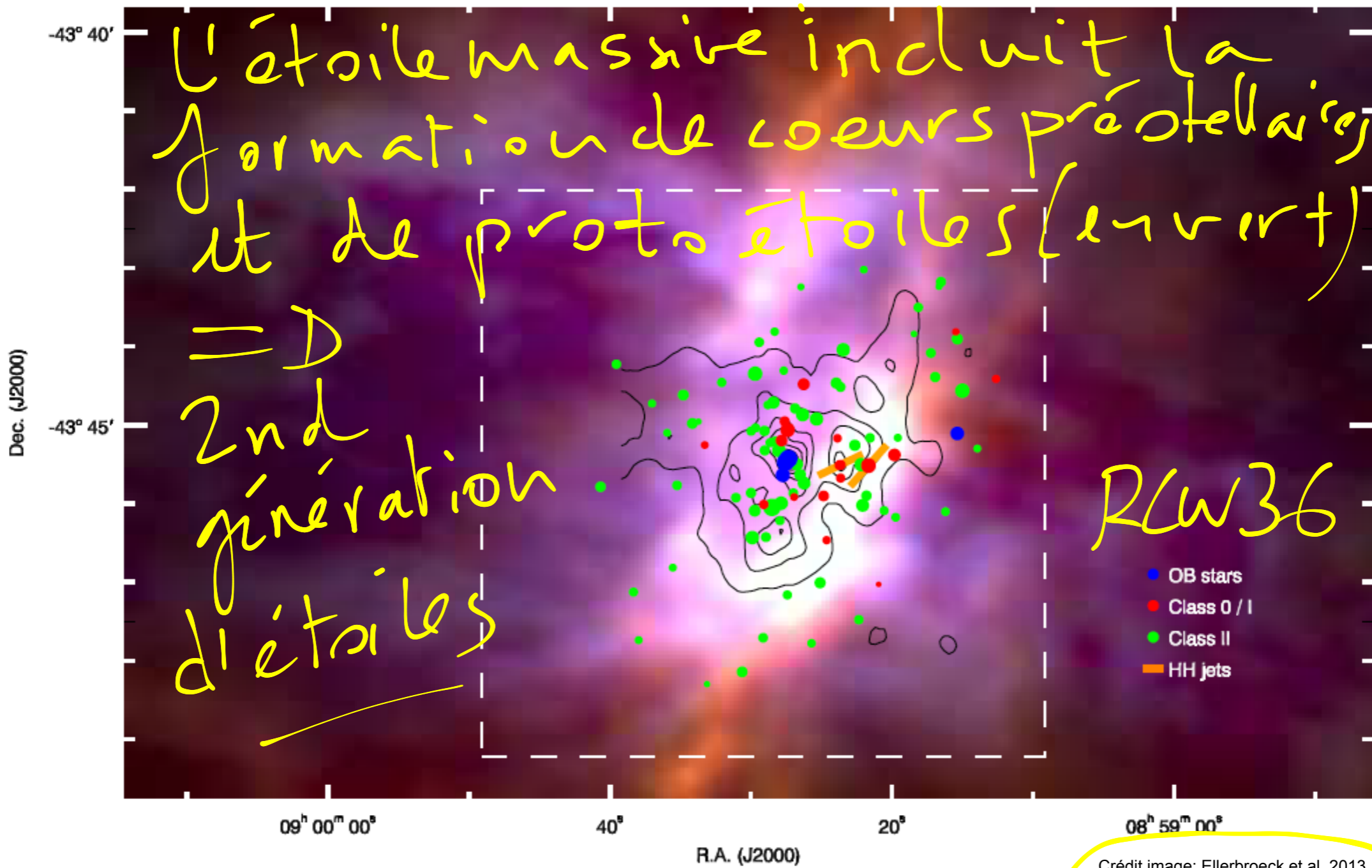
Masse max $\approx 20 M_{\odot}$



Auteur: Vincent Minier



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.D.



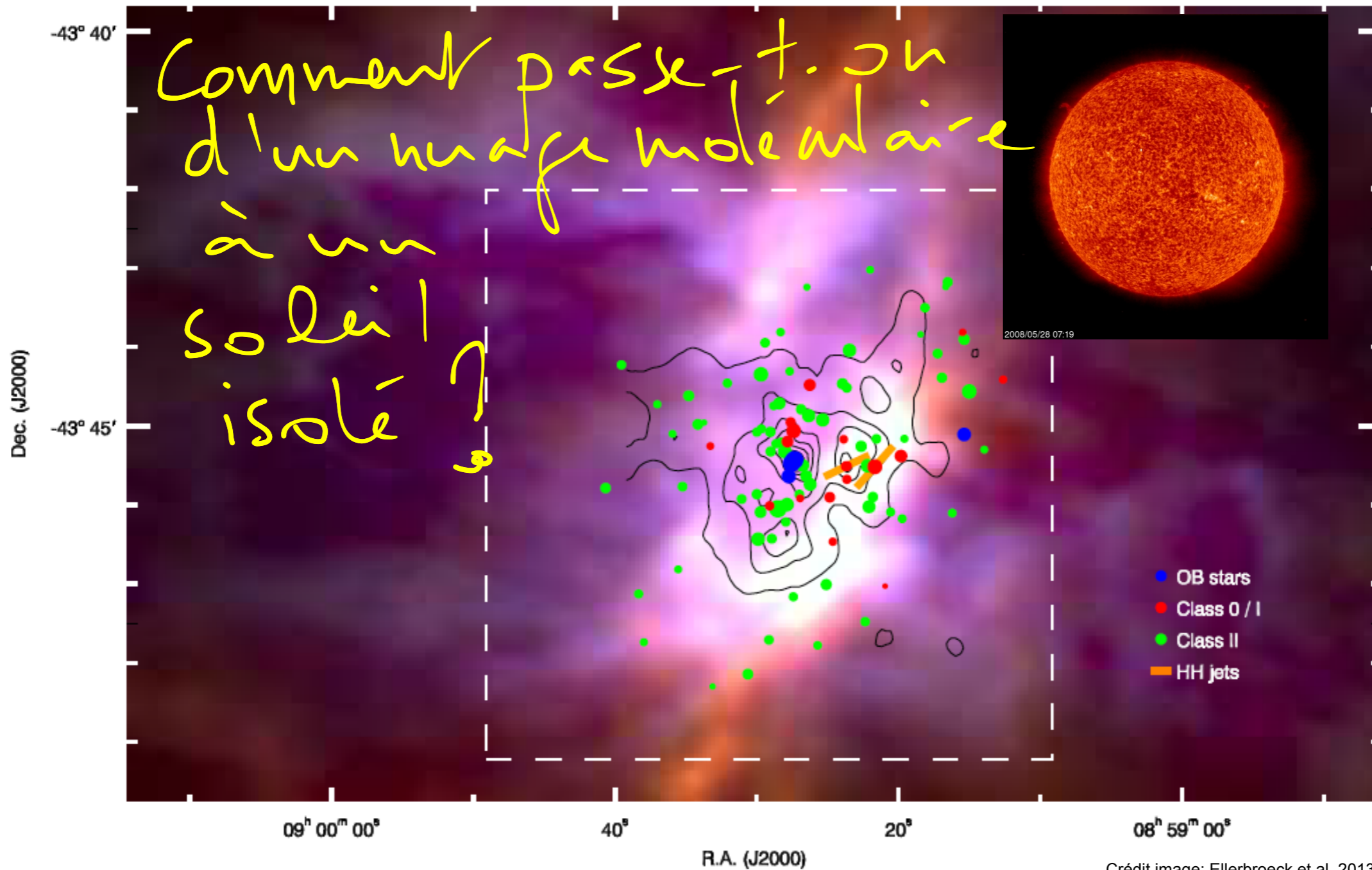
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.

Séance #2

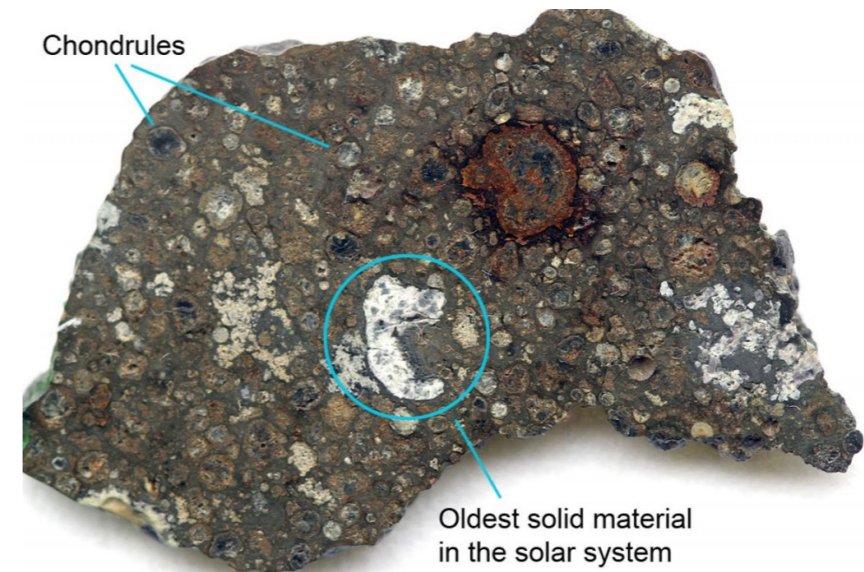
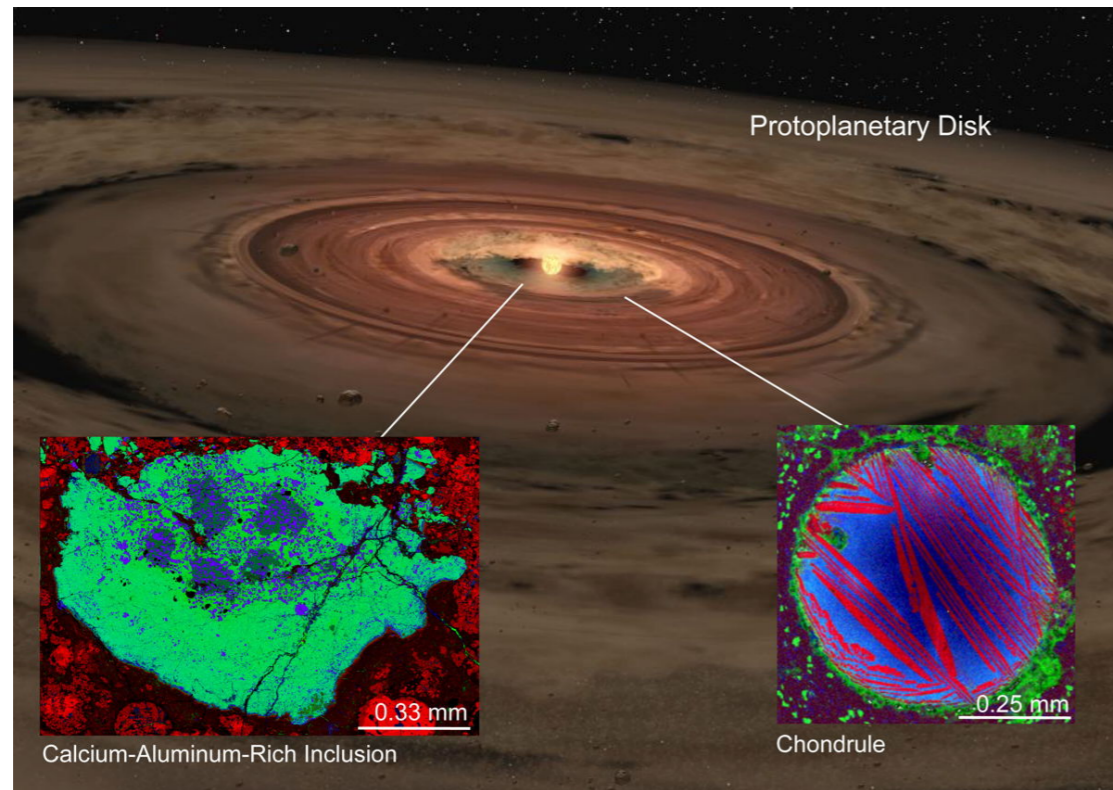
2. Le cycle de la naissance des étoiles.
 - A. Formation stellaire et filaments interstellaires.
 - B. Cœurs préstellaires, proto-étoiles et amas d'étoiles.
 - C. Fonction de masse initiale.
 - D. Formation induite des étoiles.
 - E. **Scénario pour le Soleil.**

Age du Soleil
= 4,6 Mds ans

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



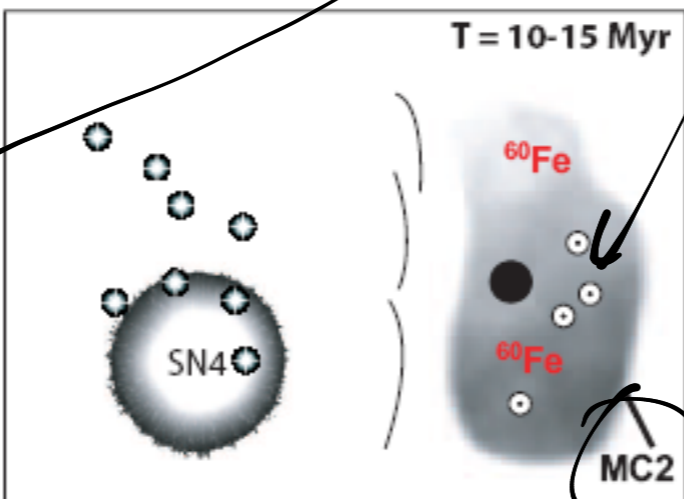
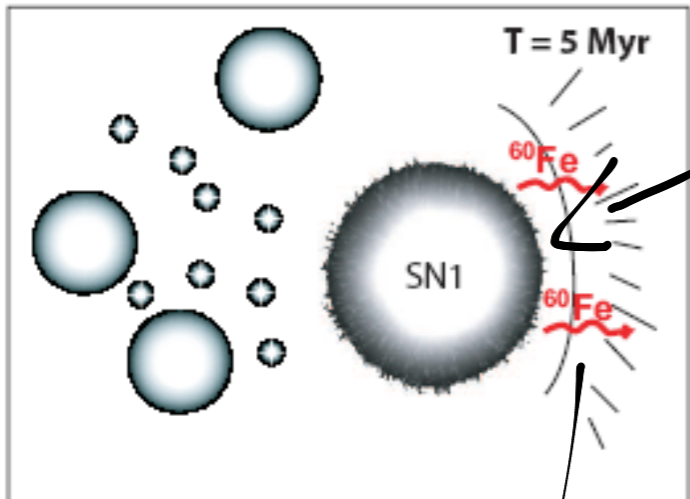
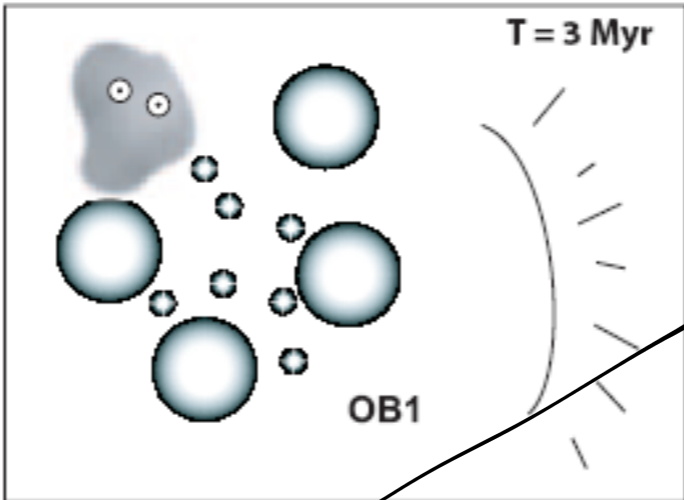
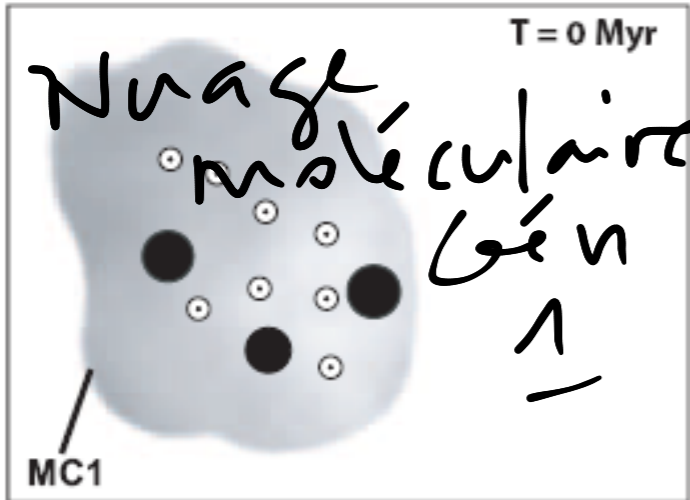
Présence de radionucléides de vie courtes, descendants du ^{60}Fe et ^{26}Al : ^{26}Mg , ^{60}Ni , ^{60}Co ...

→ Fe et Al produits par les étoiles massives

Origine du rapport d'abondance entre $^{60}\text{Fe} / ^{26}\text{Al} = 8,2 ?$

Avec les météorites, on peut remonter à la composition chimique initiale du système solaire.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



Le Soleil: 3^e génération.

1^e génération: étoiles massives → Supernova

2^e génération: étoiles massives induisent la formation de nouvelles étoiles.

3^e génération: celle de notre Soleil.

(voir Gounelle et al. 2012)

– Génération 2

● Proto high-mass star ⊙ Proto low-mass star ● Disk-free low-mass star ● Windy high-mass star

Crédit image: M. Gounelle

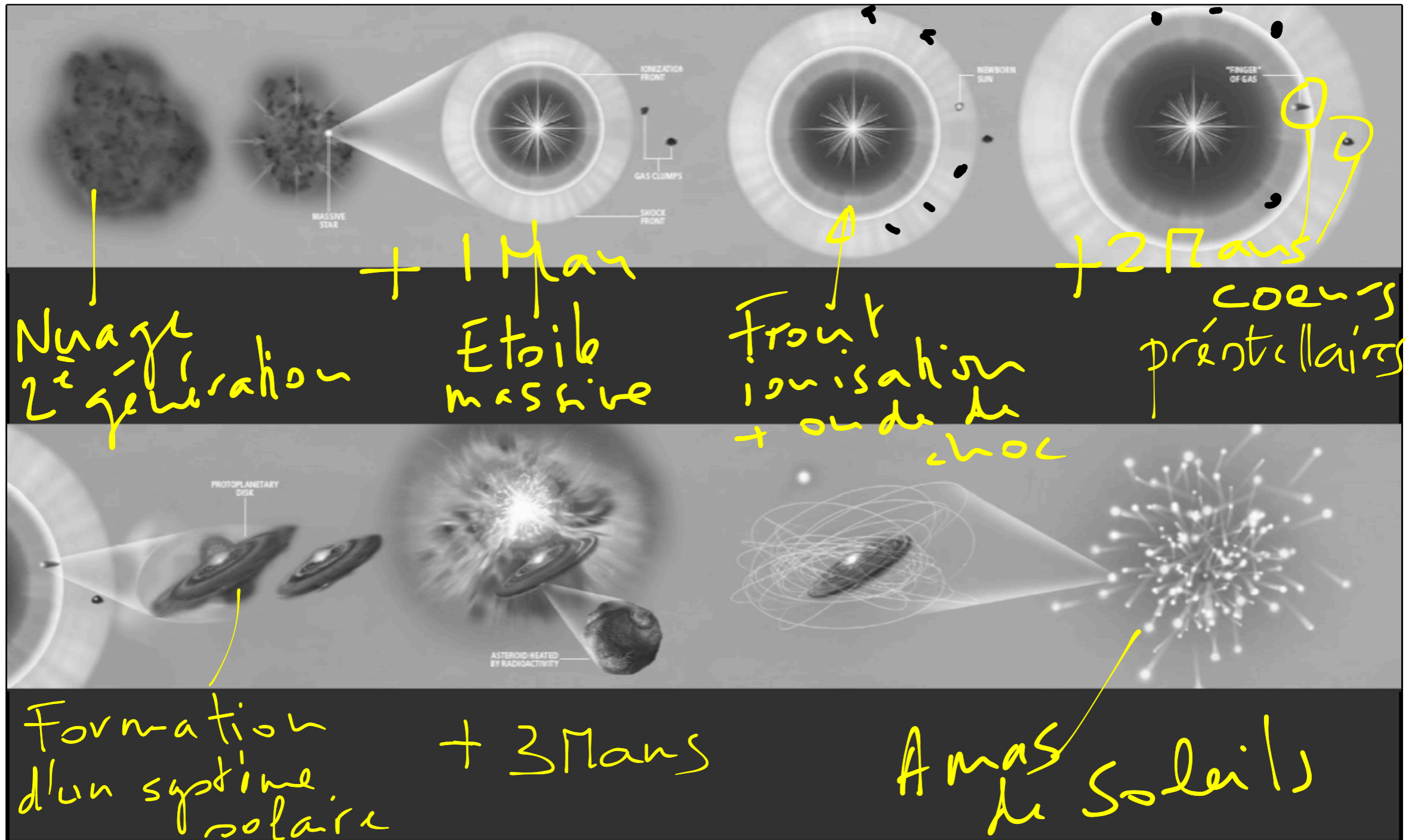
Fer relâché dans le milieu interstellaire



Auteur: Vincent Minier



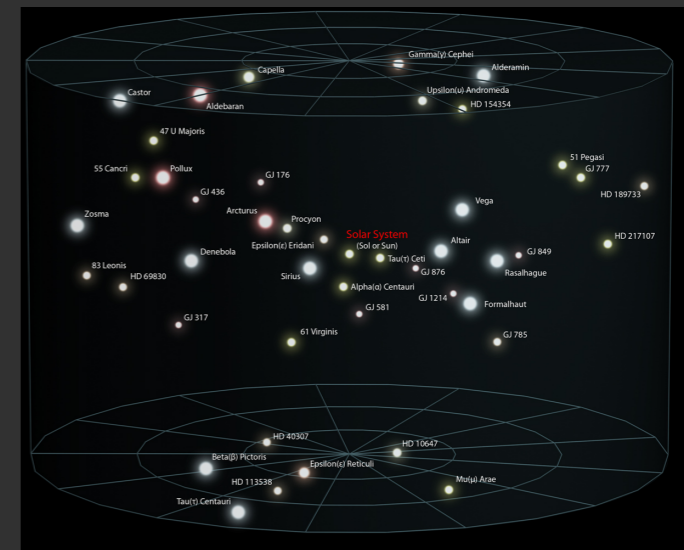
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



Dispersion de l'amas
de soleil en 4,6 Mdans
le soleil met 250 Mdans
à faire un tour galactique



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 2.E.



Crédit image: V. Minier & Novae Factory