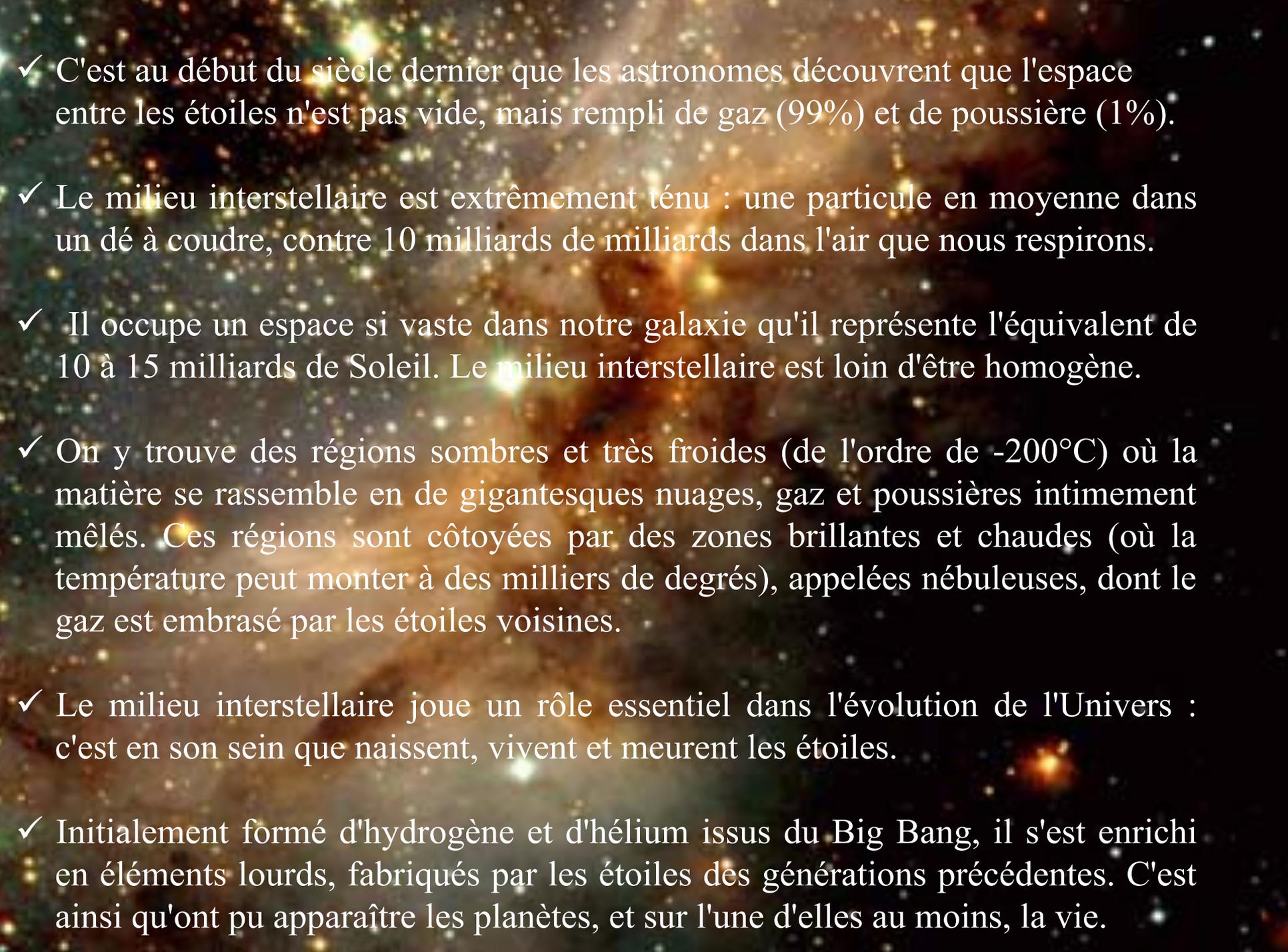




**PHYISCO-CHIMIE
DU MILIEU INTERSTELLAIRE**

- 
- ✓ C'est au début du siècle dernier que les astronomes découvrent que l'espace entre les étoiles n'est pas vide, mais rempli de gaz (99%) et de poussière (1%).
 - ✓ Le milieu interstellaire est extrêmement ténu : une particule en moyenne dans un dé à coudre, contre 10 milliards de milliards dans l'air que nous respirons.
 - ✓ Il occupe un espace si vaste dans notre galaxie qu'il représente l'équivalent de 10 à 15 milliards de Soleil. Le milieu interstellaire est loin d'être homogène.
 - ✓ On y trouve des régions sombres et très froides (de l'ordre de -200°C) où la matière se rassemble en de gigantesques nuages, gaz et poussières intimement mêlés. Ces régions sont côtoyées par des zones brillantes et chaudes (où la température peut monter à des milliers de degrés), appelées nébuleuses, dont le gaz est embrasé par les étoiles voisines.
 - ✓ Le milieu interstellaire joue un rôle essentiel dans l'évolution de l'Univers : c'est en son sein que naissent, vivent et meurent les étoiles.
 - ✓ Initialement formé d'hydrogène et d'hélium issus du Big Bang, il s'est enrichi en éléments lourds, fabriqués par les étoiles des générations précédentes. C'est ainsi qu'ont pu apparaître les planètes, et sur l'une d'elles au moins, la vie.

LE MILIEU INTERSTELLAR FROID

Nuages diffus

$T \sim 100 \text{ K} (-173^\circ \text{C})$

$n \sim 10^2 \text{ cm}^{-3}$

H

Matière atomique

Quelques diatomiques

-CO, OH, CH, CN, CH⁺



MILIEU INTERSTELLAIRE FROID

Nuages sombres

$T \sim 10 \text{ K}$ (-263° C)

$n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$

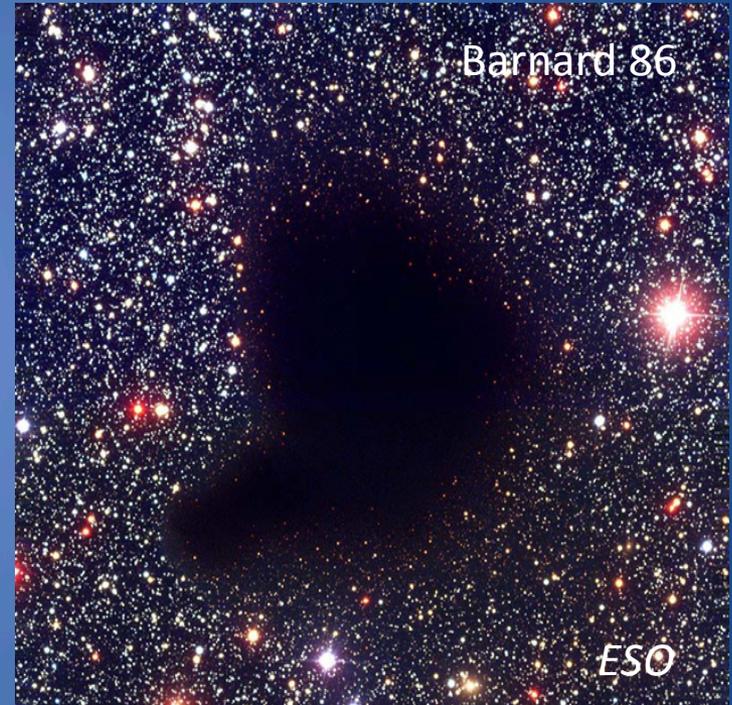
H_2

Espèce moléculaires

Masse: 1 – 500 masse solaire

Taille: $\sim 1\text{-}5 \text{ pc}$

Formation d'étoiles de faible masse (notre soleil)



MILIEU INTERSTELLAIRE FROID

Nuages moléculaires géants

$T \sim 10-50 \text{ K}$

$n \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

H_2

Espèces moléculaires

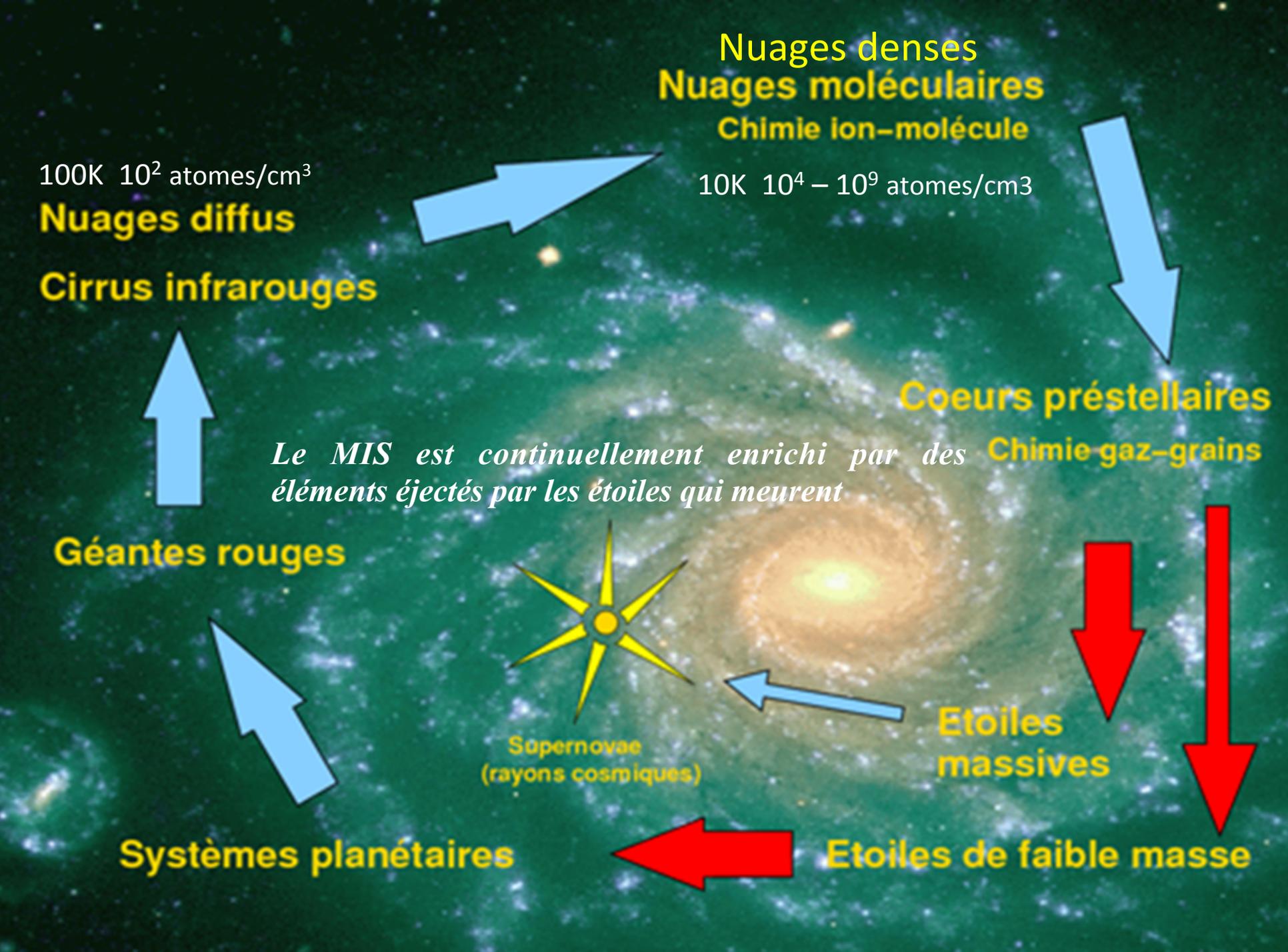
Les objets les plus massifs de notre galaxie

Masse: 1 million masse solaire

Taille: $\sim 50 \text{ pc}$

Formation d'étoiles de faible masse et d'étoiles massives.





Nuages denses
Nuages moléculaires
Chimie ion-molécule

10K 10⁴ – 10⁹ atomes/cm³

100K 10² atomes/cm³
Nuages diffus

Cirrus infrarouges

Coeurs préstellaires
Chimie gaz-grains

Le MIS est continuellement enrichi par des éléments éjectés par les étoiles qui meurent

Géantes rouges

Supernovae
(rayons cosmiques)

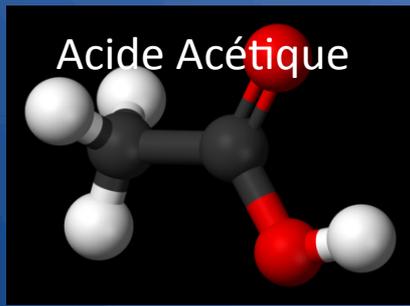
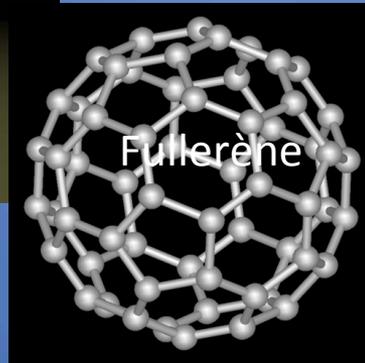
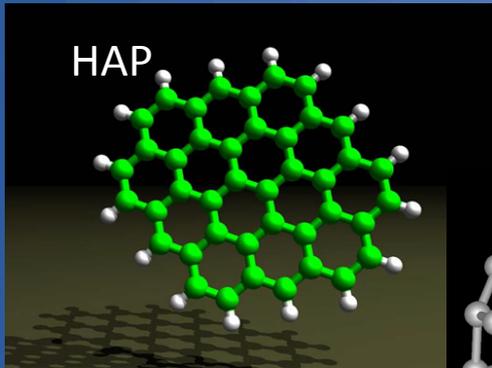
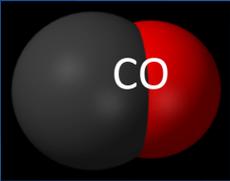
Etoiles massives

Systèmes planétaires

Etoiles de faible masse

CHIMIE DU MILIEU INTERSTELLAIRE

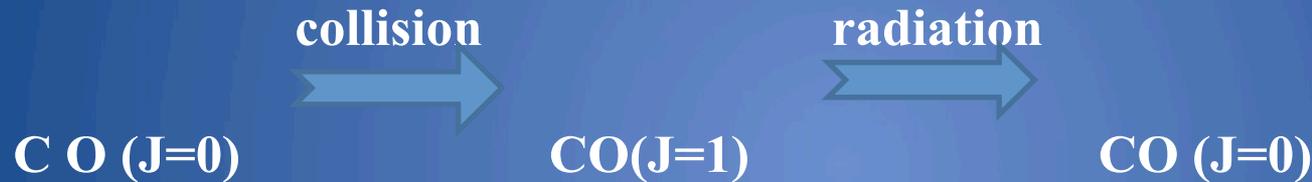
H_2



Pourquoi cet intérêt pour les molécules les grains et les glaces de l'espace

✓ Les molécules sont utilisées pour diagnostiquer la température (T_{kin}) la densité (n_{H}) et le champ de radiation caractérisant les objets où elles sont observées

✓ Les molécules refroidissent le milieu

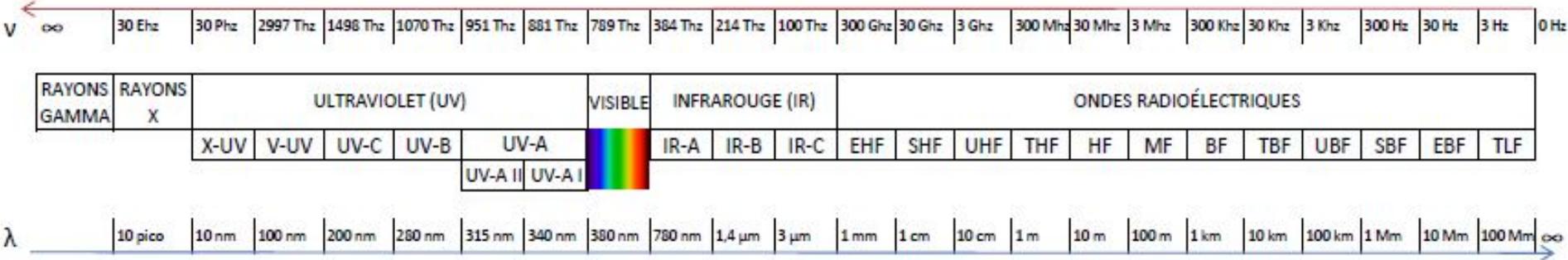


La radiation s'échappe du nuage → il se refroidit

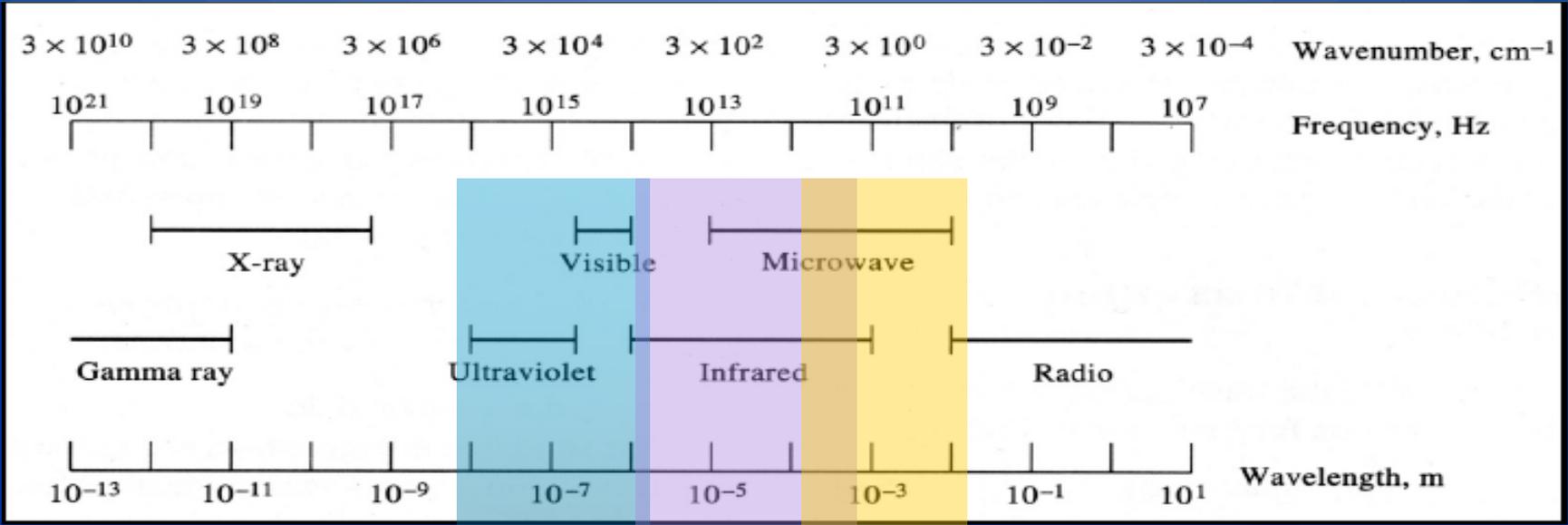
✓ Les grains sont les briques des corps solides (planétésimaux, ..., planètes)

✓ Les grains protègent les molécules des photons destructeurs UV/Visibles

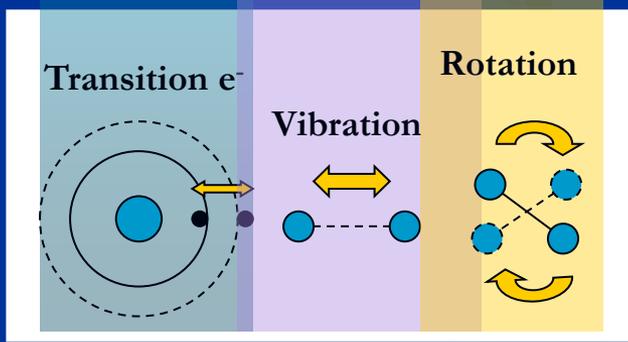
✓ Grains et glaces jouent le rôle de catalyseur pour former les molécules plus complexes

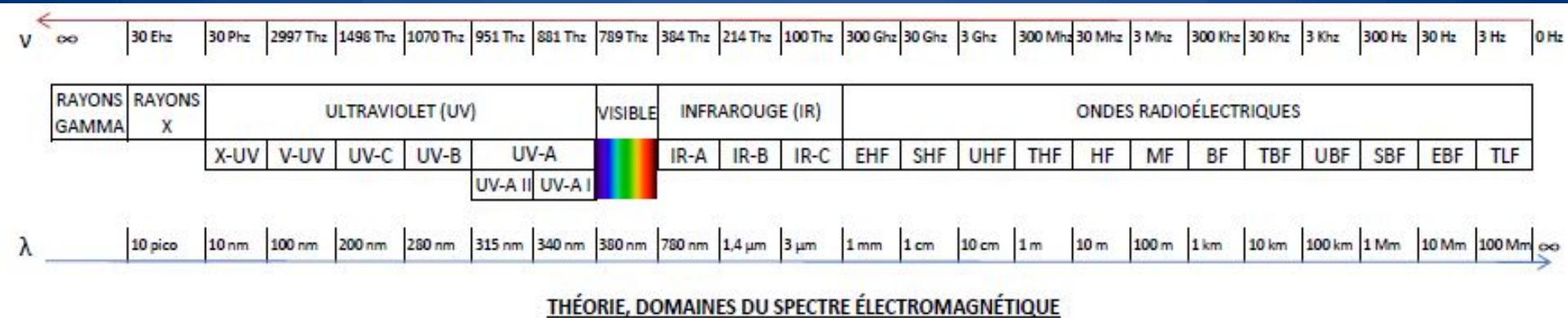


THÉORIE, DOMAINES DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



Interaction
Rayonnement-Matière





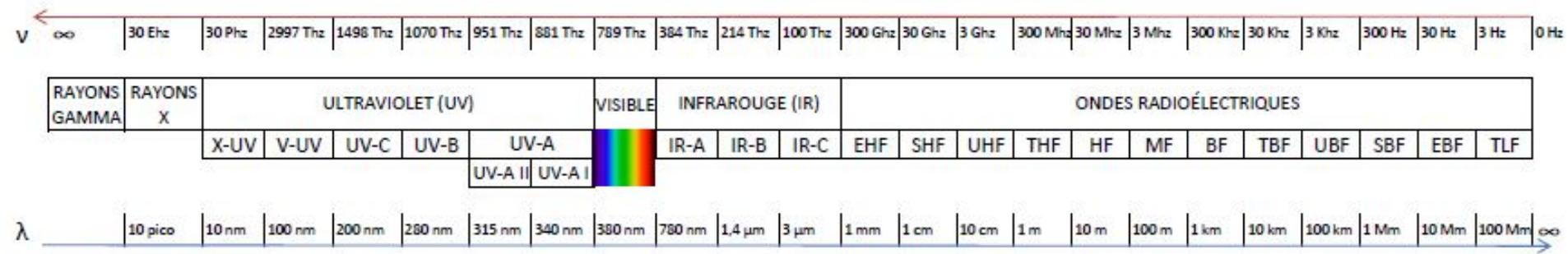
Historique des découvertes moléculaires

1937-1940 : premières molécules identifiées dans le visible

✓CH: Swings & Rosenfeld 1937

✓CN: McKellar 1940

✓CH⁺: Douglas & Herzberg 1941



THÉORIE, DOMAINES DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Radioastronomie centimétrique

- ✓ HI @ 21 cm: Ewen & Purcell 1951; Oort & Muller 1951
- ✓ OH @ 18 cm: Weinreb et al. 1963
- ✓ NH₃ @ 1 cm: Cheung, Townes et al. 1968
- ✓ H₂O @ 1 cm (22 GHz): Cheung et al. 1969

Ultra Violet

- ✓ 1970: H₂

Radioastronomie Millimétrique

- ✓ CO : 1970

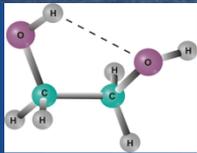
à partir de 1970 boume des découvertes moléculaires

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms
H ₂	C ₃	c-C ₃ H	C ₅	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ C ₅ N	HC ₉ N
AlF	C ₂ H	I-C ₃ H	C ₄ H	I-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO	CH ₃ C ₆ H
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄ [*]	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	(CH ₂ OH) ₂	
C ₂ ^{**}	C ₂ S	C ₃ O	I-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N	C ₇ H	CH ₃ CH ₂ OH	CH ₃ CH ₂ CHO	
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	CH ₃ CHO	H ₂ C ₆	HC ₇ N		
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	H ₂ CCN	CH ₃ OH	CH ₃ NH ₂	CH ₂ OHCHO	C ₈ H		
CN	HCO	NH ₃	CH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O	I-HC ₆ H (?)	CH ₃ C(O)NH ₂		
CO	HCO ⁺	HCCN	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	H ₂ CCHOH	CH ₂ CHCHO (?)			
CO ⁺	HCS ⁺	HCNH ⁺	HC ₂ NC	HC ₂ CHO	C ₆ H [⊖]	CH ₂ CCHCN	C ₈ H ⁻		
CP	HOC ⁺	HNCO	HCOOH	NH ₂ CHO		NH ₂ CH ₂ CN	CH ₂ CHCH ₃		
SiC	H ₂ O	HNCS	H ₂ CNH	C ₅ N					
HCl	H ₂ S	HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O	I-HC ₄ H (?)					
KCl	HNC	H ₂ CO	H ₂ NCN	I-HC ₄ N					
NH	HNO	H ₂ CN	HNC ₃	c-H ₂ C ₃ O					
NO	MgCN	H ₂ CS	SiH ₄	H ₂ CCNH (?)					
NS	MgNC	H ₃ O ⁺	H ₂ COH ⁺	C ₅ N ⁻		12 atoms		13 atoms	
NaCl	N ₂ H ⁺	c-SiC ₃	C ₄ H ⁻			C ₆ H ₆ (?)		HC ₁₁ N	
OH	N ₂ O	CH ₃ [*]	CNHCO			C ₂ H ₅ OCH ₃ (?)			
PN	NaCN	C ₃ N ⁻							
SO	OCS	HCNO							
SO ⁺	SO ₂								
SiN	c-SiC ₂								
SiO	CO ₂								
SiS	NH ₂								
CS	H ₃ ⁺								
HF	H ₂ D ⁺ , HD ₂ ⁺								
SH	SiCN								
HD	AiNC								
FeO (?)	SiNC								
O ₂ (?)	HCP								
CF ⁺	CCP								
SiH (?)									
PO									
AlO									

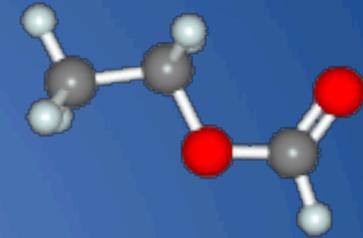
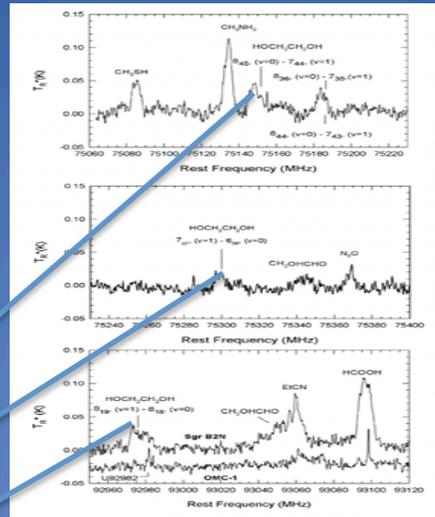


Plus de 200 molécules détectées

Radioastronomie Millimétrique



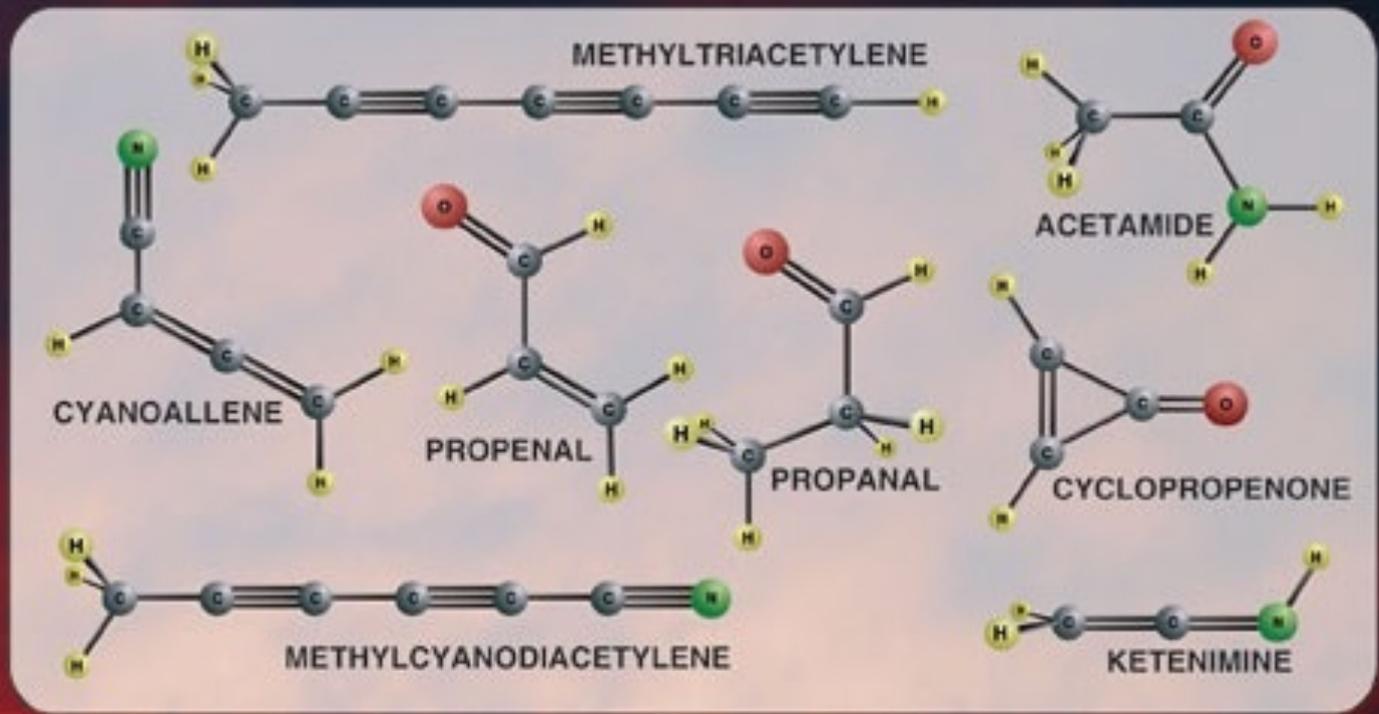
Ethylene glycol



Ethyle formate



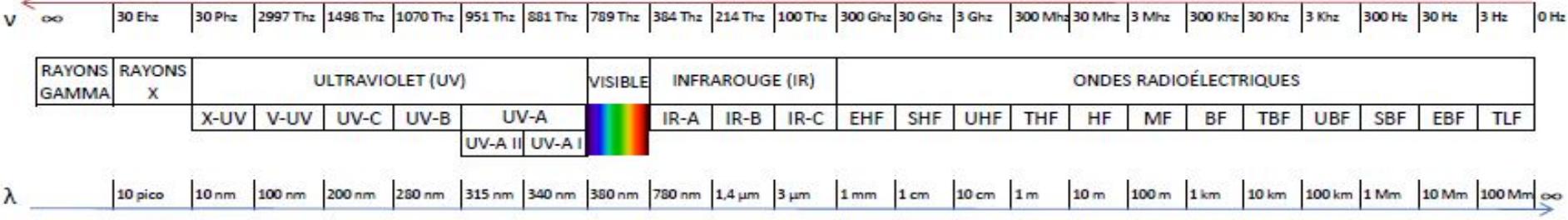
Observations au sol



Complexité des molécules dans l'espace

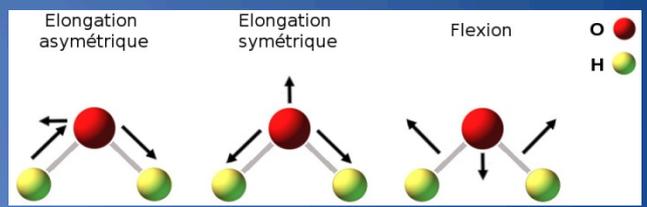
Green Bank Telescope (100m) – Hollis et al.

Détection à l'IRAM (30m) de l'aminonitrile $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$
Précurseur possible de la glycine (acide aminé le plus simple)



THÉORIE, DOMAINES DU SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Développement de l'IR grâce aux télescopes spatiaux



1983: IRAS

- ✓ Premier survey du ciel à 12, 25, 60 et 100 μ m
- ✓ Propriétés des poussières
- ✓ Découvertes de petites poussières (10-100 Å) ou de large molécules (HAP?)

1995: ISO

- ✓ Premiers spectres IR entre 2-200 μ m
- ✓ Nature et composition des grains
- ✓ Molécules sans dipôles : C_6H_6 , CH_3 , C_2H_4 , CO_2 ,...

2003: Spitzer

Ci dessus avec plus de résolution et précision

2009: Herschel

Spectroscopie IR spatiale

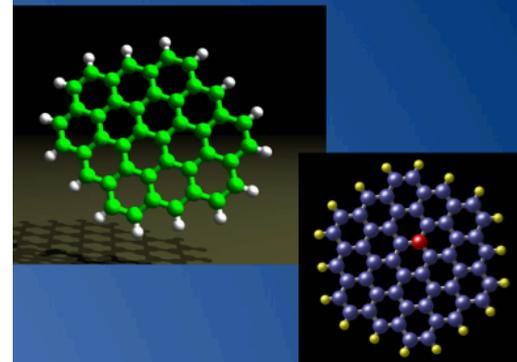
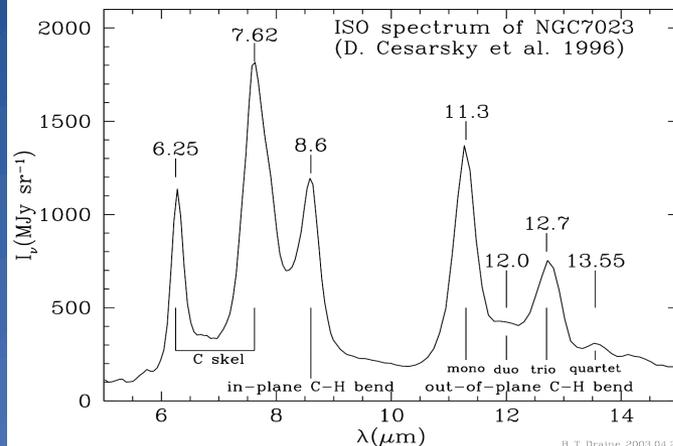
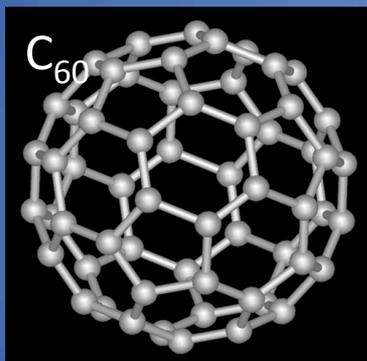
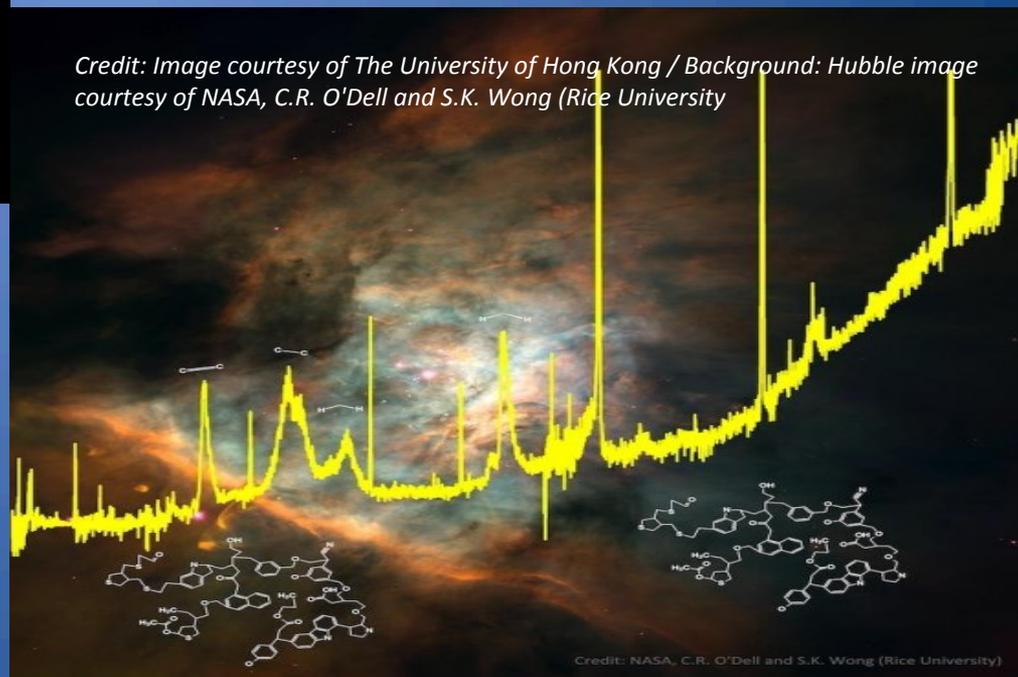
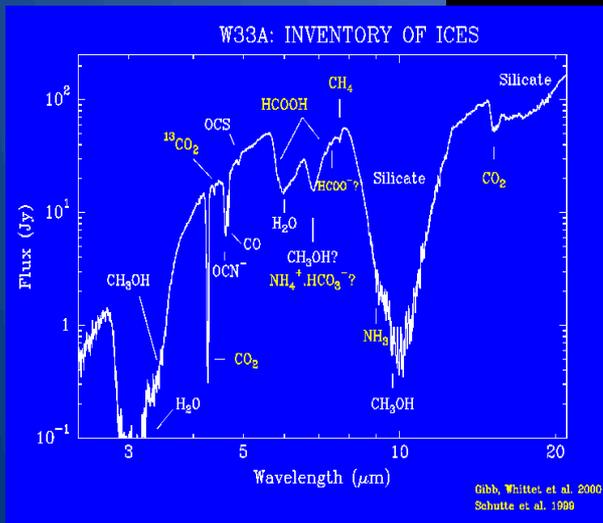


Figure 6: PAH emission features in the 5–15 μm spectrum of the reflection nebula NGC 7023.

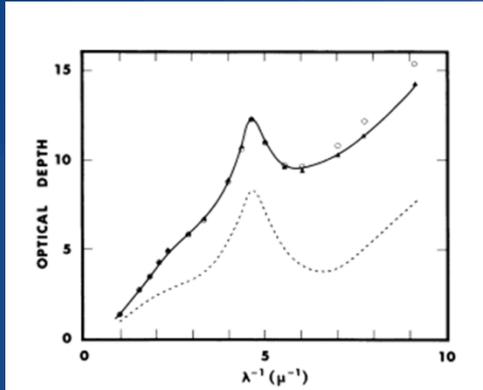


Credit: Image courtesy of The University of Hong Kong / Background: Hubble image courtesy of NASA, C.R. O'Dell and S.K. Wong (Rice University)



Les grains sont une composante importante de la matière interstellaire et circumstellaire

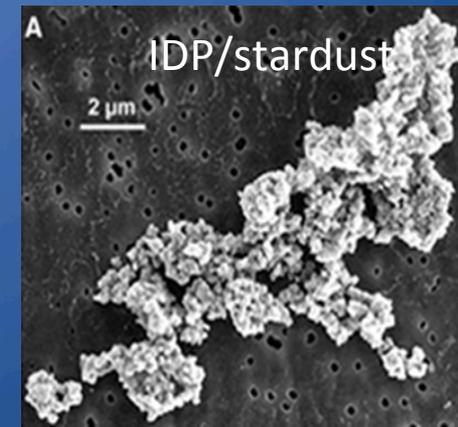
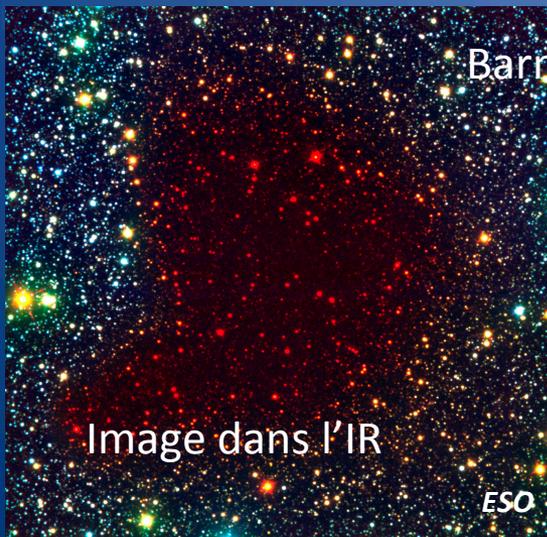
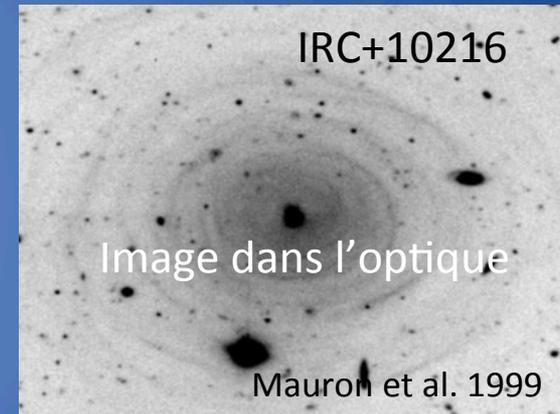
Même si la masse des grains /masse du gaz ~ 0.01



à l'origine de la courbe d'extinction

→ extinction UV : petits grains(100 nm)

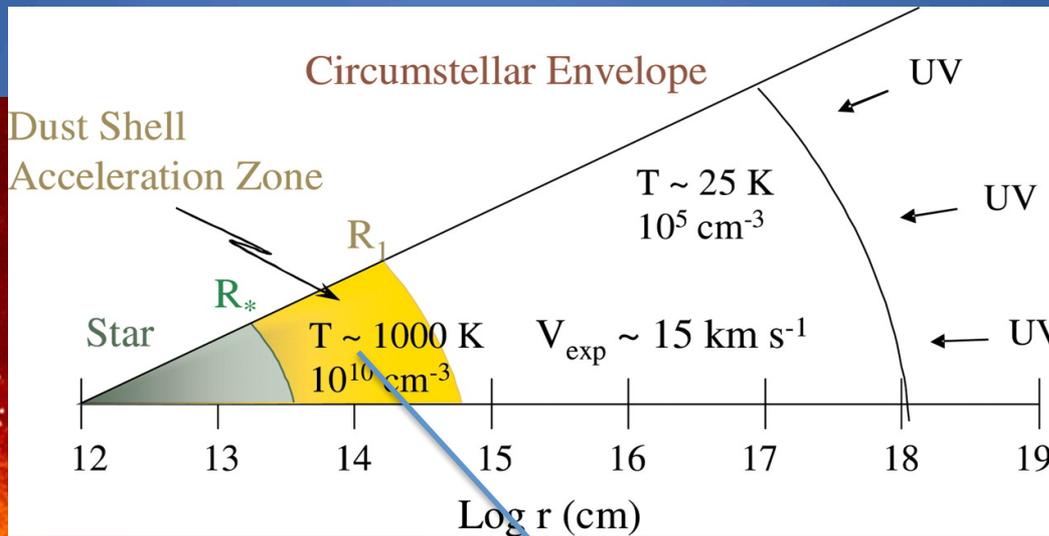
→ extinction Visible : plus gros grains(1000 nm)



Les grains du milieu interstellaire

Les Silicates et alumina: formés dans les étoiles riches en oxygènes

Les grains Carbonés : formés dans les étoiles riches en carbone

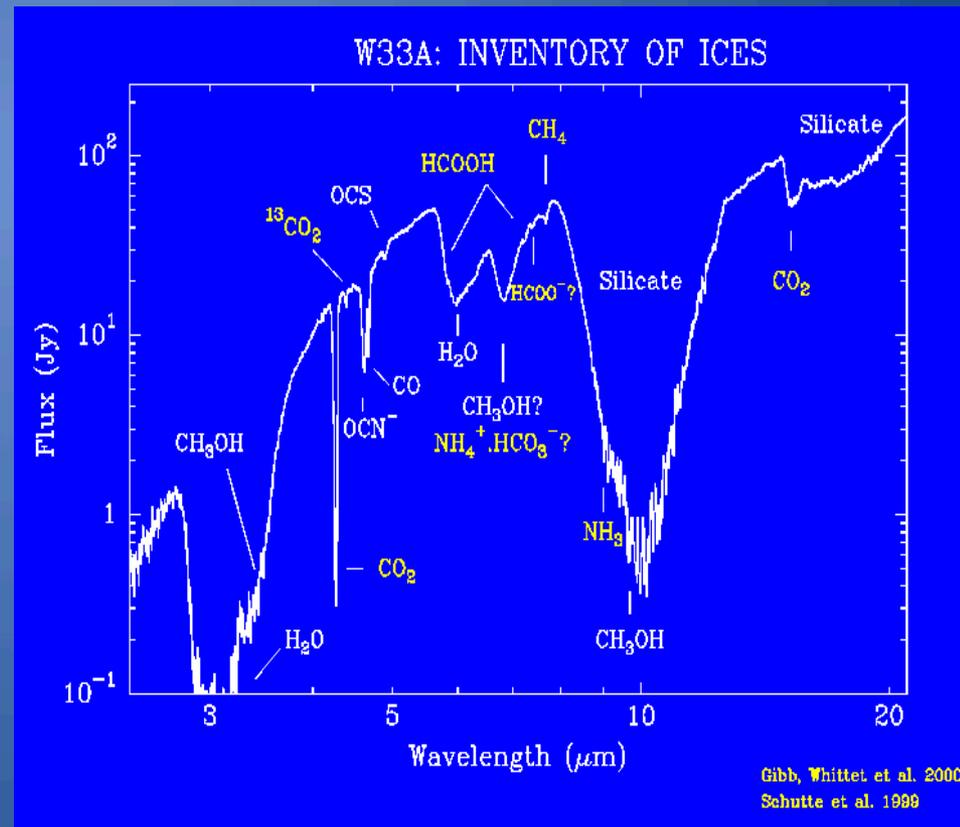
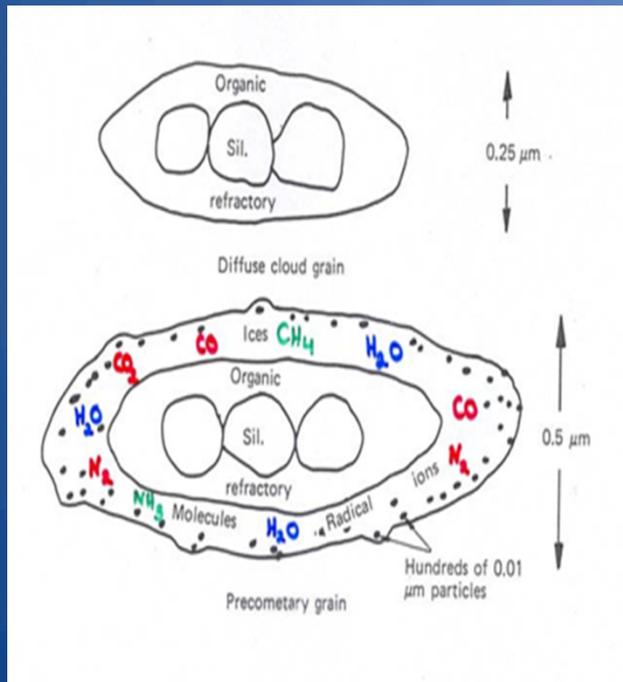


Formation des poussières carbonées
chimie de combustion

IRC+10216

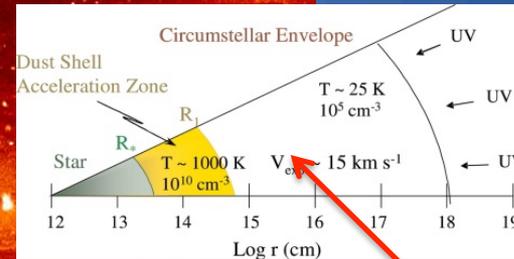
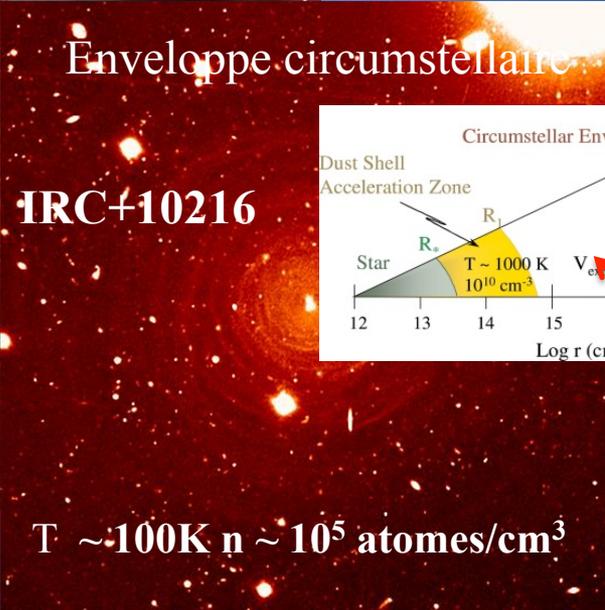
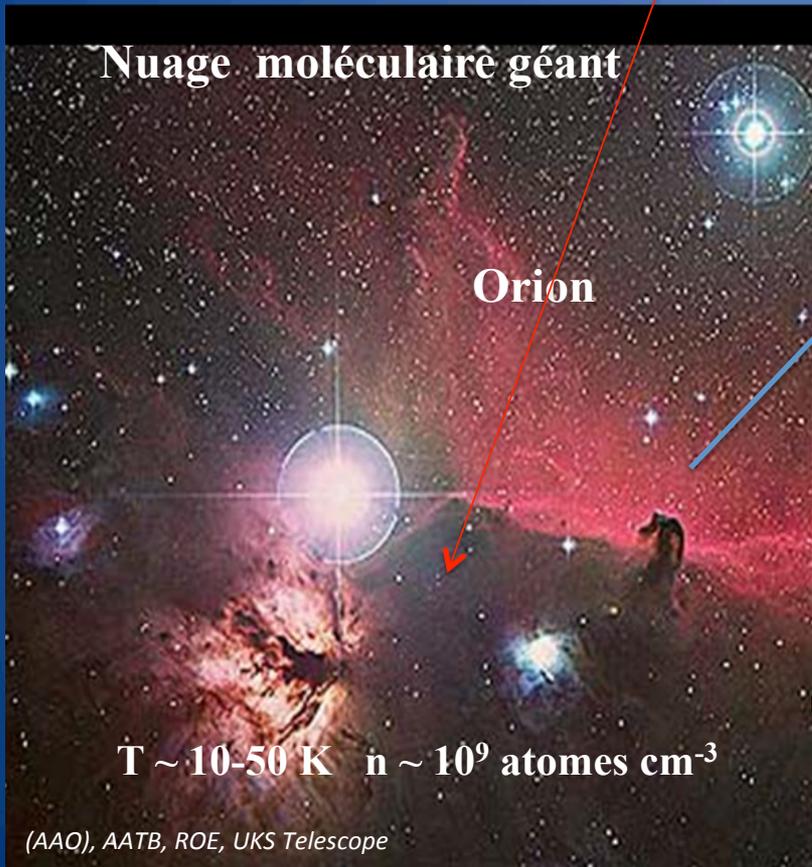
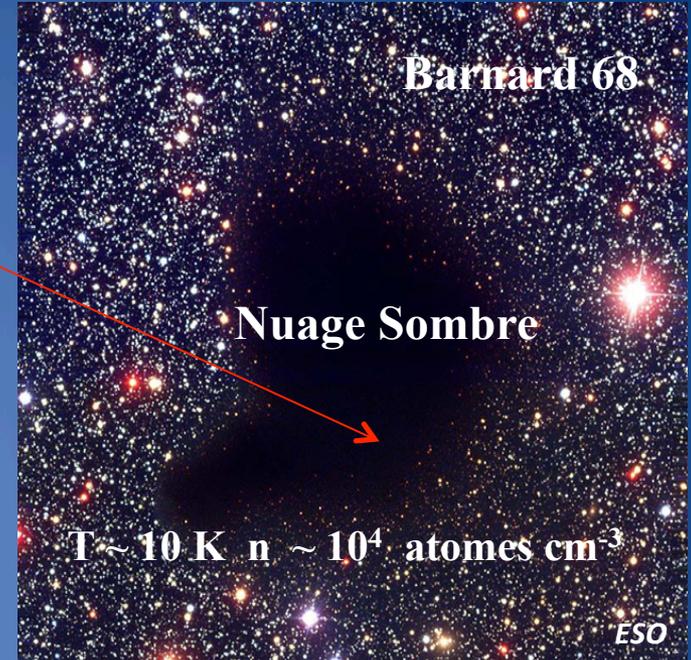
Les grains du milieu interstellaire

Glaces : formées dans les nuages froids (T_g 10K) par condensation de molécules simples sur les grains silicatés ou carbonés



Mais où trouve t'on les molécules ?

Nuages non pénétrés par les photons UV
grâce aux grains qui font écran et permettent aux
molécules complexes de survivre car protégées



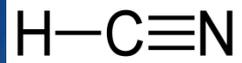
Zone moléculaire

Diversité des molécules dans l'espace !

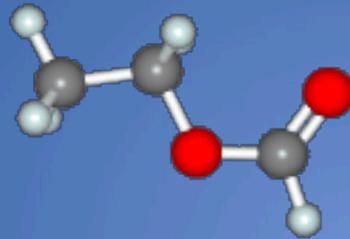


Plus de 200 molécules détectées dans le milieu interstellaire

✓ ordinaires



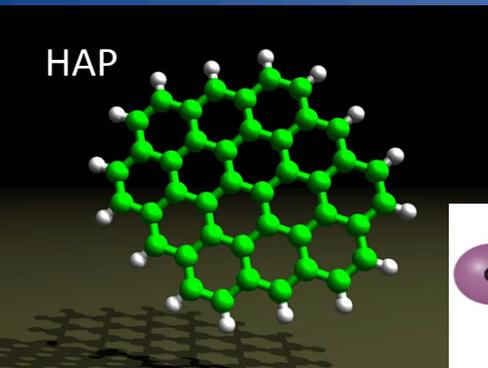
Cyanure d'hydrogène



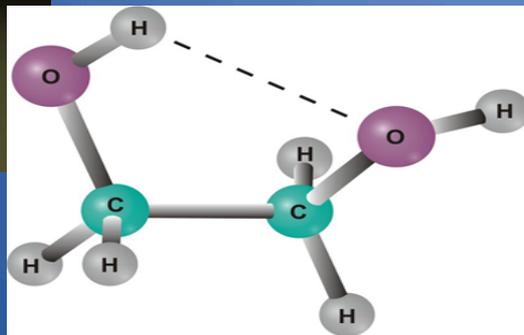
Ethyle formate
esther

- ✓ exotiques : HNC , C_3 , C_4 , HC_{13}N
- ✓ radicaux (20%) : C_2H
- ✓ ions (10%) : H_3^+ , HCO^+
- ✓ anions : C_4H^- , C_6H^-

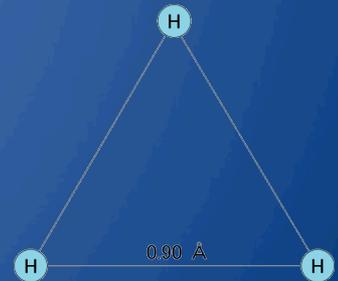
C-C-C-C



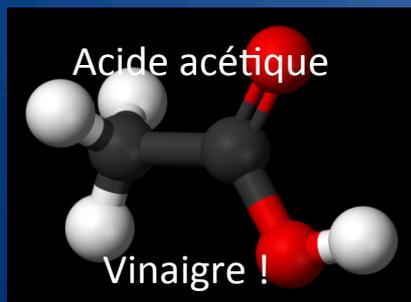
cyanopolyynes



Ethylène glycol
antigel !



C-C-C-C-C-C-H⁻



Différences entre la chimie interstellaire et la chimie terrestre

- ✓ Les densités : le vide : $n \sim 100 - 10^4 \dots 10^9$ atomes/cm³
à comparer à $n \sim 3 \cdot 10^{19}$ atomes/cm³
- ✓ Températures extrêmes $\sim 10 - 100$ K
et $T \sim 300$ K sur terre
- ✓ Echelles de temps
 - Temps de collision ~ 1 mois dans un nuage dense
 - Temps chimique ~ 100 mille ans !

Mais !

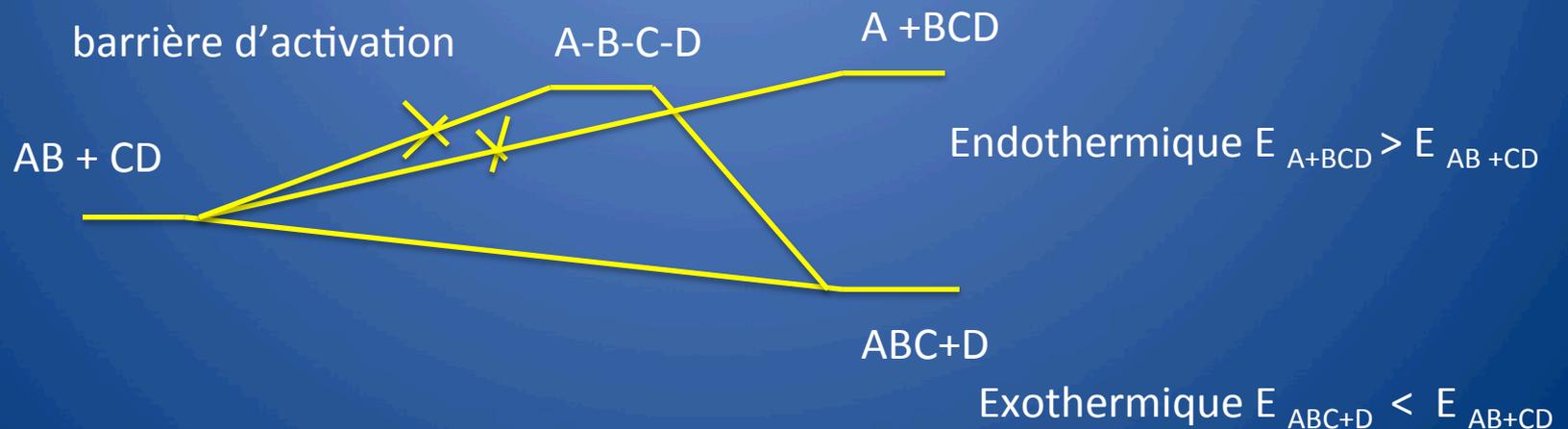
- ✓ Echelles de temps
 - Temps de vie d'un nuage ~ 10 millions d'années
 - Formation d'une étoile ~ 1 million d'années
- ✓ Exposition à divers sources d'énergie
 - radiations: IR (grains), UV (étoiles), rayons cosmiques : $\zeta \sim 2 \cdot 10^{-17} \text{ s}^{-1}$, rayons X
 - chocs, turbulence

Différences entre la chimie interstellaire et la chimie terrestre

- Faibles densités : réactions en phase gazeuse bi-moléculaires

- Basses températures :

- Nuages denses $\sim 10\text{K}$: réaction exothermiques et sans barrière d'activation
- Nuages diffus $\sim 100\text{K}$: réactions endothermiques et avec barrière d'activation si chocs et turbulence
- Régions exposées aux UV (bords des nuages sombres) réaction photochimiques



Modélisation astrochimique

1-Modèle astrochimique

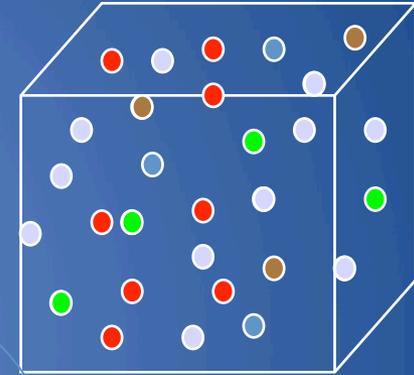
Paramètres

Température (K)

Densité (cm^{-3})

Abondances élémentaires

Champs de radiation (UV, X, RC)



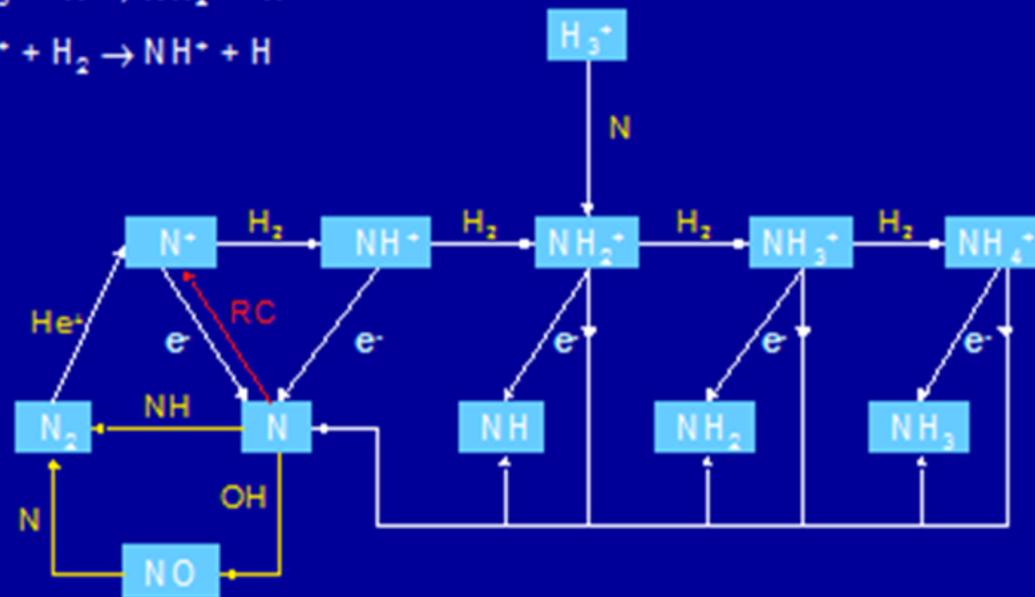
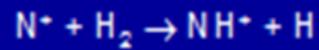
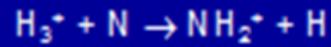
Réseau chimique

Réseau de réactions qui prend en compte toutes les voies de formation et de destruction des molécules *observées tenant compte des faibles densités et des basses températures qui imposent des règles à la chimie.*

pour les nuages denses c'est plus de 8600 réactions mettant en jeu 568 espèces

Modélisations chimiques

Formation de NH_3 et des hydrures d'azote



Exemple d'un réseau de réactions couplées

Modélisation astrochimique

Point de départ de la chimie dans le milieu interstellaire: l'ionisation

Dans les nuages denses ce sont les rayons cosmiques qui initient l'ionisation



note :



La chimie interstellaire est efficace car He^+ ne réagit pas avec H_2

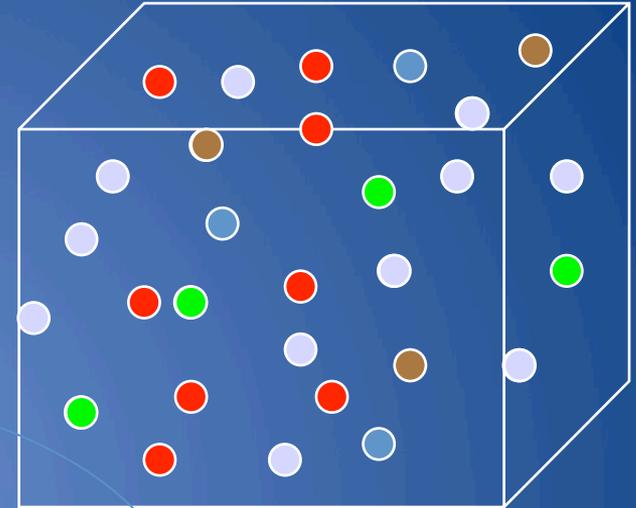
Dans les nuages diffus



Modélisation astrochimique

réactions ion-molecule		
protonation	$H_3^+ + AB \rightarrow ABH^+ + H_2$	
addition	$ABH^+ + C \rightarrow ABC^+ + H$	
réactions de recombinaison électronique		
radiative	$ABC^+ + e \rightarrow ABC + h\nu$	
dissociative	$ABC^+ + e \rightarrow AC + B$	
attachement électronique	$A + e \rightarrow A^-$ ou $AB + e \rightarrow A^- + B$	
réactions neutre-neutre		
addition	$AB + CD \rightarrow ABC + D$	
association radiative	$A + B \rightarrow AB + h\nu$	
processus photochimiques		
photo dissociation	$AB + h\nu \rightarrow A + B$	
photo ionisation	$AB + h\nu \rightarrow AB^+ + e$	
autres		
transfer de charge	$A^+ + B \rightarrow B^+ + A$	
neutralization	$A^+ + B^- \rightarrow AB$	
reactions anion-neutre	$A^- + B \rightarrow AB + e$ ou $A^- + BC \rightarrow AB^- + C$	

Modélisation astrochimique



1 - modèle astrochimique

Paramètres

Température (K)

Densité (cm^{-3})

Abondances élémentaires

Champs de radiation (UV, X, RC)

Réseau chimique

2 - résolution des équations cinétiques couplées pour calculer des abondances chimiques

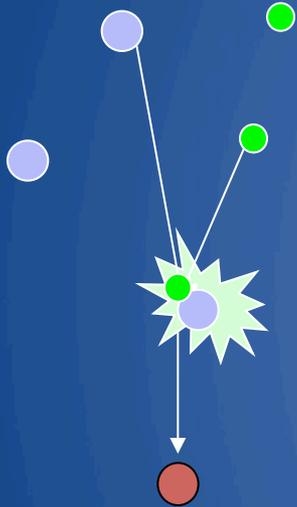
$$\frac{dn_i}{dt} = \underbrace{\sum k_{lj} n_l n_j}_{\text{Production}} - \underbrace{n_i \sum k_{ij} n_j}_{\text{Destruction}}$$

k constante de vitesse

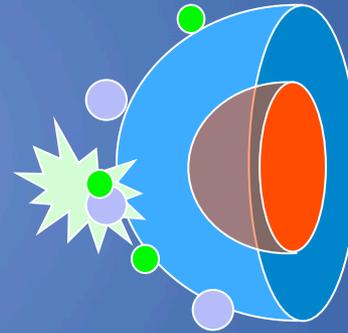
Modélisation astrochimique

Réseau chimique

Essentiellement une chimie en phase gazeuse mais aussi à la surface des grains/glaces



Chimie en phase gazeuse

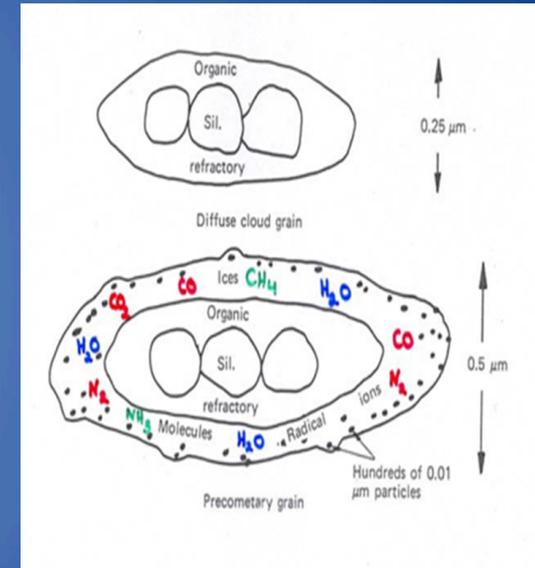
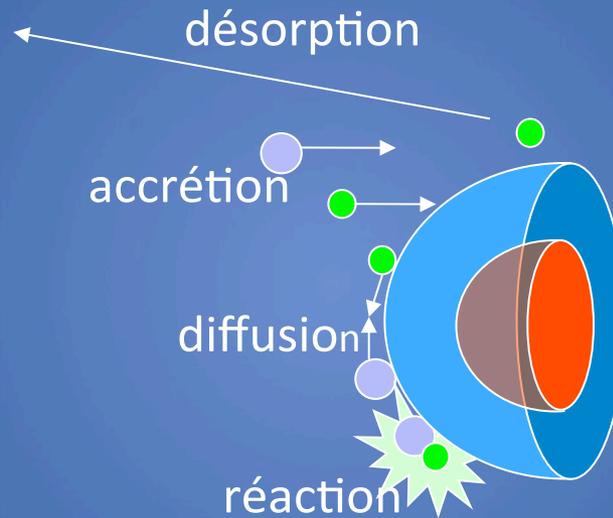


Chimie catalysée par les grains/glaces

Modélisation astrochimique

Réactions catalysées par les grains et les glaces

En phase gazeuse

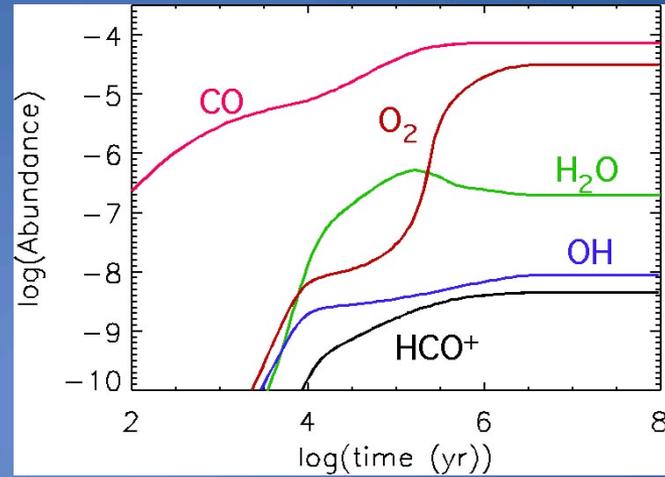
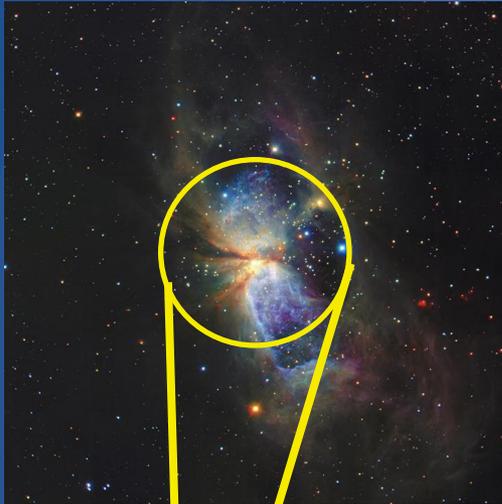


Chimie encore très mal comprise car complexe pourtant nécessaire pour expliquer la formation de H_2 et autres molécules organiques observées

Modélisation astrochimique

2-Confrontation les abondances calculées aux abondances observées

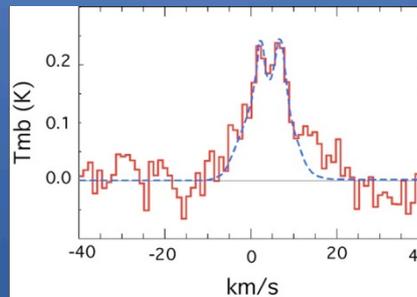
validation du réseau chimique



Chemical model

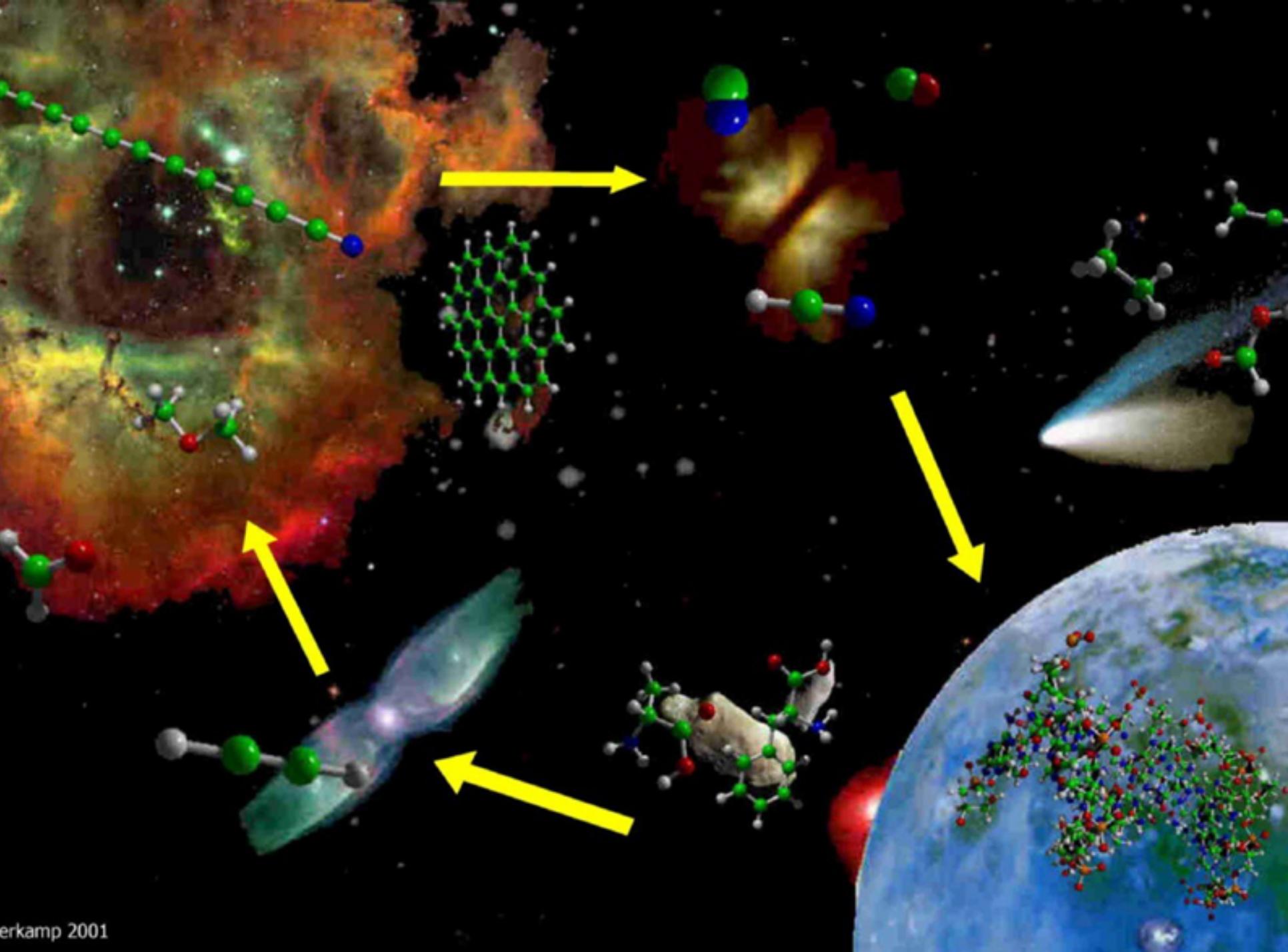


Observations



Transfert radiatif

Abondances observées



COSAC

CH_3NCO

Isocyanate de méthyle

CIVA

Polymères organiques

$\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$

Propionaldéhyde

CH_3CONH_2

Acétamide

HCN , CH_3CN , HNCO

CH_3CHO , HCONH_2 , $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$, CH_3NH_2

Molécules aussi observées dans le milieu interstellaire

CH_3COCH_3

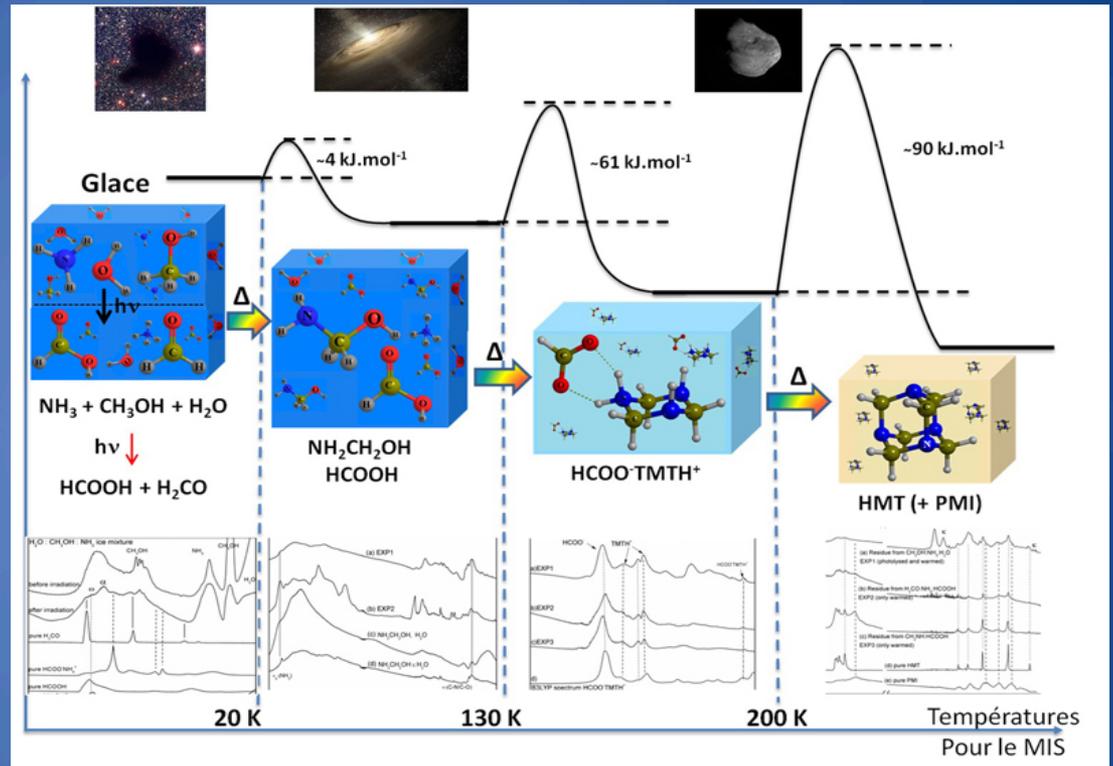
Acétone

En laboratoire

Comète artificielle : -200°C : $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 + \text{CH}_3\text{OH} + \text{irradiation UV} + \text{réchauffement}$

A partir des glaces irradiées
formation prebiotique de

- sucres
- acides aminés
- bases nucléiques



Il y a de glycine d'origine extraterrestre dans les échantillons de Wild2 rapportés par la mission Stardust.

Il y a de la glycine dans la queue de Roseta

COSAC

CH_3NCO

Isocyanate de méthyle

CIVA

Polymères organiques

$\text{C}_2\text{H}_5\text{CHO}$

Propionaldéhyde

CH_3CONH_2

Acétamide

HCN , CH_3CN , HNCO

CH_3CHO , HCONH_2 , $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$, CH_3NH_2

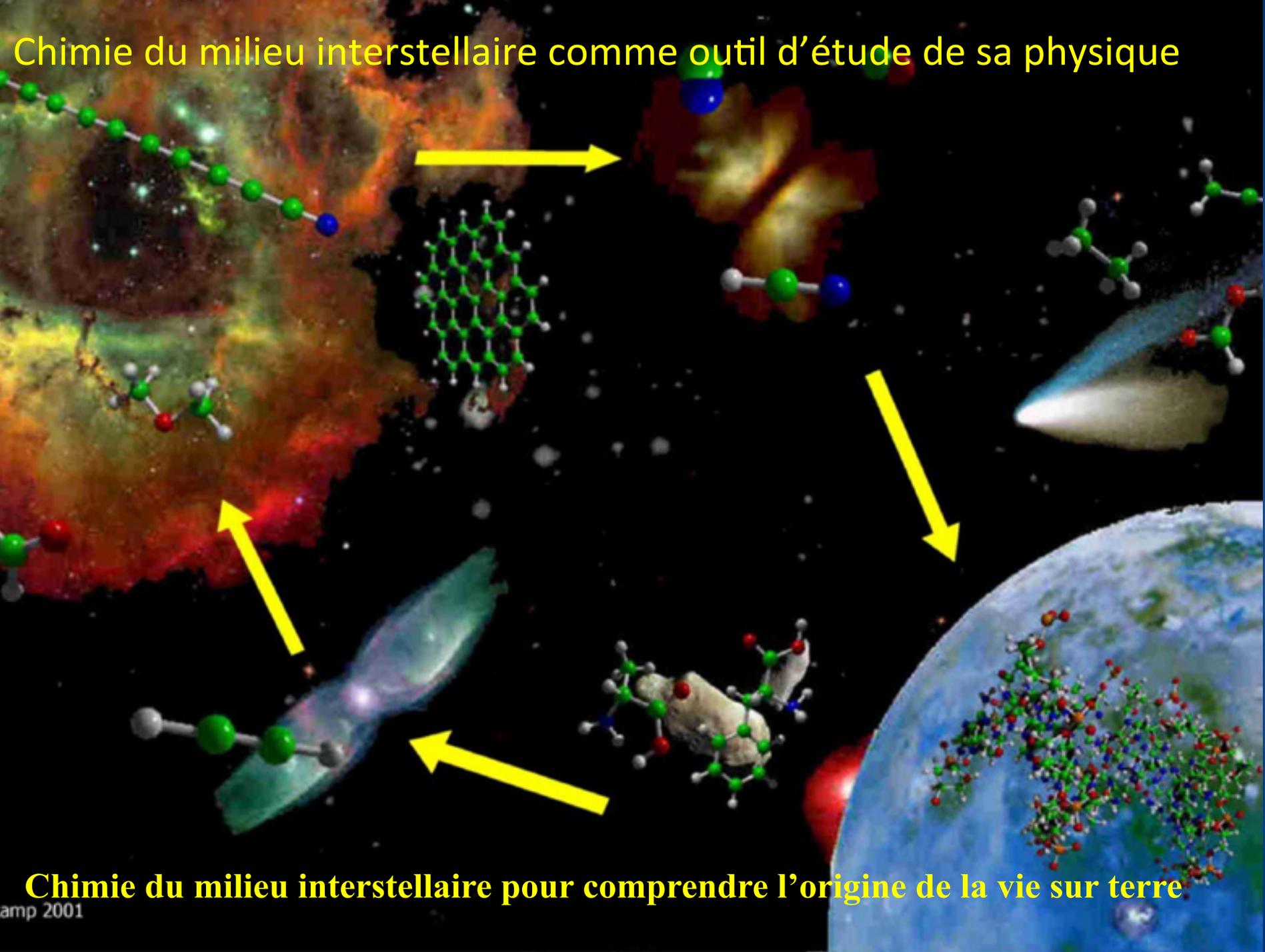
Molécules aussi observées dans le milieu interstellaire

CH_3COCH_3

Acétone

Le matériel ancestral abiotique ??

Chimie du milieu interstellaire comme outil d'étude de sa physique



Chimie du milieu interstellaire pour comprendre l'origine de la vie sur terre

Annexe

Problème des constantes de vitesses

$$dn_i/dt = \sum k_{ij} n_i n_j - n_i \sum k_{ij} n_j$$

Production Destruction

k : constante de vitesse : on n'en connaît que très peu !

- Réactions avec des espèces exotiques
- Des conditions de températures et de densités extrêmes



Astrochimie de laboratoire

Expériences de laboratoire pour mesurer ces constantes

Chimie en phase gazeuse et à la surface des grains : $T < 30\text{K}$ et $P \approx 10^{-8}$ bars
Rennes, Bordeaux, Toulouse, Marseille, Grenoble, Paris

Problème : molécules réactives souvent difficiles à isoler en laboratoire !

Astrophysique de laboratoire

L'alternative simulations numériques de chimie physique & chimie théorique

faisabilité des processus (*bilan d'énergie, barrière d'activation*)

taux de réactions et constantes de vitesses

sections efficaces (*photo absorption/ionisation/dissociation*)

Calculs théoriques dans le domaine des processus astrochimiques

Equation de Schrödinger

$$\mathbf{H} |\Psi\rangle = \mathbf{E} |\Psi\rangle$$

On fait ça aussi au LUPM