

**BULLETIN N° 165**  
**ACADÉMIE EUROPEENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**Séance du mercredi 9 mai 2012:**  
**Conférence de Louis le Sergeant d'Hendecourt,**  
**de l'Institut d'Astrophysique Spatiale**  
**Directeur de Recherche catégorie 1 CNRS/Université Paris-Sud:**  
***"De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique "***

**Prochaine séance :**  
**mardi 12 juin à 17h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**  
**Conférence de Patrick HENNEBELLE**  
**Astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris**  
**Laboratoire de Radioastronomie, École Normale Supérieure**  
**« De la formation des étoiles à la dynamique des disques protoplanétaires »**

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**  
**FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME**

**PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**VICE PRESIDENT** : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Claude ELBAZ

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**MEMBRES CONSULTATIFS DU CA** :  
 Gilbert BELAUBRE  
 François BEGON  
 Bruno BLONDEL  
 Patrice CROSSA-REYNAUD  
 Michel GONDRAN

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES** :  
**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr Brigitte DEBUIRE

**SECTION DE NICE** :  
**PRESIDENT** : Doyen René DARS

**SECTION DE NANCY** :  
**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

Mai 2012

**N°165**

TABLE DES MATIERES

P. 03 Compte-rendu de la séance du mercredi 9 mai 2012  
 P.05 Annonces  
 P.08 Documents

**Prochaine séance:**

**mardi 12 juin à 17h30 Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**  
**Conférence de Patrick HENNEBELLE**  
**Astronome-adjoint à l'Observatoire de Paris**  
**Laboratoire de Radioastronomie, École Normale Supérieure**  
**« De la formation des étoiles à la dynamique des disques protoplanétaires »**

**ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**  
**Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.**

**Séance du**  
**Mercredi 9 mai 2012**

**Maison de l'AX 17h30.**

La séance est ouverte à 17 h30 sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos collègues Gilbert BELAUBRE, Claude ELBAZ , Françoise DUTHEIL, Jean -Pierre FRANCOISE , Robert FRANCK, Michel GONDRAN, Pierre MARCHAIS.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CARDON, Daniel COURGEAU, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Walter GONZALEZ, Irène HERPE-LITWIN, Marie-Louise LABAT, Gérard LEVY, Jacques LEVY, Saadi LAHLOU, Valérie LEFEVRE-SEGUIN , Emmanuel NUNEZ, Pierre PESQUIES, Alain STAHL.

La séance est dédiée à la Conférence de Louis le Sergeant d'Hendecourt,  
 de l'Institut d'Astrophysique Spatiale, Directeur de Recherche catégorie 1 CNRS/Université Paris-Sud:  
**"De l'astrochimie à l'astrobiologie: pour une approche méthodologique "**

Notre Président nous présente notre conférencier:

Louis le Sergeant d'Hendecourt est Directeur de Recherches au CNRS à l'Institut d'Astrophysique Spatiale à Orsay et responsable de l'équipe "Astrochimie et Origines". Il travaille à l'origine sur les problèmes de chimie interstellaire, celle des glaces et des poussières essentiellement. Il cherche à expliquer une voie de passage qui pourrait mener de l'astrochimie à la chimie prébiotique, juste avant l'apparition de la vie. Il a reçu la médaille de bronze du CNRS en 1992 pour la découverte de la molécule de CO<sub>2</sub> dans le Milieu Interstellaire et la médaille d'argent du CNRS pour le développement de l'Astrochimie en France. Il est en outre vice-président de la Société Française d'Exobiologie (SFE).

Voici le résumé de sa présentation qui pourrait s'intituler :

### ***La chimie interstellaires est-elle la chimie des origines ?***

C'est la thèse que nous défend Louis Le Sergeant d'Hendecourt en recherchant le passage de l'astrochimie à l'astrobiologie. Elle est basée sur la constatation suivante :

- Il n'existe pas de lois en biologie qui ne soient réductibles aux lois de la physique.
- Le physicien est donc le maître du jeu dans le domaine de la chimie prébiotique (approche bottom-up), un domaine que ne recouvre pas le biologiste (approche top-down).

Mais combler le fossé entre la biologie et la physique est un challenge qui n'est pas gagné d'avance. On peut proposer aujourd'hui une évolution compréhensible de l'Univers, étape par étape sur 13,78 milliards d'années :

- Origine des éléments : nucléosynthèse (big-bang, stellaire)
- Origine des molécules : la phase gaz
- Origine de la matière solide : les poussières interstellaires
- Origine de la complexité : la matière organique
- Origine de la matière prébiotique : molécules pré-biotiques
- Origine du Système solaire : la nébuleuse solaire
- Origine de la Vie : ubiquité de la vie ?

L'objet de la conférence a concerné les deux étapes : Origine de la complexité et Origine de la matière prébiotique. Un système prébiotique étant un système qui réduit son entropie et qui s'auto-réplique. C'est un sujet qui a beaucoup avancé ces dernières années sous l'influence d'un très grand nombre de nouveaux télescopes, de grands programmes internationaux et de la NASA qui a beaucoup travaillé dans l'interdisciplinarité.

On part des éléments de base pour lesquels il y a abondance cosmique. A la mort d'une étoile, il se forme des grains très petits de matériaux comme le carbone, l'oxygène et l'azote. Le mystère est dans ces poussières interstellaires. Ces grains sont recouverts en surface par de la glace.

A partir des composés existant dans le milieu interstellaire (molécules d'eau, d'ammoniac, de méthanol), on a irradié ces grains glacés en laboratoire (Une semaine d'irradiation correspond à plusieurs millions d'années dans l'espace). On a obtenu des chaînes carbonées dont le spectre est comparable avec celui des « glaces interstellaires », en particulier 26 acides aminés et 6 acides diamminés. Parmi ces derniers, un acide qui pourrait être un des constituants de l'APN, l'ancêtre de l'ADN terrestre. Il reste à déterminer les conditions initiales pour lesquelles cet acide a pu former de l'APN.

Louis Le Sergeant d'Hendecourt nous propose les conclusions suivantes :

- La vie que nous connaissons est, dans ses processus intimes, très probablement unique
- Seul le monde organique « infini » peut se plier à une évolution darwinienne
- Elle est vraisemblablement très rare (argument temporel)

Vous trouverez en page 08 les diapositives présentées par notre conférencier.

Après cet exposé, notre séance prend fin,

## Annances

I) Nos Collègues de Nice nous font part des manifestations suivantes qui se sont déroulées en mai 2012:

L'Institut Culture Science Alhazen vous convie à la prochaine rencontre DLC,  
mardi 29 mai à 18h30  
Saint-Jean d'Angély, amphi 4

### **Lorsque le monde était géométrique** *par le Pr. Pierre Couillet, physicien*

Pierre Couillet inaugure en 2012 *La Cité de la Géométrie*

Musée-livre, espace culturel et d'éveil aux sciences, il invite un large public à déambuler dans le temps  
Sur les traces des scientifiques arabes, grecs puis européens ce lieu nous montre comment la géométrie a  
permis, par l'expérience, de décrire les phénomènes naturels et ainsi de mieux comprendre le monde...

Sous l'égide de l'Université de Nice Sophia-Antipolis/ Institut Culture Science *ALHAZEN*  
dans le cadre des *Rencontres de la Connaissance* ,  
le **16 mai 2012** à 18h30 au Pôle universitaire Saint Jean d'Angély - Amphi 4 - Nice,  
**Sébastien BALIBAR a traité: ITER est-il un luxe inutile ?**

Sous l'égide de l'Université de Nice Sophia-Antipolis/ Institut Culture Science *ALHAZEN*  
dans le cadre des *Rencontres de la Connaissance* ,  
le **29 mai 2012** au Pôle universitaire Saint Jean d'Angély - Amphi 4 - Nice,  
**Pierre COULLET a traité: La géométrie décrit le monde**

II) notre Collègue Christian HERVE nous fait part de la prochaine rencontre d'Hippocrate :

## **Une Philosophie après le MEDIATOR?**

Lundi 11 juin 2012 à 18h  
Faculté de Médecine Paris Descartes  
Amphi Richet 2ème étage  
15 rue de l'Ecole de Médecine  
Métro Odéon

Une Conférence présidée par Philippe EVEN, Président de l'Institut Necker, doyen honoraire de la Faculté de Médecine Necker-Enfants malades, avec la participation de :

- Pr Claire LE JEUNNE chef de service du service de médecine interne de l'Hôtel-Dieu, Vice Doyenne de la Faculté de Médecine Paris Descartes
- Pr François HAAST, chef de pharmacie Toxicologie de l'Hôtel-Dieu,
- Pr Jean-François GIRARD, Président du PRES Sorbonne-Paris Cité , ancien Directeur général de la Santé
- Pr Philippe MARANINCHI, Directeur général de l'Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des Produits de Santé ANSM

Contact:

Pr Christian HERVE - [christian.herve@parisdescartes.fr](mailto:christian.herve@parisdescartes.fr)

Benjamin AUGEREAU - [benjamin.augereau@parisdescartes.fr](mailto:benjamin.augereau@parisdescartes.fr)

## Documents

Pour illustrer la communication de Louis le Sergeant d'Hendecourt, nous vous proposons un extrait des diapositives:

P.08:Chimie Interstellaire, chimie des origines? par Louis Le Sergeant d'Hendecourt, aux éditions du CNRS

Pour préparer la conférence de Patrick Hunebelle nous vous proposons :

p. 28 "Etoiles, une naissance obscure " par Erik YOUNG extrait de pour la science n°401 -avril 2011 -.

p. 36 ""Etoiles et disques protoplanétaires , compagnons de naissance" par Philippe BERTOUT extrait de la revue pour la science de juillet -septembre 2009 consacrée aux exoplanètes

p. 41 Pour résumer une image de la formation des étoiles issue de pour la science



# Chimie Interstellaire

## Chimie des origines?

Louis Le Sergeant d'Hendecourt

« Astrochimie et Origines »  
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay, France



## De l'astrochimie à l'astrobiologie?

### PREAMBULE

Il n'existe pas de lois en biologie qui ne soient réductibles aux lois de la physique c'est-à-dire aux quatre interactions (anciennement forces) décrivant tout système physique.

En conséquence, tout ce qui peut être dit sur la question de l'origine de la vie doit et peut être dit.

Le physicien est le maître du jeu dans le domaine de la chimie prébiotique (approche bottom-up), un domaine que ne recouvre pas le biologiste (approche top-down). Le recouvrement de leurs compétences n'est pas gagné d'avance.

## L'Univers: une évolution compréhensible, étape par étape

**Origine des éléments: nucléosynthèse (big-bang, stellaire)**

**Origine des molécules: la phase gaz**

**Origine de la matière solide: les poussières interstellaires**

**Origine de la complexité: la matière organique**

**Origine de la matière prébiotique: molécules pré-biotiques**

**Origine du Système Solaire: la nébuleuse solaire**

**Origine de la Vie: ubiquité de la vie ?**



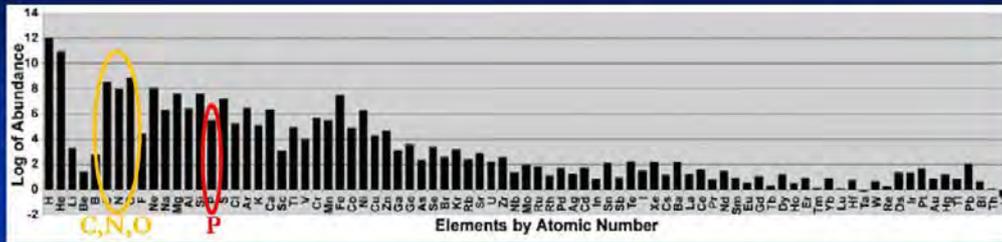
« 0 »

Temps

13,78 Md années



## Les abondances « cosmiques » : le matériau de base



H, He - 100, 10 - pas condensables - gaz interstellaire -  $H_2$ , He - étoiles  
physique du gaz (P, T,  $n_H$ )

O, C, N - 1 - partiellement condensables -  $H_2O/CH_4/NH_3/CO/C$  - gaz/grains/glaces  
chimie organique (composition)

Si, Mg, Fe - 0.1 - condensables - silicates (roches), grains interstellaires  
chimie minérale (catalyse)

Autres - 0.01 - condensables - grains  
cosmochimie (isotopes, nucléosynthèse)

## Formation d'une étoile: effondrement gravitationnel

$$PV = kT$$

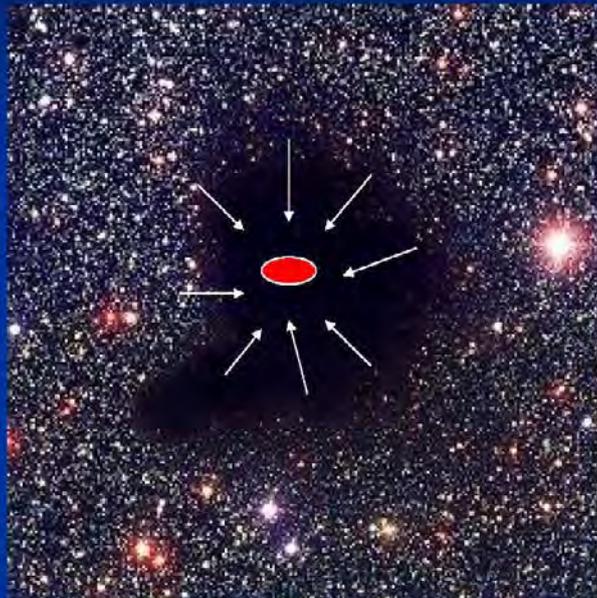
$$V_i \sim AL^3$$

$$T_i \sim 10 \text{ K}$$

Compression  
gravitationnelle

$$V_f \sim 32 \text{ sL}^3 \text{ !!!}$$

$$T_f \sim 10^{7/8} \text{ K}$$



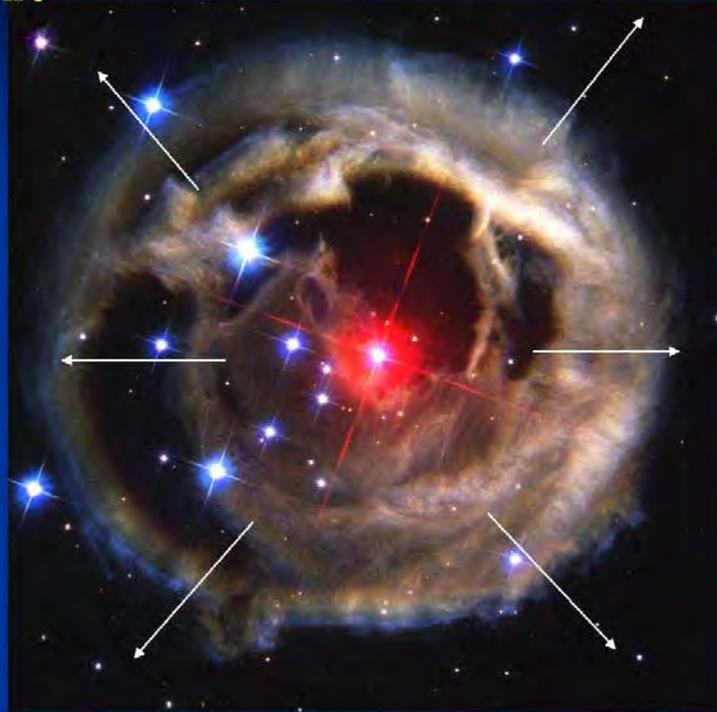
Reactions nucléaires



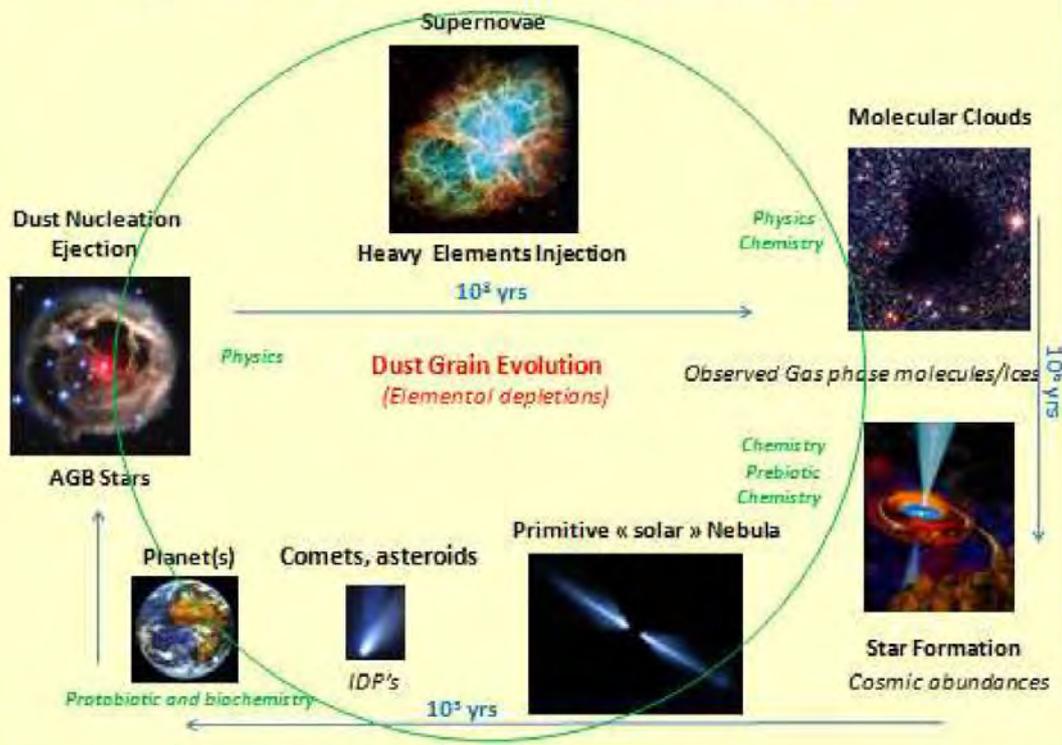
## La mort d'une étoile: 2) la géante rouge et la phase AGB, nébuleuse planétaire

Formation de grains

- Silicates  $O/C > 1$
- SiC et carbone  $O/C < 1$



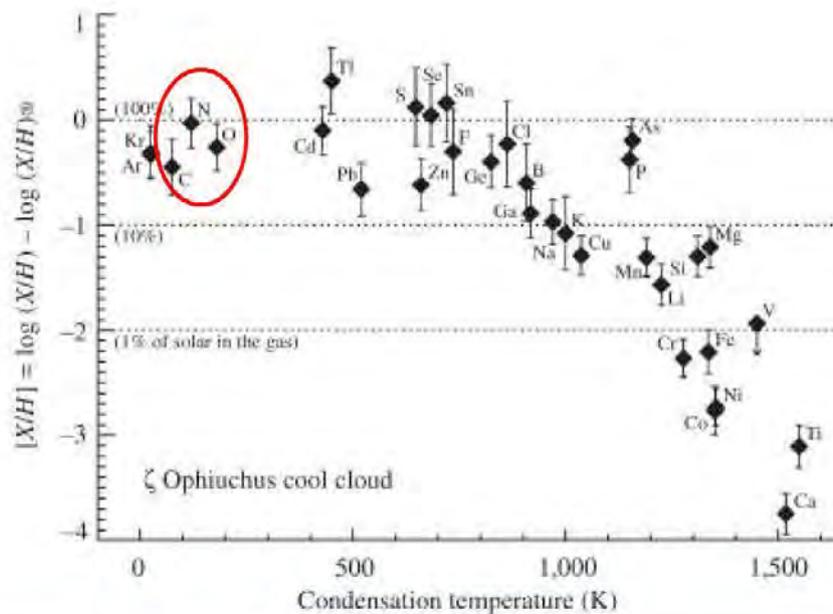
## THE CYCLE OF SOLID STATE MATTER IN THE GALAXY



## La matière « solide » dans une galaxie: poussières interstellaires

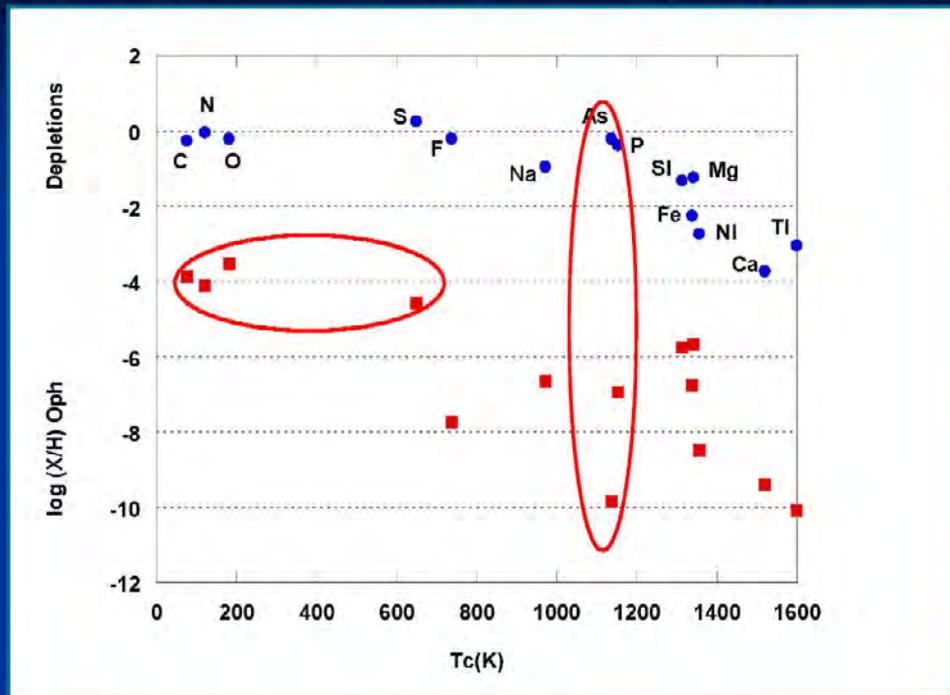


Cliché: Hubble ST/NASA

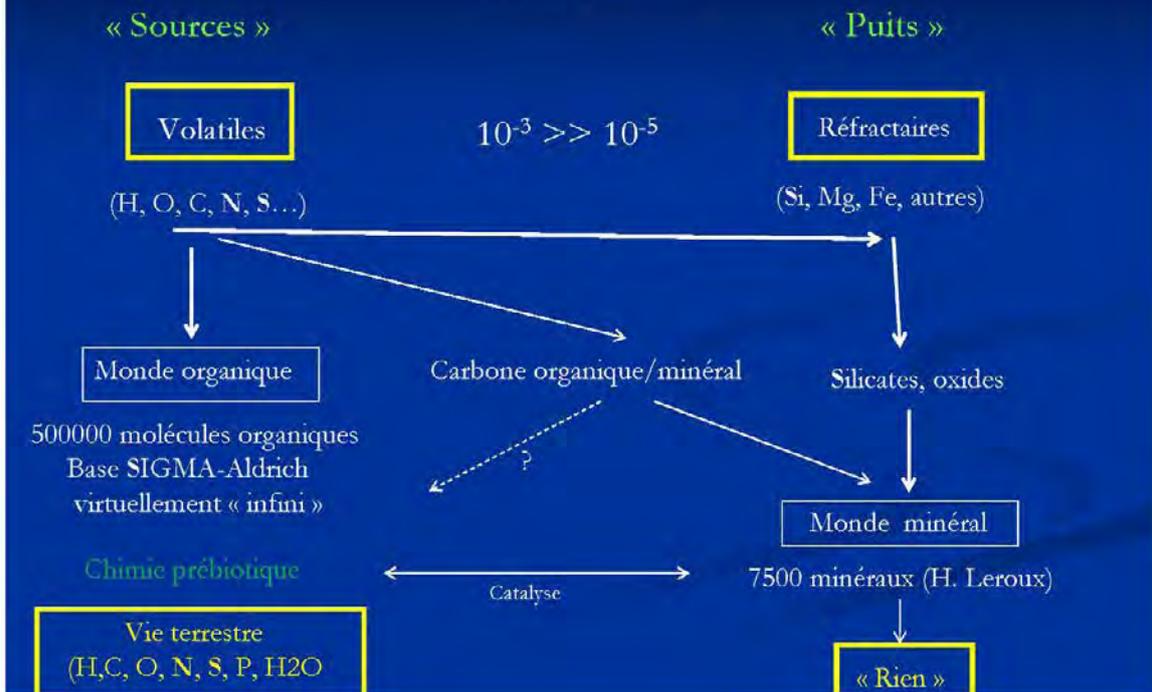


Note: les abondances élémentaires des grains sont faciles à connaître. Mais les compositions moléculaires/minérales...

**H, N, C, O, S, P in DNA (not As!) éléments les plus disponibles!**



**Abondances cosmiques, propriétés physiques – chimiques et complexité**



## Molécules détectées dans le MIS

2 atomes	3 atomes	4 atomes	5 atomes	6 atomes	7 atomes	8 atomes	9 atomes	10 à 13 atomes
H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>2</sub> CHOH	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO
CO	H <sub>2</sub> S	H <sub>2</sub> CO	SiH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> SH	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH
CSi	HCN	H <sub>2</sub> CS	CH <sub>2</sub> NH	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	HCOCH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> OHCHO	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO
CP	HNC	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	NH <sub>2</sub> CN	H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> CCH	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N
CS	CO <sub>2</sub>	HNCO	CH <sub>2</sub> CO	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> COOH	HC <sub>2</sub> N	HC <sub>3</sub> N
NO	SO <sub>2</sub>	HNCS	HCOOH	CH <sub>3</sub> NC	CH <sub>2</sub> CHCN	CH <sub>2</sub> CHCHO	C <sub>3</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H
NS	MgCN	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	HC <sub>2</sub> N	NH <sub>2</sub> CHO	HC <sub>3</sub> N	CH <sub>2</sub> CCHCN	C <sub>6</sub> H <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> OCHO
SO	MgNC	SiC <sub>3</sub>	HC <sub>2</sub> NC	HC <sub>3</sub> CHO	C <sub>7</sub> H	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>
HCl	NaCN	C <sub>2</sub> S	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	C <sub>6</sub> H <sup>-</sup>	NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN
NaCl	N <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> CN	l-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	HC <sub>2</sub> N				HC <sub>11</sub> N
KCl	NH <sub>2</sub>	c-C <sub>3</sub> H	CH <sub>2</sub> CN	C <sub>3</sub> N				
AlCl	OCS	l-C <sub>3</sub> H	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>	C <sub>3</sub> H				
AlF	CH <sub>2</sub>	HCCN	C <sub>4</sub> Si	H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>				
PN	HCO	CH <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub> N <sup>-</sup>				
SiN	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> CN	HNC <sub>3</sub>	c-H <sub>2</sub> C <sub>3</sub> O				
SiO	C <sub>2</sub> H	C <sub>3</sub> O	C <sub>4</sub> H					
SiS	C <sub>2</sub> O	HCNH <sup>+</sup>	C <sub>4</sub> H					
NH	C <sub>2</sub> S	HOOC <sup>+</sup>	CNCHO					
OH	AlNC	C <sub>3</sub> N <sup>-</sup>						
C <sub>2</sub>	HNO	HCNO						
CN	SiCN	HSCN						
III <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> II <sup>+</sup>							
FeO	SiNC							
LiII	c-SiC <sub>2</sub>							
CH	HCO <sup>+</sup>							
CH <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>							
CO <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>							
SO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>							
SH	OCN <sup>-</sup>							
O <sub>2</sub>	HCP							
N <sub>2</sub>	CCP							
CF <sup>+</sup>								
PO								
AlO								

### Accès à P, T, n<sub>b</sub>, n<sub>d</sub>, CR, hv

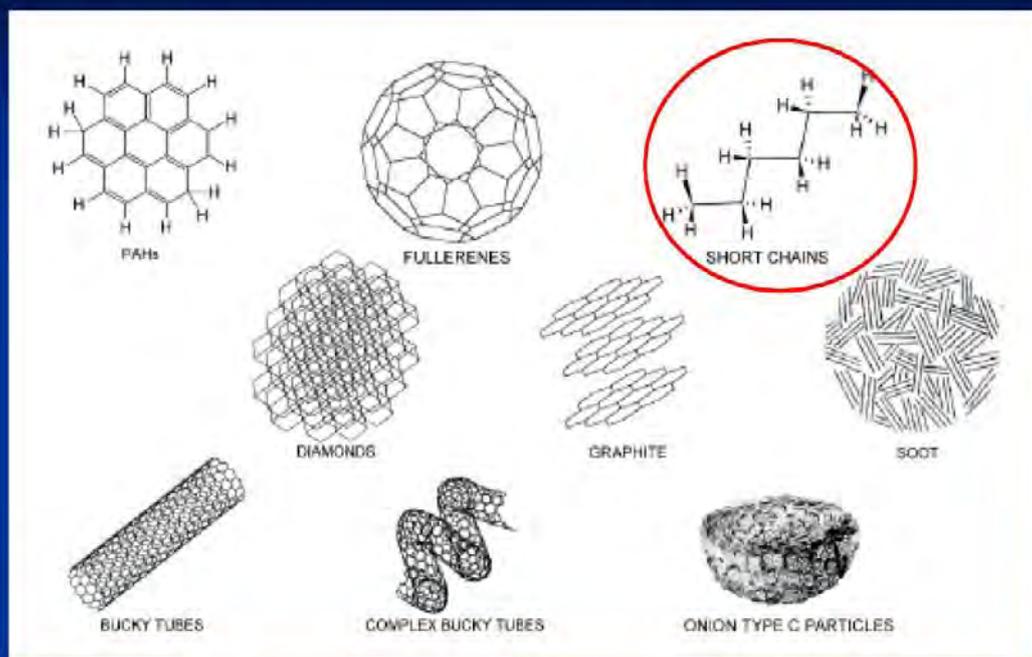
Beaucoup de paramètres

Physiques et processus:

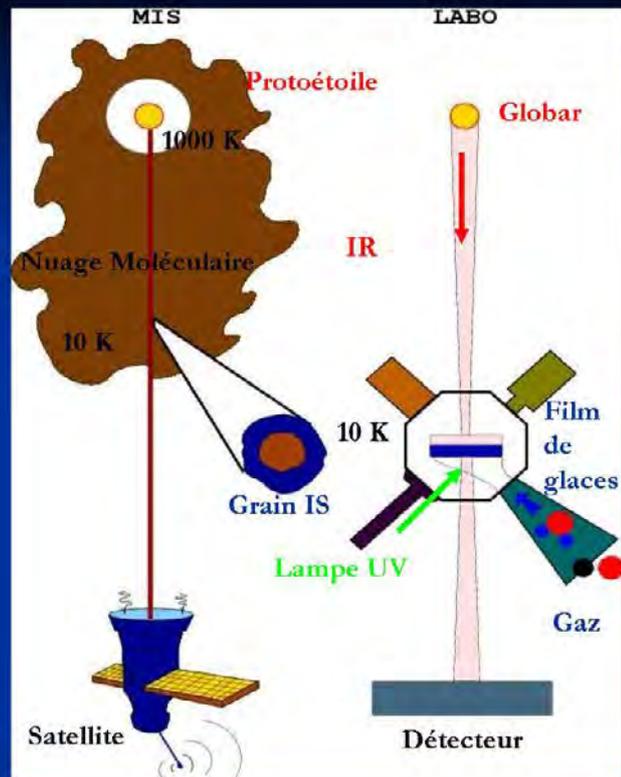
- turbulence
- effondrement
- formation stellaire
- disks formation de disques
- formation de planètes

### Chimie organique

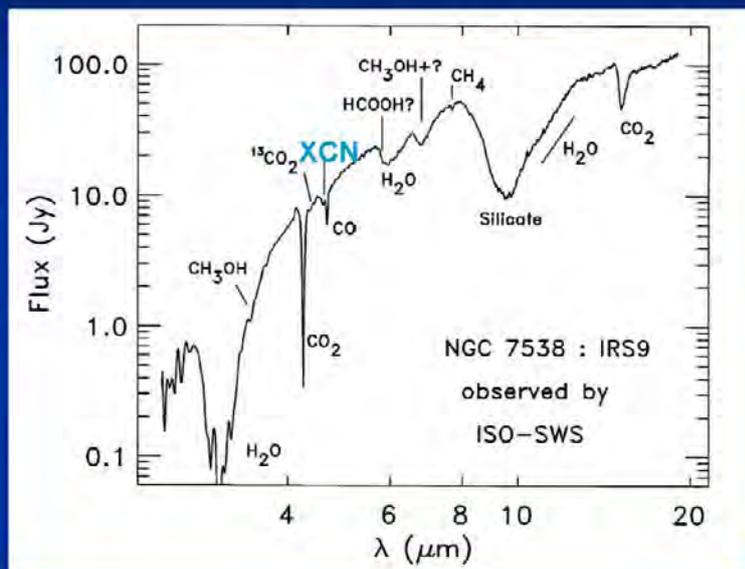
## Les différentes formes moléculaires du carbone



Simulations en laboratoire:  
comparaison directe entre  
les spectres astronomiques  
et ceux obtenus en  
laboratoire

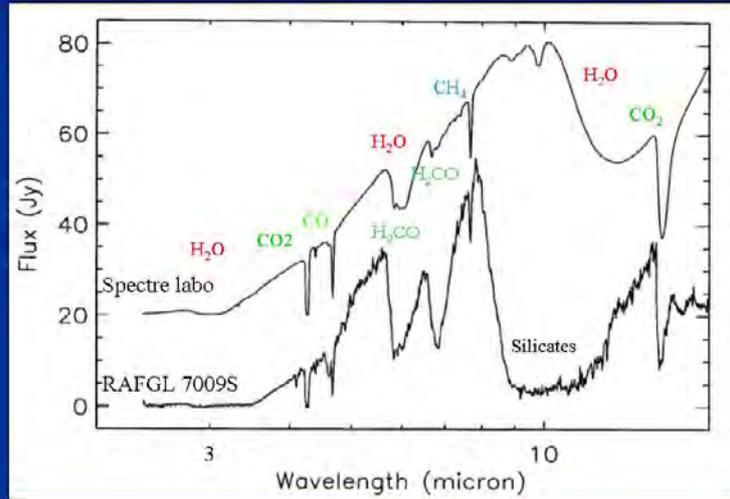


Spectre d'Absorption de la Glace et des Silicates  
(NGC 7538 IRS9) observé par ISO \*

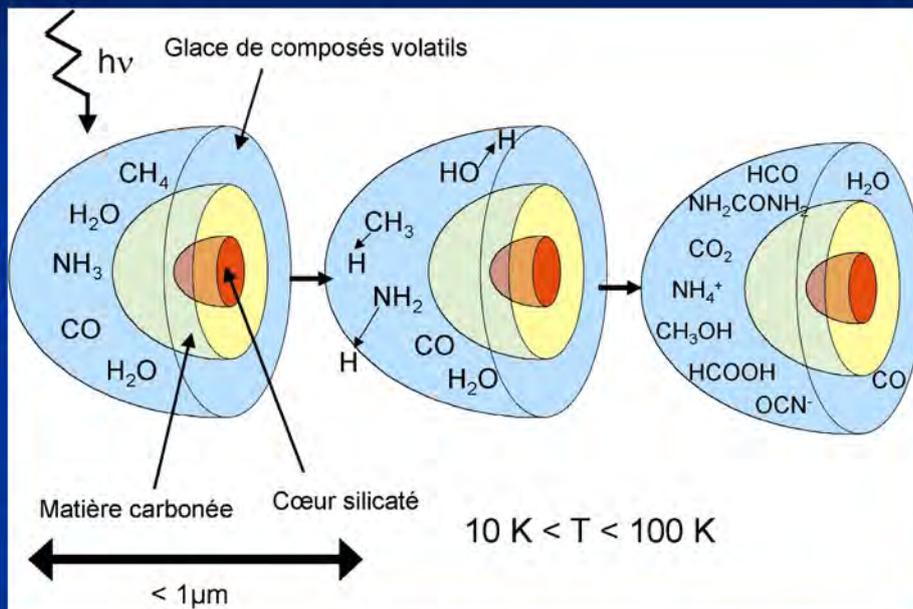


## Une vue « simple d'une simulation en laboratoire »

Un film de glaces « sales » H<sub>2</sub>O/CO/CH<sub>4</sub>/NH<sub>3</sub> at 10 K + photolyse UV

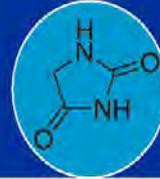
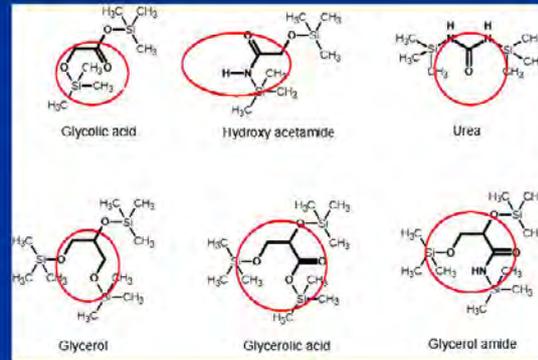


## Évolution des Glaces Interstellaires



## Détection d'urée, d'acide glycolique et de glycerol dans un résidu organique de glace interstellaire ou « pré-cométaire »

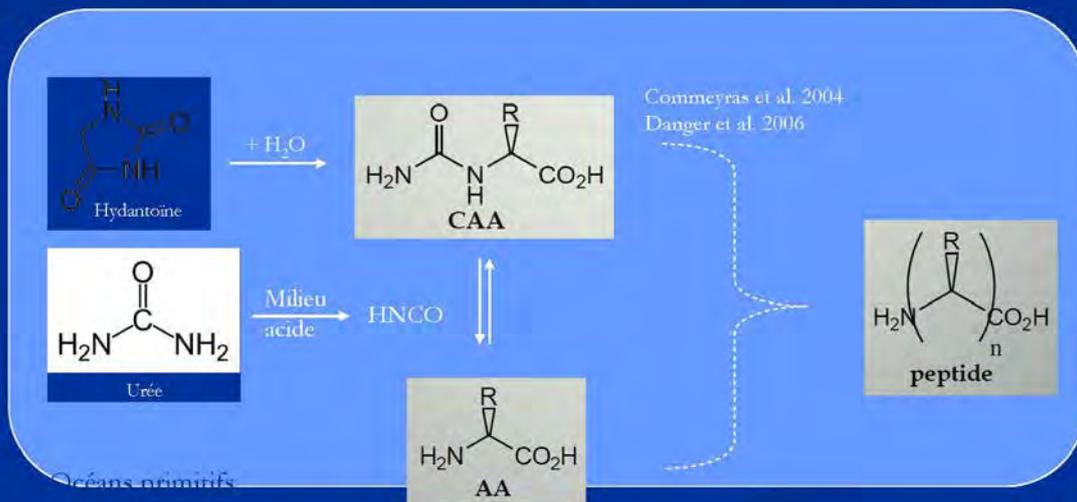
Résidu extrait ( $H_2O$ ) mais non hydrolysé  
(dérivatisation et GC-MS)



(Nuevo et al, 2010)  
↓  
hydantoïne ( $C_3H_4N_2O_2$ )

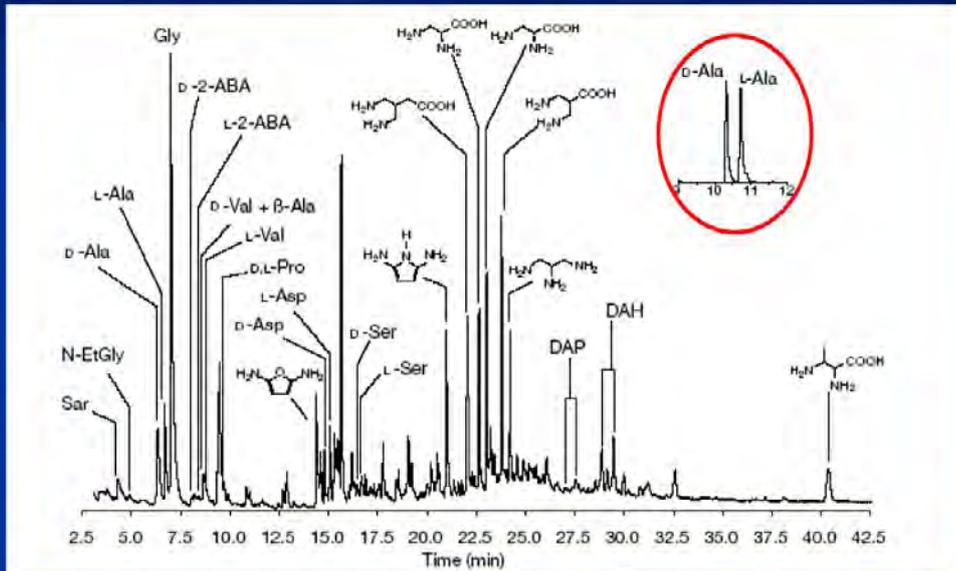
## Intérêt prébiotique ?

- Intermédiaire dans la formation de poly- et oligopeptides à travers le schéma menant aux acides  $\alpha$ -aminés (AA) et aux acides aminés N-carbamoylés (CAA).

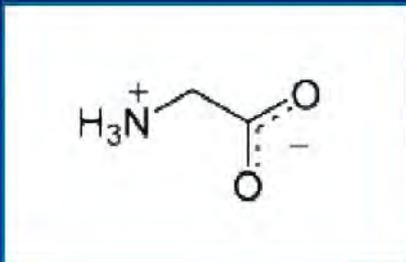


- Les hydantoïnes détectées dans des météorites (Zöpper & Cronin 1995 ; Shimoyama & Ogasawara 2002)

**Evolution vers le résidu organique: détection de nombreux acides aminés: généralisation de l'expérience Urey-Miller (1953)**

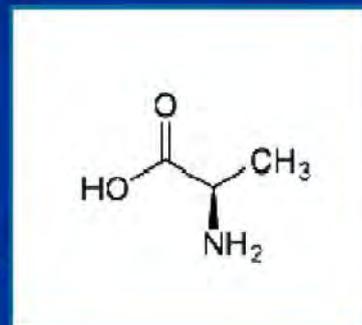


**Exemples d'acides aminés dits « protinaceus »**

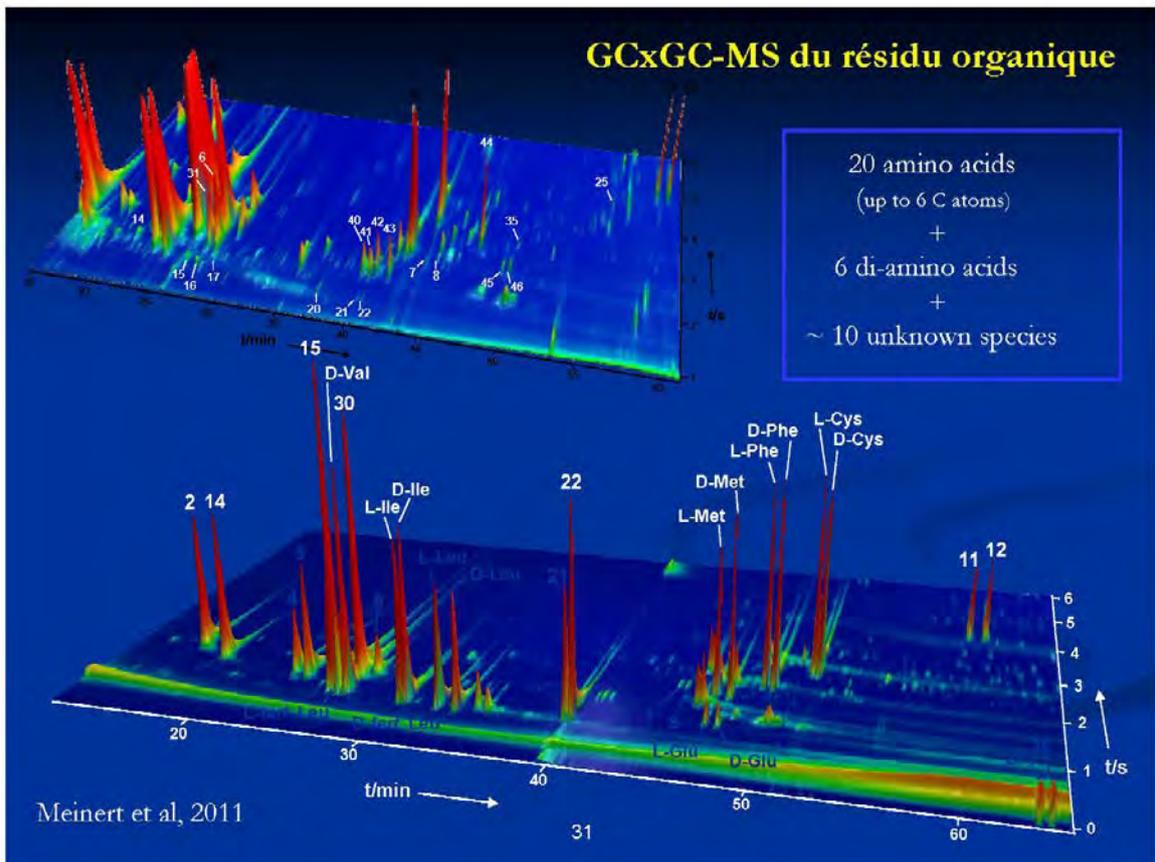


Glycine

Alanine



**Protéine = chaîne d'acides aminés**



### Remarkable detected amino acids

N-(2-aminoethyl)glycine and 2,4-diaminobutyric acid

### Spéculation !

Monde PNA

Acides polynucléiques  
Réplication autocatalytique,  
hétérotrophique

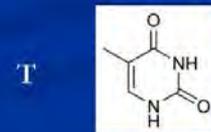
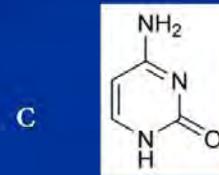
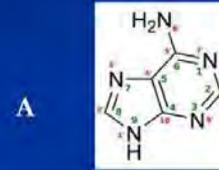
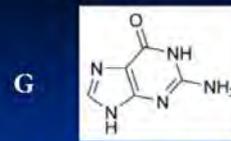
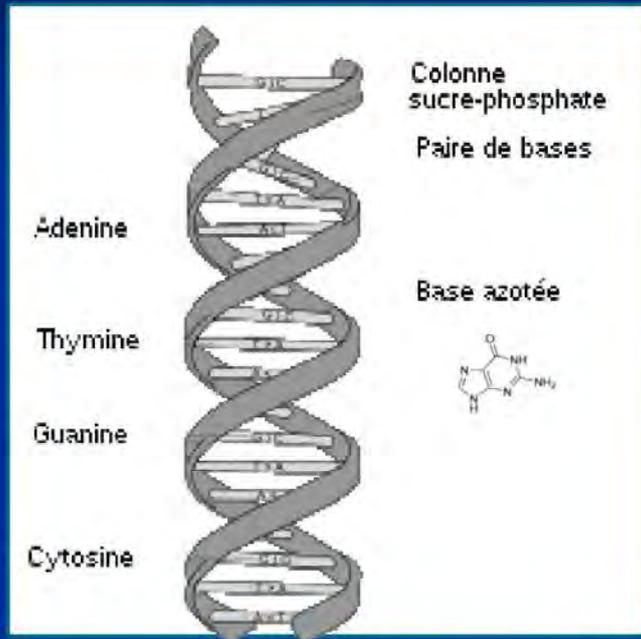
Vie minimale (physicien<sup>32</sup>)

Monde ARN  
Code génétique

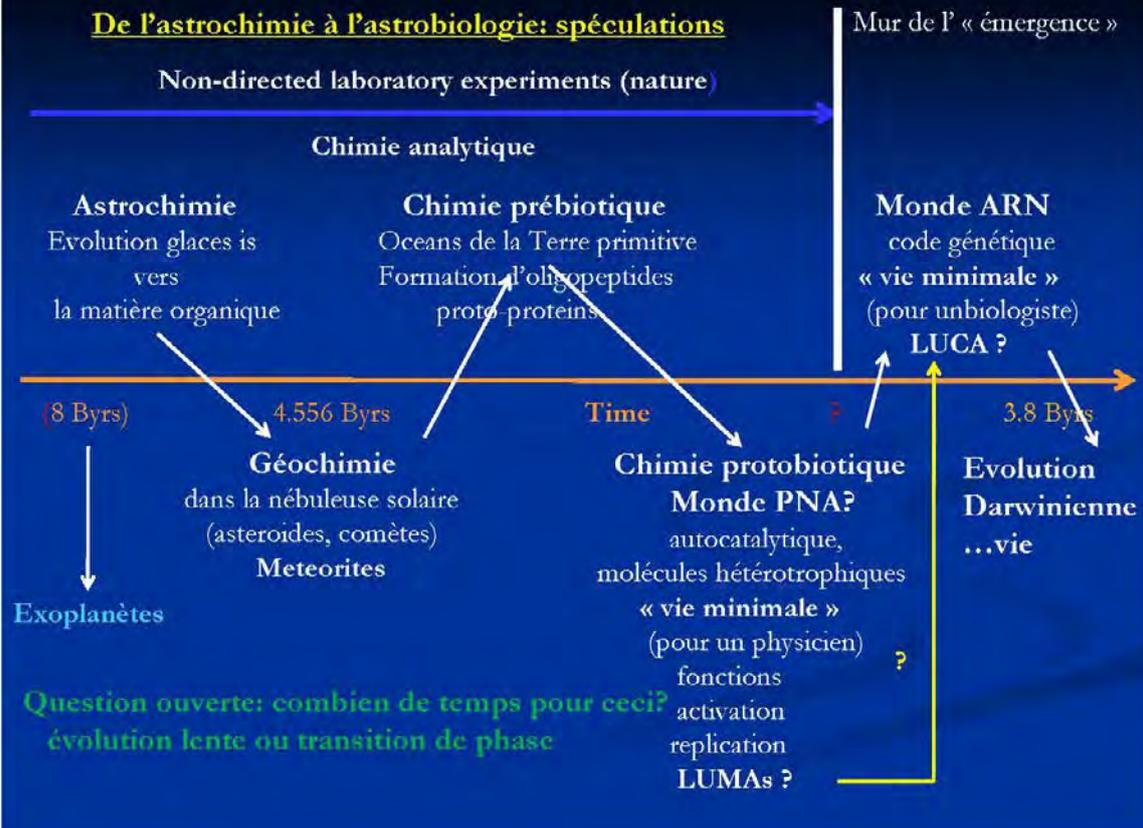
ADN

Evolution darwinienne  
Vie (biologiste)

## Structure de l'ADN

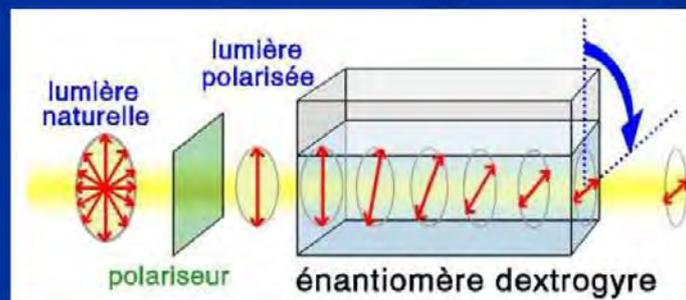


## De l'astrochimie à l'astrobiologie: spéculations



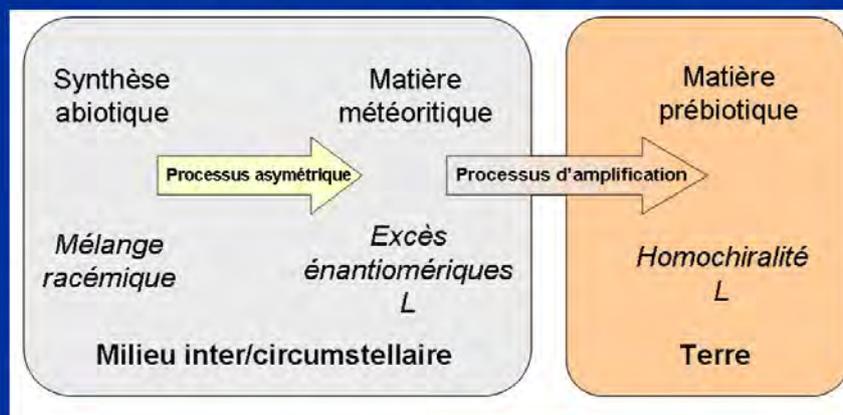
## L'interaction lumière/molécules chirales

- 1837: Charles Biot: le pouvoir rotatoire des molécules chirales
- 1848 Louis Pasteur: les molécules du « vivant » sont toutes lévogyres  
propriété fondamentale des molécules du vivant, liées à l'origine de la vie?
- 1897 Principe de Curie: « Transfert de l'asymétrie chirale de la lumière CPL vers des molécules chirales
- 1953 Expérience de Stanley Miller: acides aminés racémiques Terre primitive

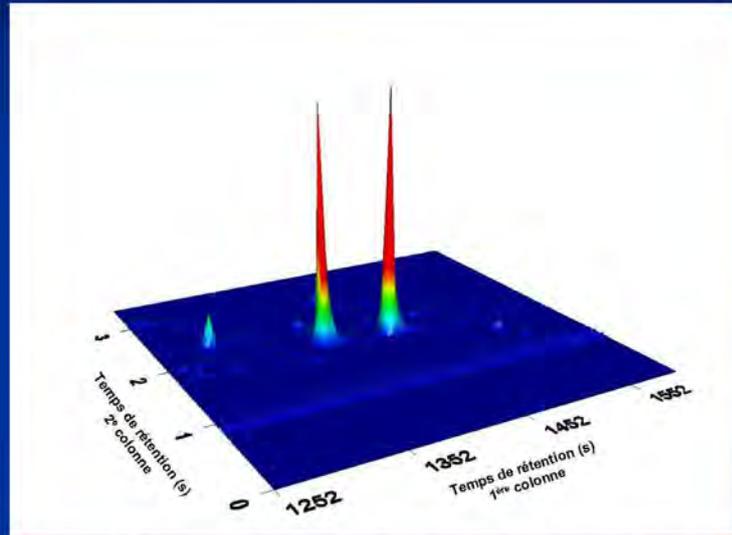
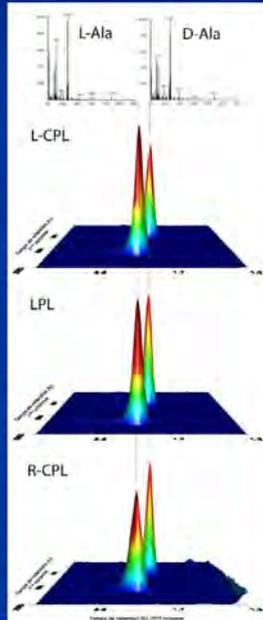


## Excès énantiomériques et homochiralité

- Mélange racémique :  $L = D$
- Excès énantiomérique :  $L \neq D \rightarrow ee_L(\%) = \frac{L - D}{L + D} \times 100$
- Molécules du vivant : homochiralité (acides aminés L, sucres D)  
→ Origine ? Théories biotiques ou abiotiques, aléatoires ou déterministes

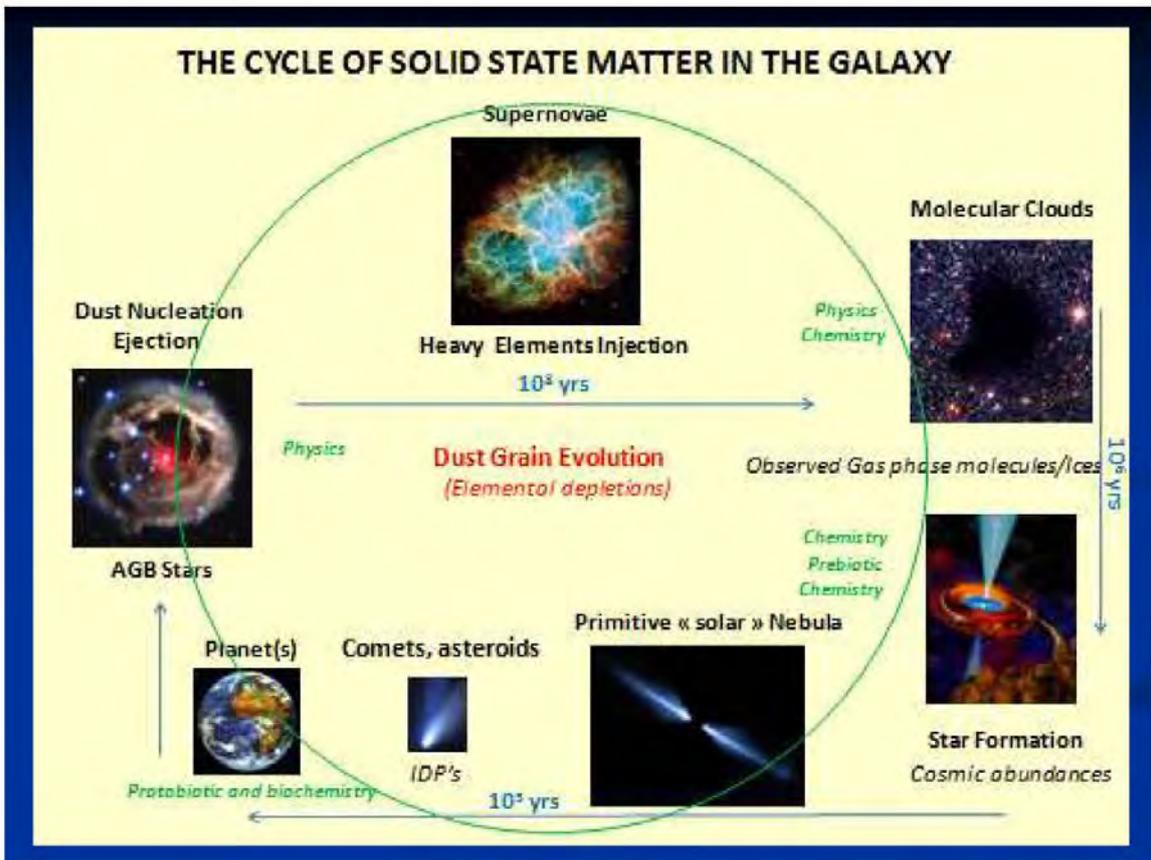


## Excès énantiomériques mesurés pour l'alanine ( $^{13}\text{C}$ )



Polarisation UV	$N_{\text{phot}} \cdot \text{molec}^{-1}$	e.e. <sub>L</sub> (%)	Barres d'erreur à $3\sigma$ (%)
R-CPL	~ 5	- 1.34	0.40
LPL	~ 2.5	- 0.04	0.42
L-CPL	~ 2.5	+ 0.71	0.30

## THE CYCLE OF SOLID STATE MATTER IN THE GALAXY



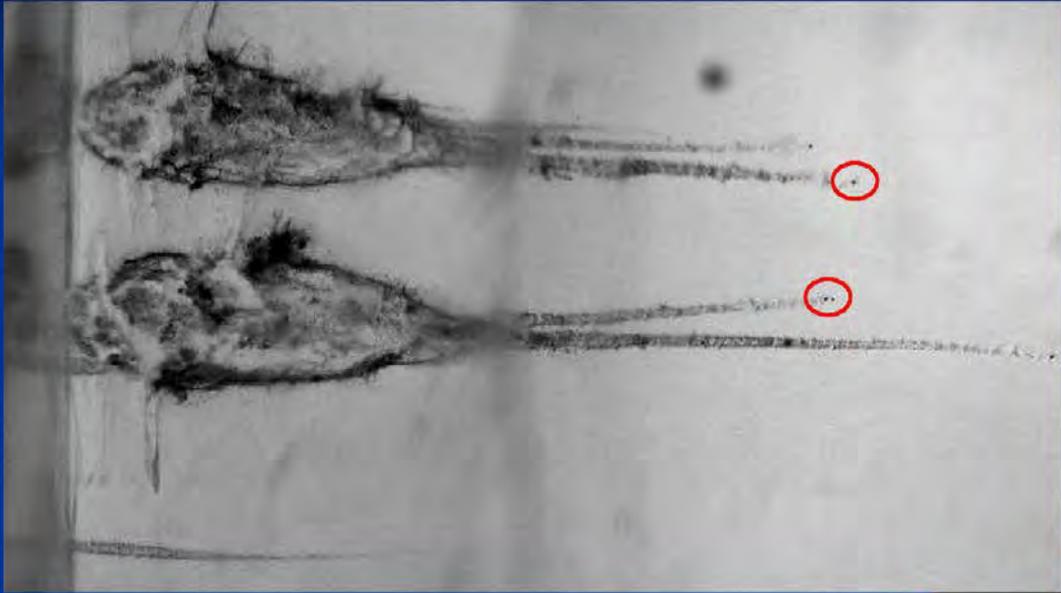


## Une nébuleuse « primitive » en évolution ?

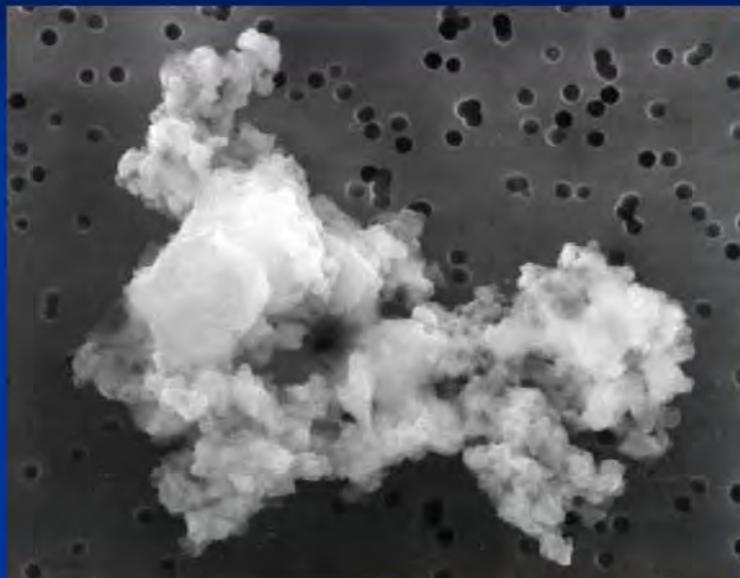


Cliché Hubble-ST, NASA

Particules terminales: silicates (minéraux) + carbone



Une poussière interplanétaire (~10 micromètres)



## Origine et ubiquité de la vie ?

Matériau prébiotique universel? Oui  
Eau Oui mais sous quelle forme?  
Planètes extrasolaires Oui

### Mais...

Conditions initiales « très » précises ?  
Divergence des scénarios planétaires Venus, la Terre Mars – Multiplicité des mondes?  
Lois de la complexité?

### Paradoxe de Fermi: mythe ou réalité

La Terre



Venus

Des évolutions planétaires très différentes...



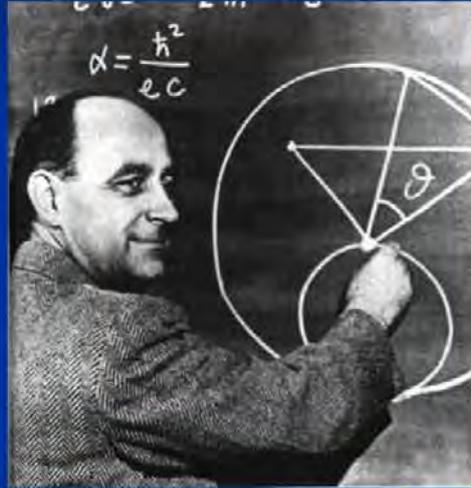
Mars



**Détection d'exoplanètes: des milliards de mondes**



## Le paradoxe de Fermi: une intuition géniale?



Enrico Fermi

Si l'on n'a pas vu de ET...c'est qu'ils n'existent pas... (argument temporel)

## Conclusions personnelles

- 1) La vie que nous connaissons, est, dans ses processus intimes, très probablement unique
- 2) Seul le monde organique « infini » peut se plier à une évolution darwinienne
- 3) Elle est vraisemblablement très rare (argument temporel)
- 2) Si il n'y a pas de « Loi » en biologie, peut-être peut on employer un axiome: la vie n'obéit pas au Principe de Copernic...
- 4) La dernière affirmation est une provocation

Astronomie

# *Étoiles :* une naissance obscure

**UNE RÉGION DE FORMATION STELLAIRE**  
intense près du noyau de la galaxie M83, observée par le télescope spatial *Hubble*. Les théories classiques ne rendent pas compte de façon satisfaisante de l'émergence des étoiles bleues massives, ni de la façon dont elles restituent de l'énergie aux nuages de gaz à partir desquels elles se forment.

**Les étoiles naissent de l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussière. Mais si les grandes lignes de ce scénario sont connues, plusieurs questions restent ouvertes.**

**Erick Young**

**S**'il y a bien un scénario solidement établi en astronomie, c'est comment se forment les étoiles. L'idée générale a été proposée par Emmanuel Kant et Pierre-Simon Laplace, au XVIII<sup>e</sup> siècle. La source de leur luminosité et leur évolution ont été élucidées par les physiciens de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, les principes qui gouvernent la vie des étoiles sont enseignés au collège, et ce sont les objets exotiques tels que la matière noire ou l'énergie sombre qui attirent la curiosité du public. La formation des étoiles serait donc une question réglée. C'est pourtant loin d'être le cas. La naissance des étoiles reste un des sujets les plus brûlants de l'astronomie contemporaine.

Pour simplifier, le processus se résume à la victoire de la gravité sur la pression. Cela commence par un énorme nuage de gaz et de poussière flottant dans l'espace interstellaire. Si le nuage – ou plus exactement, une petite région dense, nommée cœur – est suffisamment froid et dense, sa propre gravité l'emporte sur la pression du gaz, et il commence à s'effondrer sous son propre poids. Le cœur devient de plus en plus dense et chaud, jusqu'à ce que la fusion nucléaire s'amorce en son sein. La chaleur dégagée par la fusion augmente la pression à l'intérieur de l'objet ; laquelle s'oppose à l'effondrement. La nouvelle étoile s'installe dans un équilibre dynamique qui peut durer des millions à des milliards d'années.

Ce scénario est cohérent et concorde avec un corpus d'observations toujours plus fourni. Mais il est loin d'être complet. Si l'on y regarde de plus près, chaque phrase du paragraphe précédent appelle une explication... qui se fait attendre. Quatre questions en particulier tracassent les astronomes. Tout d'abord, si les cœurs denses sont les « œufs » des étoiles, où sont les « poules » cosmiques ? Les nuages doivent eux-mêmes venir de quelque part, et leur formation est mal comprise. Deuxièmement, pourquoi le cœur dense commence-t-il à s'effondrer ? Le mécanisme

d'amorce détermine le taux de formation stellaire et la masse finale des étoiles.

Troisièmement, comment les embryons d'étoiles influent-ils les uns sur les autres ? La théorie standard décrit les étoiles indépendamment, mais pas ce qui se passe lorsqu'elles se forment en groupe, comme c'est le cas pour la plupart d'entre-elles. Des découvertes récentes suggèrent que le Soleil est né au sein d'un amas, dispersé depuis. En quoi grandir dans une pouponnière bondée est-il différent d'être enfant unique ?

Enfin, comment les étoiles massives parviennent-elles simplement à se former ? La théorie standard explique la formation des étoiles dont la masse n'excède pas 20 fois celle du Soleil, mais achoppe sur les plus massives, dont l'intense rayonnement devrait souffler le nuage avant que l'étoile naissante n'ait atteint sa masse définitive. De plus, le rayonnement ultraviolet, l'éjection de matière à grande vitesse et les ondes de choc supersoniques associés aux étoiles massives dévastent leur environnement et perturbent fortement le nuage ; ce que la théorie classique ne prend pas en compte.

## **Cachées dans la poussière**

Répondre à ces questions se fait de plus en plus pressant. La formation stellaire sous-tend presque tous les autres domaines de l'astronomie, depuis l'avènement des galaxies jusqu'à la genèse des planètes. Tant qu'ils ne comprendront pas parfaitement la formation des étoiles, les astronomes ne peuvent pas espérer expliquer celle des galaxies lointaines ou l'existence des planètes dans d'autres systèmes stellaires.

Même si les détails nous échappent encore, une certitude se dégage : une théorie plus précise de la formation stellaire passe par la prise en compte de l'environnement de l'étoile en devenir. L'état final de la nouvelle étoile dépend non seulement des conditions initiales dans le nuage, mais aussi de l'influence ultérieure de son environnement et de ses voisins

### **L'ESSENTIEL**

✓ Les étoiles se forment à partir de nuages de gaz qui s'effondrent ; mais d'où viennent ces nuages, et pour quelle raison s'effondrent-ils ?

✓ En outre, la théorie envisage des étoiles isolées et néglige leurs interactions et leur rétroaction sur le nuage qui leur a donné naissance.

✓ Les astronomes ont observé comment des étoiles massives peuvent déclencher l'effondrement de nuages, et comment les nouvelles étoiles interagissent.

MASA, ESA, the Hubble Heritage Team

## UNE ÉTOILE EST NÉE... NON SANS MAL

La théorie classique de la formation stellaire explique parfaitement la naissance des étoiles isolées de masse faible à moyenne, mais les lacunes conceptuelles y sont encore nombreuses.

1. Le point de départ de la formation stellaire est un nuage moléculaire géant, c'est-à-dire une masse froide de gaz et de poussière.

2. Au sein du nuage, une région particulièrement dense (un cœur) s'effondre sous son propre poids.

3. Le cœur se fragmente en de multiples embryons stellaires. Dans chacun d'eux, une protoétoile forme un noyau et attire du gaz et de la poussière.

Nuage

Cœur

Protoétoile

**PROBLÈME N° 1 :** D'où vient le nuage ? Un mélange de matériaux produits lors du Big Bang ou éjectés par les étoiles doit se condenser d'une façon ou d'une autre.

**PROBLÈME N° 2 :** Pourquoi le cœur s'effondre-t-il ? Le modèle ne dit pas comment l'équilibre des forces qui maintiennent le nuage dans un état stable est perturbé.

**PROBLÈME N° 3 :** Comment les embryons interagissent-ils ? La théorie classique traite les étoiles isolées, une par une.

### L'AUTEUR



Erick YOUNG, astronome à l'Université d'Arizona jusqu'en 2009, dirige la mission SOFIA (*Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy*).

stellaires. C'est l'éternel débat de l'inné et de l'acquis, à l'échelle cosmique...

Si vous regardez le ciel par une nuit bien noire, vous pourrez voir la traînée de lumière diffuse de la Voie lactée sur la voûte céleste. Elle est interrompue par des zones sombres : des nuages interstellaires, dont les particules de poussière interceptent la lumière des étoiles et les rendent opaques à la lumière visible.

C'est dans ces nuages de poussière et de gaz que naissent les étoiles. Par conséquent, ce phénomène est caché et donc très difficile à observer. On peut voir où le processus démarre – dans les nuages opaques – et comment il prend fin – par l'apparition d'une étoile –, mais ce qui se passe entre les deux reste obscur. Le peu de rayonnement qui filtre se situe dans le domaine de l'infrarouge lointain et des ondes submillimétriques, où les capacités d'observation sont assez rudimentaires par rapport à d'autres plages du spectre électromagnétique.

La formation des nuages de poussière et de gaz est une étape du cycle du milieu interstellaire : les nuages engendrent des étoiles, qui recyclent les éléments en leur sein, avant de les relâcher dans le milieu interstellaire à leur mort, et ainsi de suite. Le milieu interstellaire est constitué aux

trois quarts d'hydrogène et d'un quart d'hélium ; tous les autres éléments représentent à peine quelques pour cent. Une partie de ce matériau est de la matière primordiale à peine altérée depuis le Big Bang, une part est rejetée par les étoiles au cours de leur vie, et une autre est formée de débris d'explosions stellaires.

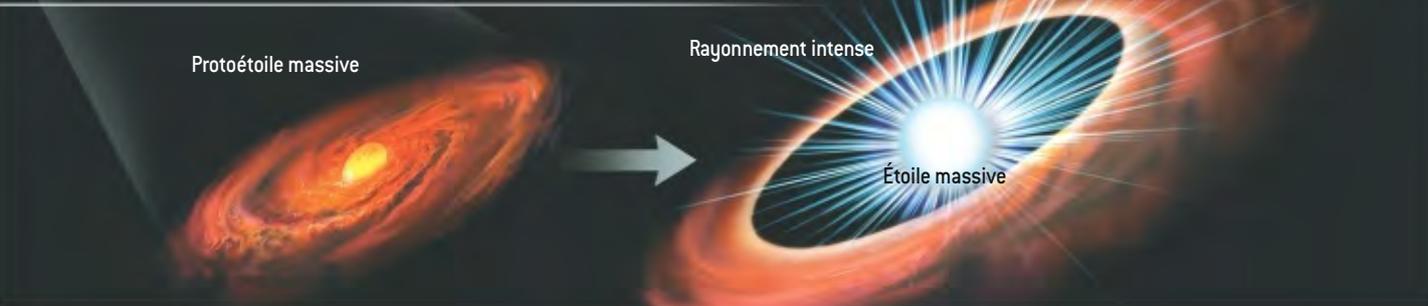
Au départ, le gaz se trouve sous forme d'atomes, car le rayonnement énergétique des étoiles casse les molécules. Il est diffus, avec environ un atome d'hydrogène par centimètre cube. En se refroidissant, le gaz se condense néanmoins en nuages, comme la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Ce faisant, il libère de l'énergie. Le milieu étant très peu dense, cette énergie ne peut être évacuée par collisions. Le moyen le plus efficace est l'excitation et la réémission dans l'infrarouge lointain de certains éléments, tel le carbone ionisé qui émet à la longueur d'onde de 158 micromètres. La basse atmosphère terrestre est opaque à ces longueurs d'onde, si bien qu'elles doivent être étudiées depuis l'espace (par exemple par l'observatoire spatial *Herschel*, lancé en 2009 par l'Agence spatiale européenne) ou la haute atmosphère, par des télescopes embarqués sur des avions (mission SOFIA).

À mesure que les nuages se refroidissent, ils deviennent plus denses. Quand ils

4. La protoétoile voit sa taille diminuer et sa densité augmenter. Elle devient une étoile quand la fusion nucléaire s'amorce en son centre. Des planètes émergent du matériau restant qui gravite autour d'elle.



PROBLÈME N°4 : Comment des étoiles massives peuvent-elles se former ? En atteignant une vingtaine de masses solaires, les étoiles deviennent tellement lumineuses qu'elles chassent le gaz environnant, bloquant leur propre croissance, ainsi que celle des étoiles voisines.



Don Dixon

atteignent environ 1000 atomes par centimètre cube, ils sont assez épais pour bloquer le rayonnement ultraviolet énergétique des étoiles environnantes. Les atomes d'hydrogène peuvent alors se recombinaer et former des molécules, par un processus complexe faisant intervenir la catalyse des grains de poussière présents dans le nuage. Les observations en ondes radio ont montré que ces nuages dits moléculaires contiennent des composés allant de l'hydrogène moléculaire aux molécules organiques complexes, qui auraient pu jouer un rôle dans l'apparition de la vie sur Terre.

## Le chaînon manquant

Mais au-delà de ces étapes, la piste s'efface. Les observations infrarouges ont débusqué des étoiles naissantes profondément enchaînées dans la poussière, mais n'ont pu révé-

ler l'étape précédente, le passage des nuages moléculaires à ces protoétoiles.

Au milieu des années 1990, le satellite MSX et l'observatoire spatial infrarouge ISO ont découvert des nuages si denses (plus de 10 000 atomes par centimètre cube) qu'ils sont opaques même à l'infrarouge thermique qui pénètre d'habitude la poussière. Ces « nuages sombres dans l'infrarouge » sont beaucoup plus massifs (100 à 100 000 fois la masse du Soleil) que les nuages moléculaires standards. Ces dernières années, ces nuages ont été recensés dans deux relevés en infrarouge du plan de la Galaxie réalisés avec le télescope spatial *Spitzer* (relevés GLIMPSE et MIPS GAL, voir l'encadré page 52, en haut). Ils pourraient être le chaînon manquant entre les nuages moléculaires et les protoétoiles.

En fait, les nuages sombres et les cœurs denses représentent peut-être l'étape

cruciale de formation des étoiles : la masse de l'étoile serait déjà déterminée à ce stade par celle du nuage. Il existe des nuages de toutes masses ; les petits étant plus courants que les grands. Cette distribution de masse ressemble beaucoup à celle des étoiles, si ce n'est que les nuages sont trois fois plus massifs, ce qui suggère que seul un tiers de la masse d'un nuage se retrouve dans la nouvelle étoile. Le reste se perd dans l'espace d'une façon ou d'une autre.

Les mesures de la masse des nuages moléculaires ne sont cependant pas encore assez fiables pour que l'on puisse dire si ce parallèle entre la distribution de masse des étoiles et celle des nuages moléculaires est une vraie relation de cause à effet, ou une simple coïncidence. Mais, quel que soit le mécanisme qui fixe la masse d'une étoile, il détermine toute son histoire : étoile massive qui mourra jeune et explosera dans un

## L'ORIGINE DES NUAGES INTERSTELLAIRES

Les astronomes ont identifié les étapes par lesquelles les nuages se condensent à partir du gaz interstellaire et deviennent progressivement plus denses. L'étape précédant la formation d'une protoétoile est représentée par les « nuages sombres dans l'infrarouge ». Opaques même à la lumière infrarouge, ils apparaissent sous forme de bandes noires sur cette image du relevé GLIMPSE, réalisée par le télescope spatial infrarouge *Spitzer*. Leur taille et leur masse correspondent à ce qui est nécessaire pour former des étoiles.



The glimpse team, University of Wisconsin-Madison

## UN EFFONDREMENT PROVOQUÉ

Les manuels d'astronomie restent vagues sur les mécanismes de déstabilisation et d'effondrement des nuages moléculaires. Des images infrarouges de *Spitzer* révèlent que des étoiles massives proches en sont souvent responsables.



NASA, JPL/Caltech et Harvard Smithsonian Center for Astrophysics

**Ci-dessus.** Dans la région W5, des étoiles massives (*en bleu*) ont « nettoyé » une cavité dans le nuage moléculaire. Sur le bord se trouvent des protoétoiles (*dans le gaz blanc-rose*) qui ont toutes le même âge. Cette synchronicité résulterait de l'influence des étoiles massives.

**À gauche.** Dans l'amas NGC 2068, des protoétoiles sont alignées comme des perles sur un collier. Bien qu'éparses, elles se sont formées presque simultanément. Le responsable est sans doute aussi un groupe d'étoiles massives voisines.

E. Young et NASA

cataclysme, ou étoile plus modeste qui vivra plus longtemps et disparaîtra en douceur.

Les astronomes font aussi des progrès sur la cause de l'effondrement d'un nuage ou d'un cœur dense. Dans le modèle classique, un cœur se trouve au départ en équilibre; la gravité et la pression extérieure exactement équilibrées par la pression interne thermique et magnétique, ou la turbulence. L'effondrement commence quand cet équilibre est perturbé au profit de la gravité. Mais quelle est la cause de ce déséquilibre? Les astronomes ont proposé de nombreux mécanismes. Une force extérieure telle que l'onde de choc d'une explosion de supernova pourrait comprimer le nuage. La pression interne pourrait aussi diminuer à mesure que la chaleur ou les champs magnétiques se dissipent.

## Spontané ou provoqué ?

Charles Lada, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, et ses collègues privilégient la lente dissipation de la pression thermique. En cartographiant les nuages moléculaires aux longueurs d'onde millimétriques et submillimétriques, à cheval sur les bandes radio et infrarouge, ils sont parvenus à identifier un grand nombre de cœurs isolés relativement calmes dans des nuages proches. Certains présentent des signes de mouvements lents vers l'intérieur et pourraient s'apprêter à produire des étoiles. Un bon exemple en est Barnard 355, situé dans la constellation de l'Aigle. Son profil de densité correspond exactement à ce que l'on attendrait si la pression thermique du nuage était pratiquement à l'équilibre avec la pression extérieure. Une source infrarouge repérée au centre serait une protoétoile à un stade très précoce, suggérant que l'équilibre s'est récemment rompu dans le sens d'un effondrement.

D'autres études appuient l'hypothèse d'une cause extérieure. Thomas Preibisch, de l'Institut Max Planck de radioastronomie de Bonn, et ses collègues ont montré que des étoiles éparses de la région supérieure de la constellation du Scorpion se sont presque toutes formées en même temps. Cela serait une coïncidence extraordinaire que la pression interne des différents cœurs diminue au même moment. Une explication plus vraisemblable est qu'une onde de choc provoquée par une supernova aurait balayé la région et entraîné

l'effondrement des cœurs. Mais les preuves sont ambiguës, parce que les étoiles massives perturbent leur environnement natal, si bien qu'il est difficile de reconstruire les conditions dans lesquelles elles se sont formées. Une autre limite est la difficulté de confirmer que les étoiles de plus faible masse de la région, qui sont moins brillantes, se sont formées en même temps.

Le télescope *Spitzer* a permis de progresser sur cette question. Lori Allen, de l'Observatoire national pour l'astronomie optique (NOAO), et ses collègues ont découvert un exemple frappant de cause externe d'effondrement dans une région nommée W5 (voir l'encadré page 52 en bas). Les images montrent de jeunes protoétoiles enchâssées dans des poches de gaz denses qui ont été comprimées par le rayonnement d'une génération précédente d'étoiles. La compression étant environ dix fois plus rapide que l'effondrement spontané, ces objets disséminés doivent s'être formés presque simultanément. Pour résumer, le déclenchement de la formation stellaire n'est pas une situation binaire, comme on le pensait auparavant. Il existe tout un spectre de processus.

## Naissances en groupe

En dehors du cas des effondrements provoqués, le modèle classique explique assez bien les observations de cœurs isolés formant des étoiles. Mais beaucoup d'étoiles, peut-être la plupart, se forment dans des amas, et le modèle ne rend pas compte de la façon dont cet environnement encombré perturbe leur naissance. Ces dernières années, les chercheurs ont développé deux théories concurrentes, qui ont pu être précisées grâce aux progrès considérables réalisés en termes de puissance de calcul. Les observations en infrarouge aident les astronomes à trancher.

La première théorie, dite concurrentielle, portée par Ian Bonnell, de l'Université de St Andrews en Écosse, et d'autres, est la plus étonnante. Les interactions entre cœurs adjacents au sein du nuage sont importantes. Il se forme de nombreuses protoétoiles très petites, qui se déplacent ensuite rapidement dans le nuage et entrent en compétition pour accréter le gaz restant. Certaines deviennent beaucoup plus grosses que d'autres, et les perdantes sont purement et simplement éjectées de l'amas, créant une classe « d'avortons stellaires » qui errent dans la Galaxie.

L'autre classe de modèles, dits du cœur turbulent, développés notamment par Christopher McKee, de l'Université de Californie à Berkeley, est directement dérivée du modèle classique, mais avec un rôle accru de la turbulence. Plusieurs cœurs s'effondrent dans le nuage, mais, à cause de la turbulence, ils sont de tailles différentes dès le départ. La distribution de masse des étoiles résultantes reflète le spectre de la turbulence initiale, et non une compétition ultérieure pour le matériau.

Les observations semblent pencher en faveur du modèle du cœur turbulent, mais le modèle concurrentiel pourrait être valable dans des régions de densité stellaire très élevée. Un cas intéressant est celui de l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) dans la constellation de la Licorne (voir ci-dessous). En lumière visible, cette région présente un grand nombre d'étoiles brillantes et une abondance de poussière et de gaz, caractéristiques de la formation stellaire. Les observations de *Spitzer* ont révélé la présence d'un amas dense avec des étoiles à divers stades de développement. Cet amas permet de visualiser avec précision les étapes où la turbulence ou l'accrétion concurrentielle laisseraient leur marque.

Les étoiles les plus jeunes, et donc les plus froides, qui rayonnent plus aux grandes longueurs d'onde, sont rassemblées en

## À voir dans l'infrarouge

- ✓ Les nuages moléculaires sont des taches noires en lumière visible, mais ils s'éclairent dans l'infrarouge. Ces longueurs d'onde traversent en effet mieux la poussière. Les protoétoiles et les nuages rayonnent la majeure partie de leur énergie dans ce domaine.
- ✓ Le rayonnement infrarouge correspond à des longueurs d'onde de 1 à 1 000 micromètres. La matière dont la température est comprise entre 3 et 3 000 kelvins rayonne en infrarouge.
- ✓ Le proche infrarouge, entre un et cinq micromètres, correspond à de la lumière stellaire un peu atténuée par la poussière. La plupart des observations infrarouges sont concentrées dans ce domaine.
- ✓ L'infrarouge moyen et lointain, jusqu'à 200 micromètres, est surtout émis par la poussière. Ces longueurs d'onde sont bloquées par l'atmosphère terrestre.
- ✓ Le rayonnement submillimétrique, de 350 à 1 000 micromètres, caractérise le matériau froid.

### DES CRÈCHES D'ÉTOILES SURCHARGÉES

Bien que le modèle classique de formation stellaire n'en tienne pas compte, les étoiles naissantes peuvent interférer avec la formation de leurs voisines. Le télescope *Spitzer* a trouvé dans l'amas du Sapin de Noël (NGC 2264) un amas dense d'étoiles d'âges variés. Certaines des « étoiles » les plus jeunes s'avèrent être des groupements serrés de protoétoiles, parfois jusqu'à une dizaine dans un rayon de 0,1 année-lumière, et donc assez proches pour interagir.



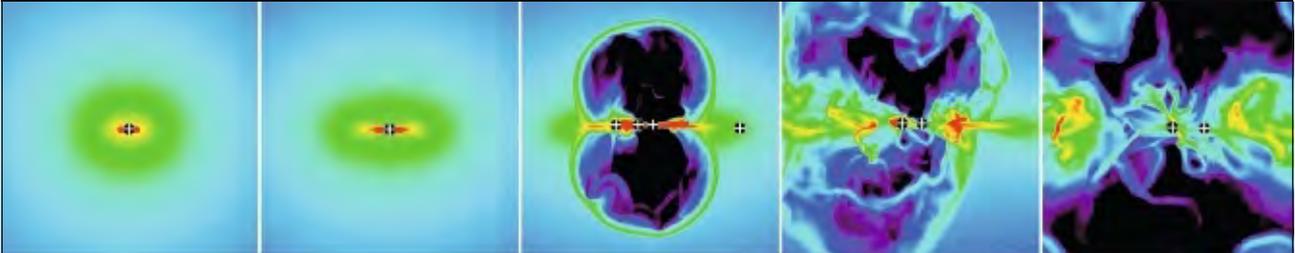
NASA, JPL/Caltech et P. Teixeira, Harvard Smithsonian Center for Astrophysics

## DÉPASSER LA MASSE LIMITE

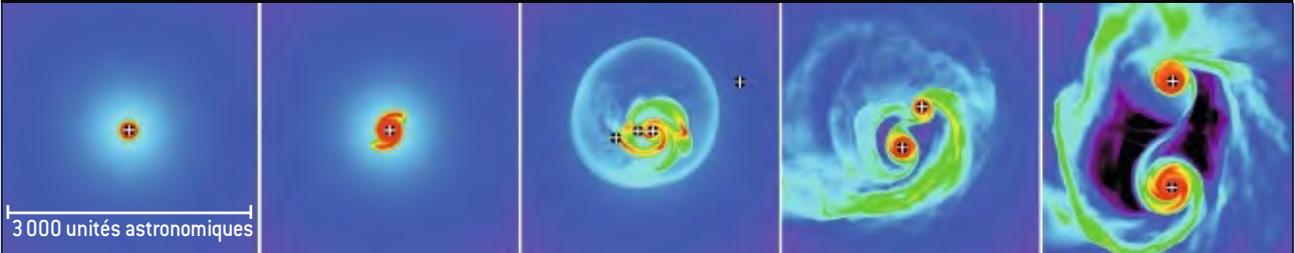
Des simulations numériques récentes montrent qu'une étoile peut atteindre une masse élevée. Comment ? Grâce à une croissance non uniforme. Le rayonnement émis par la pro-

toétoile repousse le gaz, créant des vides géants au sein du gaz. Toutefois, il ne tarit pas complètement le flux rentrant, qui se rassemble sous forme de filaments entre ces vides.

Densité (vue de côté)



Densité (vue de dessus)



**17 500 ANS :** Une protoétoile s'est formée, et du gaz tombe dessus de façon quasi uniforme. L'énergie potentielle gravitationnelle libérée fait briller faiblement la protoétoile.

**25 000 ANS :** Quand la protoétoile a atteint environ 11 masses solaires, le disque qui l'entoure devient gravitationnellement instable et forme une spirale.

**34 000 ANS :** au-delà de 17 masses solaires, le rayonnement de la protoétoile chasse le gaz, créant une bulle. Du gaz continue à tomber par les côtés. D'autres protoétoiles se forment.

**41 700 ANS :** Une petite protoétoile croît plus vite que la protoétoile centrale et rivalise bientôt de taille avec elle. L'accrétion est inégale dans l'espace, mais aussi irrégulière dans le temps.

**55 900 ANS :** À la fin de la simulation, l'étoile centrale atteint 42 masses solaires et son compagnon, 29. Il reste quelque 28 masses solaires de gaz, qui finiront sans doute par être absorbées.

M. Krumholz et al., Science, vol. 323, 15 janvier 2009

## À quelle vitesse se forment les étoiles ?

✓ C'est une question qui donne du fil à retordre aux astronomes. Le point crucial est l'étape finale de l'effondrement, après la formation du noyau de la protoétoile, mais avant qu'elle ait grossi en accrétant de la masse. L'équipe de Neal Evans, de l'Université du Texas à Austin, a observé des complexes de formation stellaire proches avec le télescope spatial *Spitzer* et trouvé que l'accrétion se fait à un rythme très irrégulier. L'étoile grossit très rapidement jusqu'à la moitié de sa masse finale, mais sa croissance ralentit ensuite ; il lui faut dix fois plus de temps pour accumuler le reste de sa masse. L'ensemble du processus est donc plus long que ce que l'on estimait auparavant : deux millions d'années en moyenne pour une étoile de type solaire.

un groupe serré. Paula Teixeira, de l'Observatoire européen austral, et ses collègues ont montré qu'elles sont espacées d'environ 0,3 année-lumière. Ce motif régulier est ce que l'on attendrait si les cœurs denses s'effondrent sur place, à partir des conditions initiales dans le nuage moléculaire global, comme ce que décrit le modèle turbulent. Dans le modèle concurrentiel, *a contrario*, la répartition des étoiles devrait être aléatoire. Pourtant, les images plus détaillées montrent que certaines protoétoiles apparentes ne sont pas des objets uniques, mais des groupes compacts d'objets. L'un d'entre eux regroupe dix sources dans un rayon de 0,1 année-lumière. C'est une densité telle que l'accrétion concurrentielle doit entrer en jeu, au moins à petite échelle.

Par conséquent, comme pour l'effondrement, l'effet de l'environnement sur la taille des étoiles n'est pas exclusif. La turbulence et l'accrétion concurrentielle peuvent toutes deux opérer.

Les étoiles massives sont rares et ne vivent pas longtemps, mais elles jouent un rôle très important dans l'évolution des

galaxies. Elles injectent de l'énergie dans le milieu interstellaire à la fois par leur rayonnement et par le flot de matière qu'elles éjectent, et, à la fin de leur vie, elles explosent en supernovae, restituant de la matière enrichie en éléments lourds. La Voie lactée est criblée de bulles et de vestiges de supernovae créés par ces étoiles.

## Prendre du poids : pas si simple

Cependant, la théorie classique peine à expliquer leur formation. À partir du moment où une protoétoile atteint le seuil d'environ 20 masses solaires, la pression exercée par son rayonnement devrait l'emporter sur la gravité et l'empêcher de poursuivre sa croissance. En plus de la pression du rayonnement, le vent stellaire d'une étoile massive disperse son nuage natal, limitant davantage sa croissance, tout en interférant avec la formation d'étoiles dans les environs.

Des travaux théoriques récents de Mark Krumholz et ses collègues offrent une piste pour sortir de cette impasse. Leurs simu-

lations en trois dimensions montrent la croissance stellaire dans toute sa complexité. L'afflux de matériau n'y est pas uniforme ; les régions denses alternent avec des bulles où la lumière stellaire peut s'échapper. Ainsi, la pression radiative pourrait finalement ne pas faire obstacle à la croissance. Des étoiles compagnons se forment aussi facilement à partir du matériau dense en accretion, expliquant pourquoi les étoiles massives sont rarement solitaires. Les astronomes cherchent maintenant la confirmation de ces simulations en observant avec le télescope *Spitzer* des régions de formation d'étoiles massives. La vérification sera cependant délicate : la rareté et la brièveté de ces étoiles rendent leur formation difficile à observer.

Heureusement, de nouveaux équipements vont permettre de progresser sur les questions liées à la formation des étoiles. *Herschel* et *SOFIA* observent depuis peu les longueurs d'onde submillimétriques et de l'infrarouge lointain, domaines où la formation stellaire est la plus facile à voir. Ils ont la résolution spatiale et spectrale nécessaire pour car-

tographier la répartition des vitesses dans les nuages interstellaires. Aux plus grandes longueurs d'onde, l'interféromètre ALMA, en construction dans les Andes chiliennes, permettra de cartographier les protoétoiles avec un luxe de détails.

Avec ces nouvelles observations, les astronomes espèrent déterminer le cycle de vie complet du milieu interstellaire, des nuages atomiques aux nuages moléculaires, jusqu'aux cœurs prestellaires et aux étoiles, et enfin le retour au gaz diffus. Ils espèrent également observer les disques protostellaires avec une résolution angulaire suffisante pour suivre la chute de matériau issu du nuage, ainsi que comparer les effets de différents environnements sur la naissance des étoiles.

Les réponses auront des répercussions dans d'autres domaines de l'astrophysique. La théorie actuelle de la formation stellaire n'est pas mauvaise, mais ses lacunes nous empêchent d'expliquer certains des aspects les plus importants de l'Univers. La formation stellaire est un processus plus riche que ce que nous avions anticipé. ■

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

M. Krumholz *et al.*, **The formation of massive star systems by accretion**, *Science*, vol. 323, pp. 754-757, 2009. [arxiv.org/abs/0901.3157](http://arxiv.org/abs/0901.3157)

S. P. Zwart, **Les frères perdus du Soleil**, *Pour la Science* n° 387, janvier 2009. <http://bit.ly/pls387-soleil>

M. Heydari-Malayeri, **L'énigmatique formation des étoiles massives**, *Pour la Science* n° 359, septembre 2007. <http://bit.ly/pls359-etoiles-massives>

S. Mohanty et R. Jayawardhana, **La naissance tragique des naines brunes**, *Pour la Science* n° 340, février 2006. <http://bit.ly/pls340-naines-brunes>

E. Young *et al.*, ***Spitzer* and Magellan observations of NGC 2264 : a remarkable star-forming core near IRS-2**, *Astrophysical Journal*, vol. 642, n° 2, pp. 972-978, 2006. [Arxiv.org/abs/astro-ph/0601300](http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601300)



**LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM**

**AU JARDIN DES PLANTES**

**2011, Année internationale des Forêts.**  
Dans le cadre de cet événement, le Muséum vous propose des cycles de conférences et de films.

ENTRÉE LIBRE

DÉTAILS SUR [WWW.MNHN.FR](http://WWW.MNHN.FR),  
DANS "ÉVÈNEMENTS"

**LES LUNDIS DU MUSÉUM, 18H**

Cycle de conférences « La forêt : son rôle, son état, ses habitants » :

**Lundi 7 mars** : Forêt, climat et cycle du carbone, Denis Loustau, INRA

**Lundi 14 mars** : La dynamique et l'architecture des arbres en forêt guyanaise, Bernard Riéra, CNRS - **Lundi 28 mars** : Quelle(s) forêt(s) en France en 2100?, Vincent Badeau, INRA - **Lundi 4 avril** : Des forêts et des hommes sous les tropiques : une vieille cohabitation, Serge Bahuchet, Muséum.

**Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution**  
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5<sup>e</sup>  
Métros : Gare d'Austerlitz - Jussieu

**LES COURS PUBLICS, LES JEUDIS À 18H**

Assurés par les chercheurs du Muséum, ils s'adressent à tous.

Cycle « Anatomie comparée » P.-H. Gouyon, Muséum.

**Jedi 24 mars** : Formes et diversité - **Jedi 31 mars** : Sélection et optimalité - **Jedi 7 avril** : La forme et l'information

**Grand Amphithéâtre du Muséum**  
57 rue Cuvier, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu

**LE BAR DES SCIENCES**

**Mercredi 16 mars à 19h30** :  
De la destruction des forêts à la reforestation

**Café/Restaurant de la Baleine**  
47 rue Cuvier, Paris 5<sup>e</sup> - Métro : Jussieu



# Étoile et disque compagnons

L'étoile et son disque protoplanétaire, berceau des planètes, naissent en même temps, lors de l'effondrement d'un cœur dense de nuage moléculaire.

Claude BERTOUT  
travaille à l'Institut  
d'astrophysique et à  
l'Observatoire de Paris.

Le ballet céleste des corps du Système solaire paraît étrangement ordonné. Pierre-Simon Laplace (1749-1827) le notait déjà dans *L'exposition du système du monde*, son ouvrage paru en 1796 et réactualisé plusieurs fois par la suite : « Les mouvements des planètes [sont] dans le même sens, et à peu près dans un même plan ; les mouvements des satellites [vont] dans le même sens que ceux des planètes ; les mouvements de rotation de ces différents corps et du Soleil [sont] dans le même sens que leurs mouvements de projection [leurs mouvements orbitaux projetés sur le ciel] et dans des plans peu différents. »

Comment expliquer une telle coordination entre des dizaines de corps distants de centaines de millions de kilomètres ? C'est tout simplement la marque de la naissance du système planétaire. Si les contributions de Laplace à la physique mathématique et à la mécanique céleste sont connues, sa vision pourtant prophétique de la nébuleuse protoplanétaire l'est moins. De ses constatations, il déduit en effet que le Soleil et son cortège de planètes sont nés au sein d'une même nébuleuse en rotation. Celle-ci, englobant à l'origine l'ensemble du Système solaire, s'est progressivement contractée en laissant derrière elle les planètes. Ce scénario explique qu'elles orbitent toutes dans le même sens autour du Soleil, et que l'étoile, les planètes et leurs satellites tournent sur eux-mêmes dans le même sens.

Les détails du modèle de Laplace n'ont pas résisté aux progrès de l'astronomie, mais le principe de base reste actuel : l'étoile et son disque protoplanétaire, où naissent les planètes, se forment au sein d'une même nébuleuse. On sait aujourd'hui qu'il s'agit d'un cœur dense de nuage moléculaire, dont la masse est suffisante pour qu'il s'effondre sous l'action de sa propre gravité (on parle ici des étoiles naines, qui représentent l'immense majo-

rité des étoiles et incluent le Soleil ; la formation des étoiles massives est encore très controversée).

Les nurseries d'étoiles se cachent au sein de nuages moléculaires géants, qui contiennent une masse de gaz allant jusqu'à plusieurs millions de fois celle du Soleil. Certains sont discernables à l'œil nu dans la Voie lactée, où ils forment des zones sombres. Ces régions riches en gaz et en poussières sont hétérogènes et turbulentes. Leur analyse spectroscopique, à des longueurs d'onde caractéristiques de leurs constituants (monoxyde de carbone, monosulfide de carbone, ammoniac...), révèle une structure hiérarchisée : des zones de densité croissante s'emboîtent les unes dans les autres. La moitié de la masse des nuages moléculaires géants est ainsi concentrée dans des fragments d'une densité typique de  $10^3$  particules par centimètre cube, qui s'étendent de 1 à 10 années-lumière, et qui sont immergés dans un milieu plus ténu de gaz moléculaire ou atomique. À une échelle plus petite, des cœurs denses de 0,1 à 2 années-lumière de diamètre contiennent entre  $10^4$  et  $10^5$  particules par centimètre cube. Ce sont ces cœurs qui donnent naissance aux étoiles, souvent regroupées en amas.

## La formation des cœurs

Le mécanisme de formation des cœurs denses au sein des nuages moléculaires n'est pas encore entièrement élucidé. Le nuage est-il localement comprimé par des ondes de choc, qui peuvent être produites par les vents d'étoiles chaudes et massives proches ou par une explosion de supernova ? Les cœurs résultent-ils de l'accumulation aléatoire de globules plus petits sous l'effet de la forte turbulence du milieu interstellaire ? Les spécialistes débattent sans réussir à écarter l'une ou l'autre de ces hypothèses, qui sont vraisemblablement toutes deux à l'œuvre dans des régions différentes du milieu interstellaire galactique. Quoi qu'il en

### L'ESSENTIEL

➤ Les étoiles naissent dans les zones denses de gaz et de poussière, en rotation sur eux-mêmes.

➤ Lorsque ces zones s'effondrent, une partie de la matière forme l'étoile, tandis que le reste s'accumule dans le disque protoplanétaire. Parallèlement, deux jets symétriques sont émis par les pôles.

➤ Le disque perd progressivement sa matière, qui tombe sur l'étoile ou est utilisée pour la formation des planètes. Lorsque l'étoile commence la fusion de l'hydrogène, il a complètement disparu.

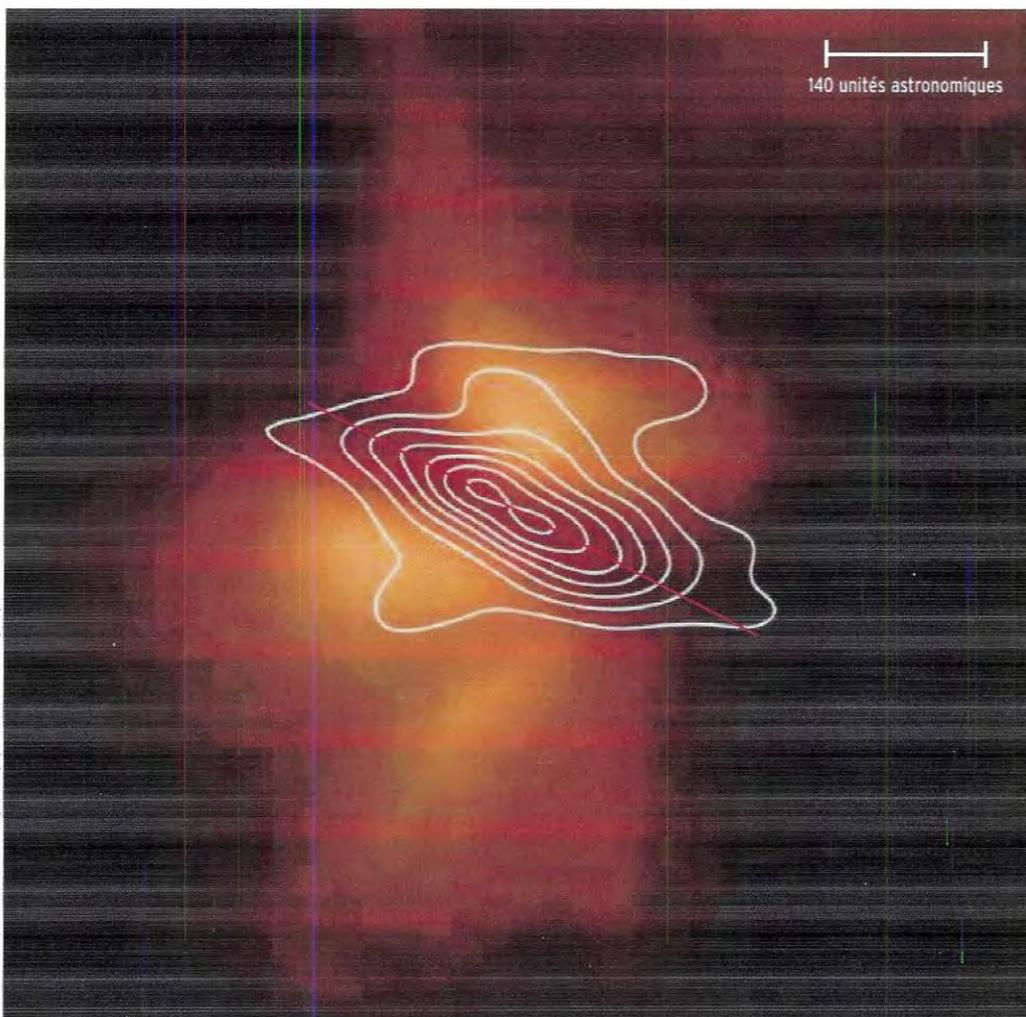
# protoplanétaire, de naissance

soit, le processus de formation du cœur dense n'influe pas de façon notable sur le déroulement de l'effondrement gravitationnel qui s'ensuit.

Comme les étoiles, les nuages moléculaires tournent autour du centre de la galaxie. Conformément aux lois de Kepler, le côté le plus proche de ce centre va légèrement plus vite que le côté le plus éloigné. Du fait de leur cohésion interne, les nuages moléculaires et les cœurs denses qu'ils contiennent tournent alors lentement sur eux-mêmes.

Parmi ces cœurs denses, certains sont gravitationnellement instables et vont s'effondrer. La

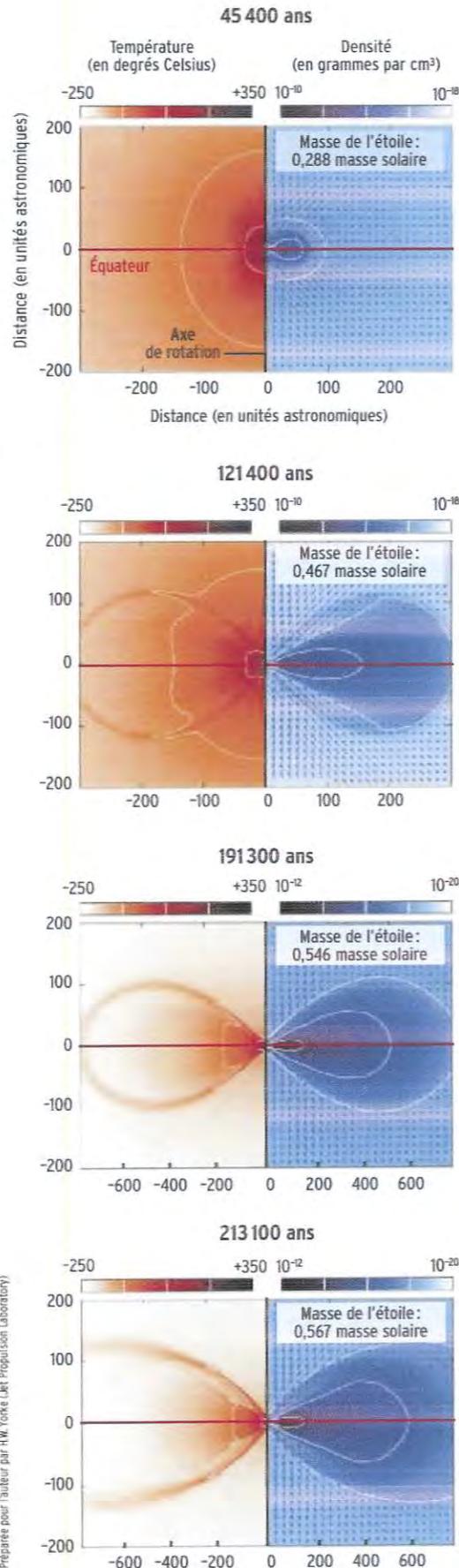
matière située le long de l'axe de rotation, dont le moment cinétique est faible, tombe directement vers le centre du cœur, formant un embryon stellaire. En revanche, la matière plus éloignée de cet axe a un moment cinétique suffisant pour lui éviter d'être « avalée » directement par l'étoile naissante ; elle s'accumule alors autour du plan équatorial (voir la figure page 86). Ainsi se forme, en environ 100 000 ans, une protoétoile entourée d'un disque circumstellaire, situé dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation du cœur moléculaire dense.



LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE de cette étoile jeune, située dans le cœur moléculaire CB 26, est encore très dense. L'étoile est « de classe I », ce qui correspond à un stade précoce de développement. L'image en couleurs a été obtenue dans l'infrarouge proche par *Hubble*. Le disque opaque, vu par la tranche (*trait rouge*), cache l'étoile. Ses couches externes diffusent la lumière de l'astre, formant une nébuleuse bipolaire. Les contours blancs sont des lignes d'iso-intensité du rayonnement millimétrique émis par le monoxyde de carbone du disque.

J. Swiler et al. à paraître dans *Astronomy & Astrophysics* (2009) © I.S.O. Adaptée par l'auteur.

ÉVOLUTION D'UN SYSTÈME ÉTOILE-DISQUE (vu par la tranche) au cours de l'effondrement d'un cœur moléculaire d'une masse solaire. À droite, on observe la densité (en bleu) du gaz et sa vitesse (les flèches; plus elles sont longues, plus la vitesse est grande). À gauche, on s'intéresse à la température du gaz (en orange). Les lignes blanches correspondent aux iso-températures et iso-densités indiquées par des traits blancs sur les échelles. Aux derniers stades du développement, la zone centrale (en noir) est devenue si dense qu'elle masque l'étoile. Notons l'absence des jets bipolaires, observés par les astronomes lors de la formation d'un disque, mais que les simulations actuelles ne parviennent pas à reproduire.



S'ils ne reproduisent pas encore tous les aspects de ce processus, les calculs sur superordinateurs nous donnent aujourd'hui une vision réaliste de la formation des étoiles et des disques protoplanétaires. On reconstitue par exemple l'évolution chimique du disque, importante pour comprendre les différentes compositions des planètes.

## Disques et jets

Dans les années 1980, les observations radio ont mis en évidence un phénomène d'éjection de matière qui accompagne systématiquement la formation du système étoile-disque et qui détruit, du moins en partie, le cœur moléculaire au sein duquel naît l'étoile. Ces doubles jets très fins de matière ionisée émanent du disque circumstellaire, de part et d'autre de son plan, et se propagent dans le cœur moléculaire le long de l'axe de rotation du disque, à une vitesse de plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Ces jets bipolaires s'étendent sur des distances considérables, jusqu'à plusieurs années-lumière de l'étoile dont ils sont issus, contribuant à entretenir la turbulence du nuage moléculaire. Les jets entraînent avec eux le gaz froid environnant, qui s'écoule à quelques dizaines de kilomètres par seconde.

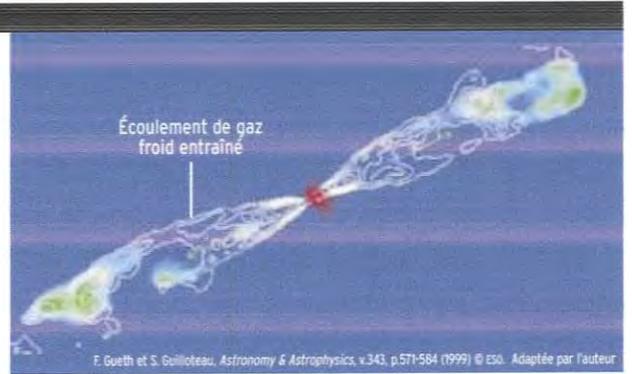
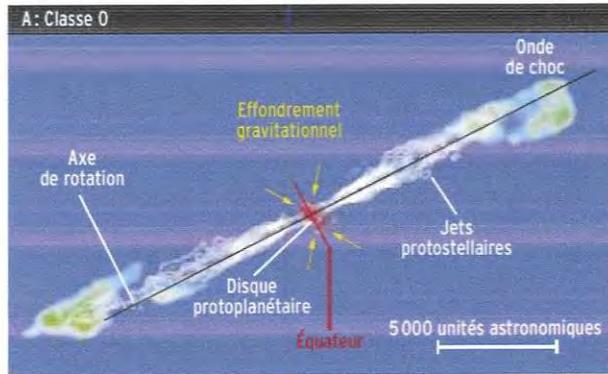
Les jets bipolaires accompagnent la naissance des étoiles dès qu'elles ont un disque circumstellaire (ce qui n'est le cas que de la moitié des étoiles jeunes de faible masse connues; on ignore si les autres n'ont jamais eu de disque ou si elles en ont eu un qui a disparu). Ils sont nécessaires à la formation du système disque-étoile. Leur découverte a en effet permis de résoudre un problème ancien, celui du moment cinétique: la vitesse de rotation des étoiles jeunes est beaucoup trop lente par rapport à celle des nuages moléculaires dont elles sont issues. Le gaz doit donc perdre du moment cinétique au cours de l'effondrement gravitationnel. Cette perte s'effectuerait grâce aux jets, selon un mécanisme encore mal expliqué, qui utiliserait le champ magnétique du disque circumstellaire pour « pomper » l'énergie de rotation de ce dernier.

On distingue aujourd'hui quatre classes d'objets stellaires jeunes, qui correspondent aux différentes phases d'évolution de leur disque protoplanétaire (voir l'encadré page ci-contre). La classe 0 est constituée des protoétoiles naissantes, qui commencent leur contraction gravitationnelle et sont entourées d'une enveloppe massive, quasi sphérique, de gaz et de poussières. Les protoétoiles de la classe I sont plus avancées; leur enveloppe est en grande partie dispersée, mais un disque opaque au rayonnement visible s'est formé autour d'elle. La classe II regroupe les étoiles jeunes qui ont atteint leur masse finale après l'effondrement gravitationnel et se contractent lentement; leur

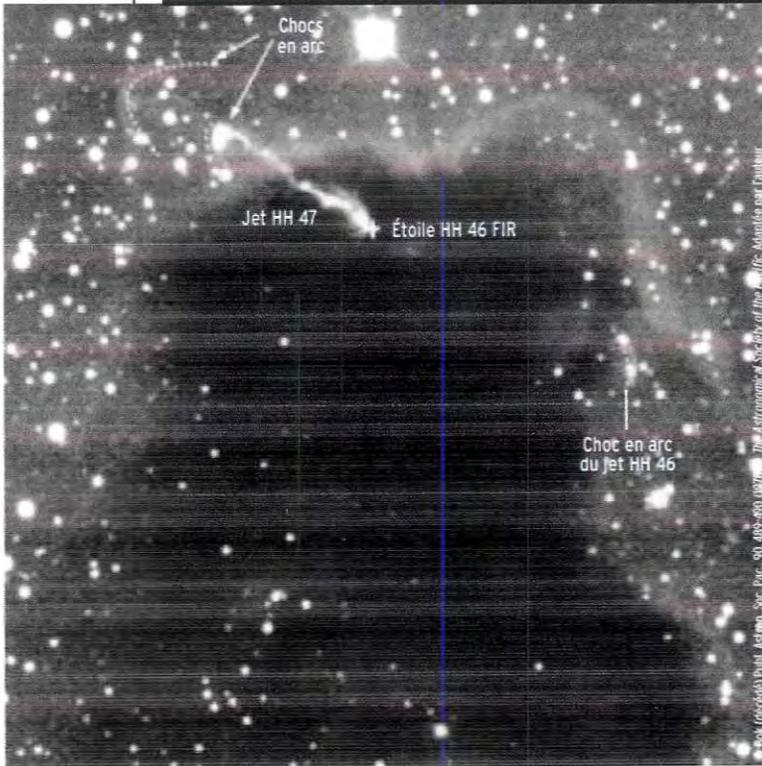
## Les étoiles font leurs classes

Les objets stellaires jeunes, où la fusion de l'hydrogène n'a pas encore démarré, sont divisés en quatre classes, en fonction de leur degré d'évolution. La très jeune protoétoile HH 211 (*ci-dessous*) gagne encore de la matière par effondrement gravitationnel de son nuage parent. Celui-ci la voile à nos instruments dans le domaine optique, et il faut aller chercher dans celui des ondes millimétriques pour apercevoir la protoétoile et son jet bipolaire, comme sur cette cartographie réalisée

par l'interféromètre de l'IRAM, sur le Plateau de Bure, en France. Le disque circumstellaire, dont les détails ne sont pas encore discernables, est identifié au centre (*en rouge*). Perpendiculairement à ce disque partent, dans des directions opposées, deux jets de gaz moléculaire (*à gauche*), qui entraînent un écoulement de gaz froid plus large (*à droite*). Une onde de choc se produit à l'interface entre jet et milieu interstellaire ambiant (*en vert*).



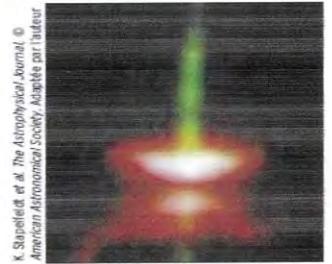
B: Classe I



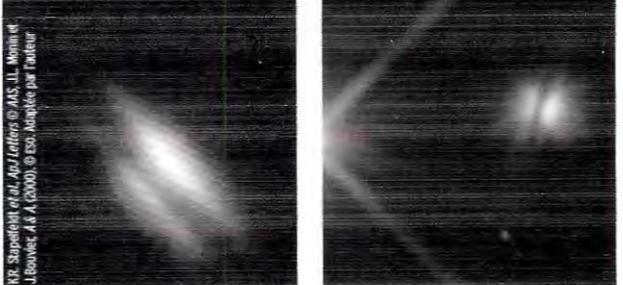
Sur cette photographie en lumière visible, le jet bipolaire de l'étoile HH 46 FIR a percé le cœur moléculaire parent, si sombre et dense qu'il voile les étoiles d'arrière-plan; sa composante HH47 se propage un peu en dehors et apparaît dans le domaine optique, tandis que sa composante symétrique HH46, dont le choc terminal émerge à peine du cœur, ne serait détectable qu'en ondes millimétriques. Les jets se propagent à une vitesse atteignant plus d'une centaine de kilomètres par seconde.

C: Classe II

Au stade suivant, le cœur moléculaire est dissipé, et le disque apparaît dans le domaine optique. Sur cette photographie de HH30 en fausses couleurs, la tranche du disque, très dense, forme une bande sombre au milieu, qui s'évase à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de rotation. Ses couches externes diffusent la lumière de l'étoile. Avec un diamètre de plus de 500 unités astronomiques, le disque est beaucoup plus étendu que notre Système solaire (Neptune est à environ 30 unités astronomiques du Soleil). Un jet protostellaire (*en vert*) est moins intense, mais encore visible.



D: Classe II tardive



HK Tau B (*à gauche*) et HV Tau C (*à droite*) sont deux étoiles de la région de formation stellaire du Taureau, entourées de disques protoplanétaires poussiéreux vus par la tranche. À ce moment de l'évolution, les jets protostellaires (invisibles sur ces photographies dans le domaine optique) se sont presque entièrement estompés et les grains de poussière des disques commencent à grossir par collisions. Il s'agit du premier stade de formation des planètes. Lorsque les étoiles entrent dans la classe III, leur disque a disparu.

enveloppe a totalement disparu et leur disque circumstellaire est encore très dense et opaque. Une étoile de classe III a presque atteint la température de fusion de l'hydrogène en hélium ; son disque a disparu, en partie tombé sur l'étoile et en partie accrété par les planètes naissantes. Grâce à l'observation de ces différentes classes d'objets célestes jeunes, on reconstitue l'histoire de la formation d'une étoile et de son disque protoplanétaire.

## De fabuleux instruments sont en gestation, comme l'E-ELT, un télescope géant de 42 mètres de diamètre.

Les jets protostellaires, dont la puissance décroît à mesure que l'astre vieillit, se produisent dans les objets stellaires des classes 0 à II. Au début, l'effondrement gravitationnel du gaz moléculaire continue au sein des zones non affectées par l'éjection de matière. Effondrement et éjection de matière coexistent donc dans des régions de l'espace différentes (voir la figure A, page 87). Le disque circumstellaire grandit, mais à ce stade, il est trop petit pour que l'on puisse le voir avec les instruments actuels. La durée de cette phase initiale est de quelques dizaines de milliers d'années.

On assiste ensuite à la disparition progressive du cœur moléculaire, dont la matière tombe sur le disque ou est entraînée vers l'extérieur par les jets bipolaires. Au départ, le cœur, très dense, est une zone opaque au rayonnement visible ; ce sont les jets qui, les premiers, apparaissent dans le domaine optique, en perçant le cœur (voir la figure B, page 87). La densité du cœur diminue à mesure que la matière s'accumule sur la protoétoile. Lorsqu'elle est suffisamment faible, le système disque-étoile apparaît en lumière infrarouge. Dans le même temps, le disque circumstellaire grandit, bien qu'une partie de la matière qu'il contient se déverse sur l'étoile ; celle-ci gagne ainsi de la masse par accrétion. Cette phase dure environ 100 000 ans.

Une fois le cœur moléculaire dispersé, l'étoile et son disque circumstellaire apparaissent dans le domaine optique (voir la figure C, page 87). Ils appartiennent maintenant à la classe II, et sont visibles par des instruments comme le télescope spatial *Hubble* et le VLT. La taille et la brillance des jets ont beaucoup diminué, à tel point qu'on parle désormais de micro-jets. Ceux-ci s'estompent peu à peu, pour finir par disparaître complètement (voir la figure D, page 87).

Cette phase de transition, nommée T Tauri, entre la protoétoile accompagnée de son disque

et l'étoile seule en passe de s'allumer dure quelques millions d'années. Nous connaissons des centaines d'étoiles qui traversent actuellement ce stade d'évolution. Les estimations de la masse des disques qui les entourent vont de quelques centièmes à quelques dixièmes de masse solaire. C'est bien supérieur à la masse minimum de la nébuleuse protosolaire (la masse de gaz nécessaire pour former le Système solaire – moins l'étoile –, soit quelques millièmes de la masse du Soleil). Le matériau brut (gaz et poussières) à partir duquel se formeront les planètes est donc présent en abondance dans les disques protoplanétaires.

Lorsque le disque d'accrétion disparaît, son contenu ayant été utilisé pour former des planètes ou s'étant déversé sur l'étoile, celle-ci entre dans la classe III. Elle montre souvent une activité magnétique importante, mais elle a perdu les attributs les plus visibles de la formation stellaire. L'étoile continue ensuite à se contracter jusqu'à atteindre la température de fusion de l'hydrogène. Elle se stabilise alors et entre dans sa phase adulte.

### Les disques de débris

La durée de vie des disques protoplanétaires originaux ne dépasse pas deux ou trois millions d'années. Or les astronomes ont détecté des disques autour d'étoiles plus âgées, telle *bêta*-Pictoris, une étoile adulte d'une dizaine de millions d'années. Ceux-ci sont donc de nature différente : la poussière qui les constitue provient des collisions entre les innombrables rochers de toutes tailles formés dans le disque originel. Ces disques sont dits de débris ou de deuxième génération. Ils sont caractéristiques des systèmes planétaires jeunes, encore à l'état de gigantesques chantiers : ils contiennent des débris rocheux de toutes sortes, et on y détecte aujourd'hui des planètes (voir *Des poussières dans les systèmes planétaires*, par David Ardila, page 60).

La puissance des interféromètres observant les objets célestes dans les domaines radio, millimétrique et infrarouge a permis aux astronomes de remonter jusqu'aux phases les plus précoces de la naissance des étoiles et de leurs disques protoplanétaires. Ceux-ci nous livrent aujourd'hui leurs secrets, malgré les épais rideaux de poussière interstellaire qui les cachent à nos yeux. De fabuleux instruments sont actuellement en gestation, comme l'E-ELT (*European extremely large telescope*), un télescope optique de 42 mètres de diamètre prévu pour 2018, ou l'ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*), un interféromètre millimétrique et sous-millimétrique comprenant 66 antennes de 12 mètres de diamètre, en cours de construction dans le désert d'Atacama au Chili, et qui entrera en fonction en 2011. Ils nous emmèneront au sein même des disques, dont nous pourrions étudier les structures fines, afin de surprendre au berceau les planètes en train de naître... ■

### livres

• C. BERTOUT et S. LUCIDE, *Le diable, l'astronome et la naine rouge*, Éditions du Pommier, 2009.

• W. BRANDER et H. KLAHR (éditeurs), *Planet Formation: Theory, Observations, and Experiments*, Cambridge University Press, 2006.

• C. BERTOUT, *Naissance et évolution des systèmes planétaires*, Flammarion, Collection Champs, 2005.

Un nuage de poussière et d'hydrogène moléculaire se contracte sous son propre poids  
- échelle : 300 000 unités astronomiques (UA) -  
pour les progéniteurs des étoiles de faible masse,  
et jusqu'à 10 millions pour les nuages géants  
qui donnent les étoiles massives.

**2. La formation des étoiles** se déroule différemment selon qu'elles sont légères ou massives. Tout commence de façon identique, par l'effondrement gravitationnel d'un nuage interstellaire. Mais alors que les étoiles de faible masse ne s'allument que lorsque l'accrétion de matière est presque terminée, la fusion s'amorce trop tôt dans les étoiles massives et perturbe l'accrétion qui, pourtant, se poursuit jusqu'à son terme.

Une zone plus dense s'effondre sur elle-même, formant un cœur dense.  
Échelle : 10 000 à 100 000 UA  
Durée : un million d'années

Étoiles de type O  
(15 à 100 masses solaires)

Étoiles de faible masse

Étoiles de type B  
(5 à 15 masses solaires)

Au centre du cœur dense, un disque se forme et la protoétoile commence à éjecter de la matière.  
Échelle : 8 000 UA  
Durée : 10 000 à 100 000 ans

La fusion de l'hydrogène s'amorce très tôt, avant que l'accrétion ne soit terminée, et le rayonnement repousse le gaz. Cependant, un disque et des jets bipolaires se formeraient comme pour les étoiles légères, permettant à l'accrétion de se poursuivre.  
Échelle : 1 000 à 10 000 UA  
Durée : entre 100 000 et 500 000 ans

Comme pour les étoiles de type B, la fusion commence avant la fin de l'accrétion, qui se poursuit néanmoins. On n'observe pas de disques, mais de vastes structures instables, nommées toroïdes.  
Échelle : 4 000 à 30 000 UA  
Durée : environ 100 000 ans

Le disque d'accrétion est formé et transfère la matière de l'enveloppe à la protoétoile.  
Échelle : 8 000 UA  
Durée : entre 100 000 ans et un million d'années

L'accrétion est terminée. La fusion du deutérium s'amorce.  
Échelle : 1 000 UA  
Temps : un à dix millions d'années

L'étoile commence à brûler de l'hydrogène. Le disque a disparu, formant éventuellement des planètes.  
Échelle : 50 UA  
Durée : plusieurs milliards d'années

L'enveloppe a disparu. Durant environ un million d'années, l'étoile est entourée d'une région d'hydrogène ionisé.  
Durée : quelques dizaines de millions d'années.

L'enveloppe a disparu. Durant environ un million d'années, l'étoile est entourée d'une région d'hydrogène ionisé.  
Durée : quelques millions d'années.