

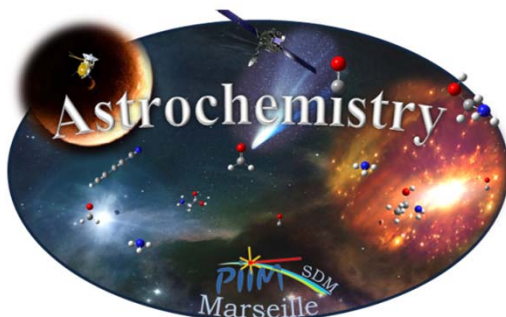
Quelle importance ont les apports exogènes pour l'exobiologie?

Grégoire DANGER , N. Abou Mrad, A. Fresneau, F. Duvernay, T. Chiavassa*
Collaborations: R. Pascal (IBMM), L. d'Hendecourt (IAS), R. Thissen (IPAG).

*Groupe Astrochimie, Equipe Spectrométries et Dynamique Moléculaire
Laboratoire Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires
UMR-CNRS 7345, Centre Saint-Jérôme, case 252
Université d'Aix-Marseille, 13397, Marseille, France

gregoire.danger@univ-amu.fr

<http://piim.univ-amu.fr/SDM-Astrochimie>



Molécules simples
(i.e. NH_3 , CO_2 , CH_4)

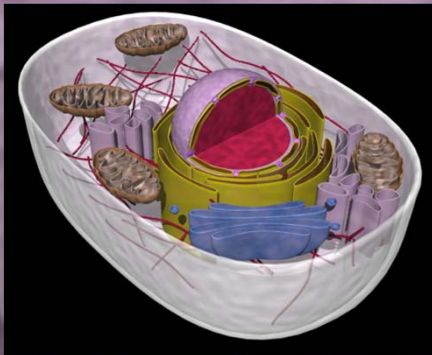


building blocks

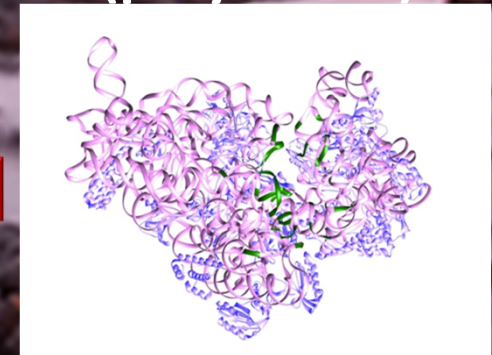
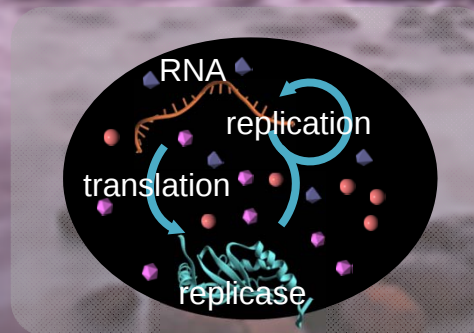


biomolecules
(polymères)

Cellule vivante



Cellule primitive



Molécules simples
(i.e. NH_3 , CO_2 , CH_4)

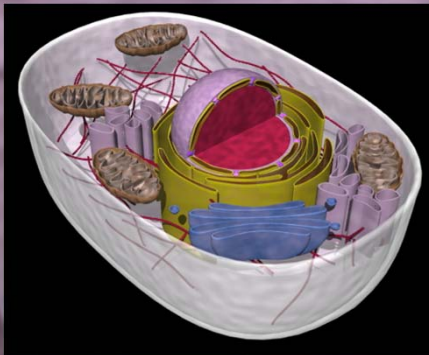


building blocks

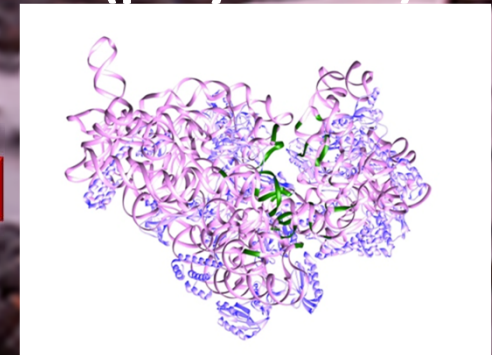
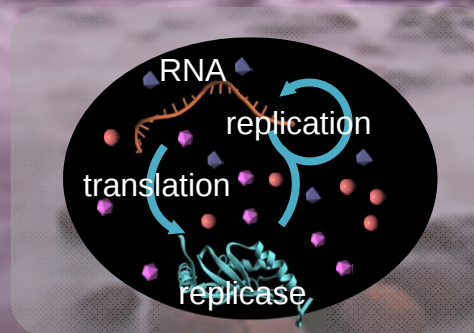


biomolecules
(polymères)

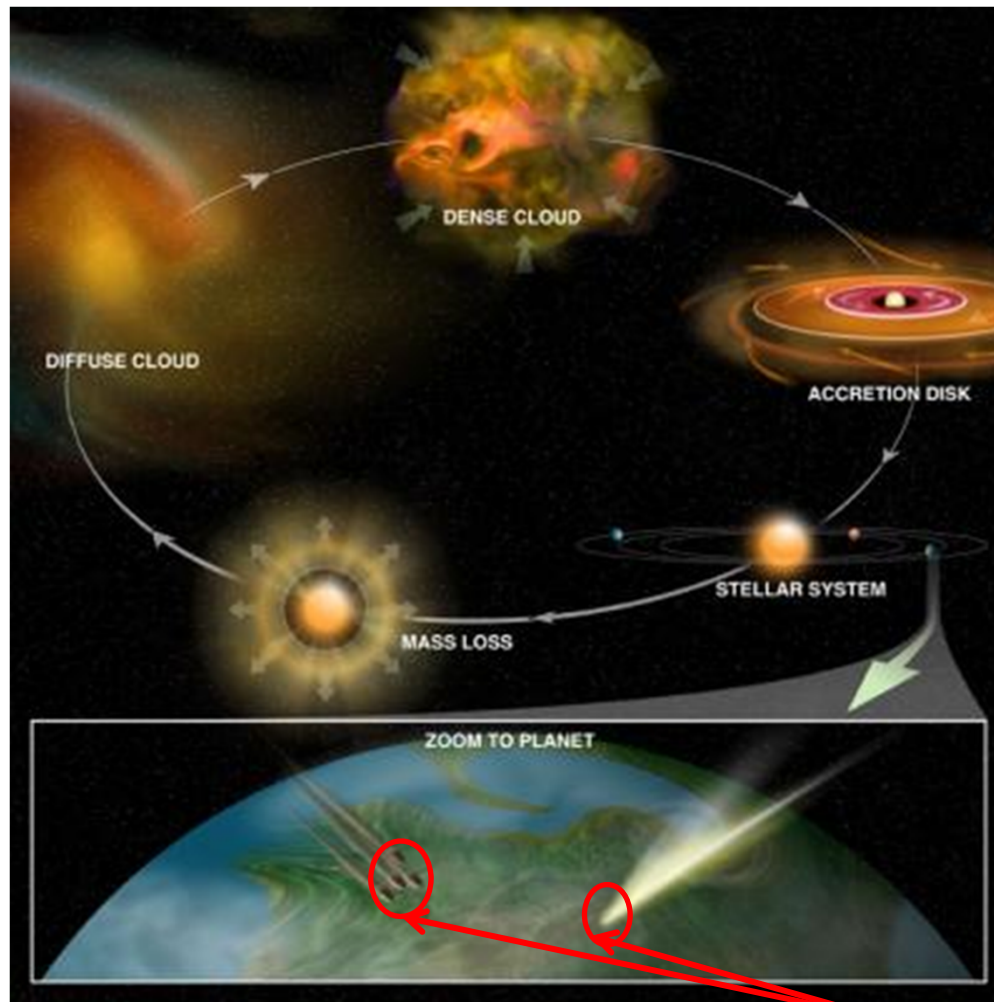
Cellule vivante



Cellule primitive



Cycle de la matière Organique



**Réservoir de matière
organique exogène**

Quels types de molécules dans les comètes?

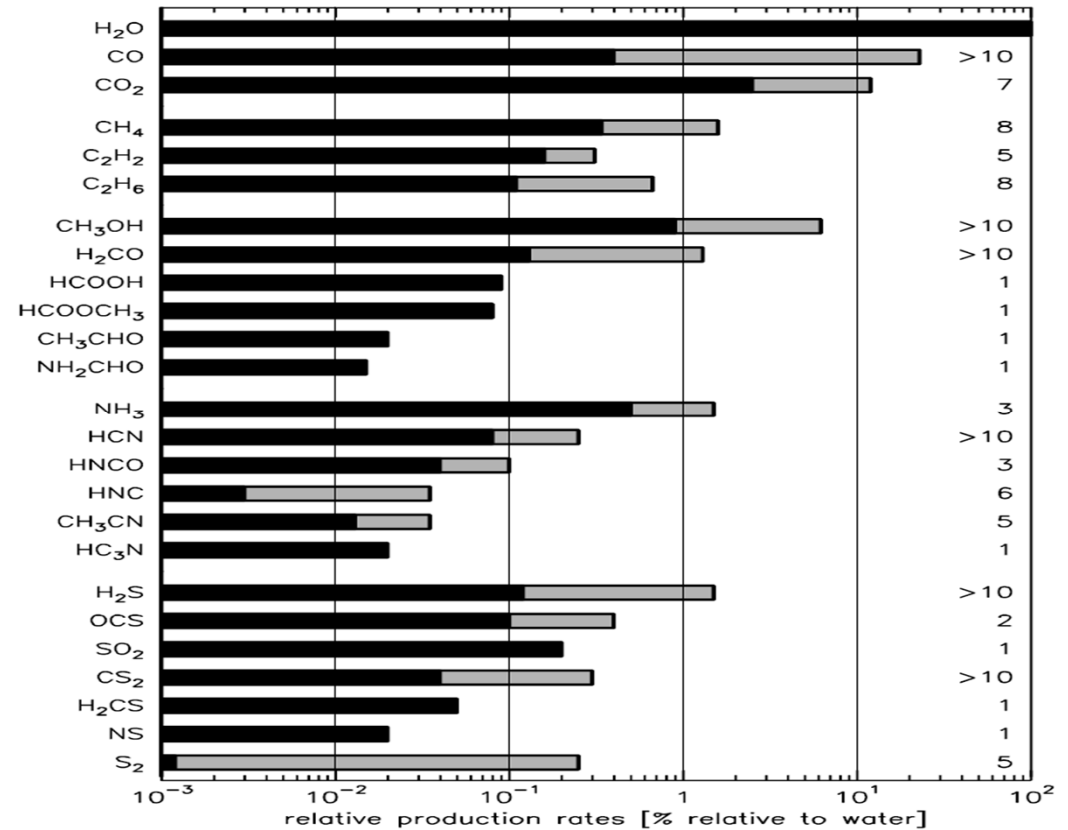


Comète Hale-Bopp



25 molécules détectées dans la coma (**gaz**)

La composition de cette
matière cométaire reflète la
composition des grains
interstellaires



Bocklée-Morvan et al., 2005

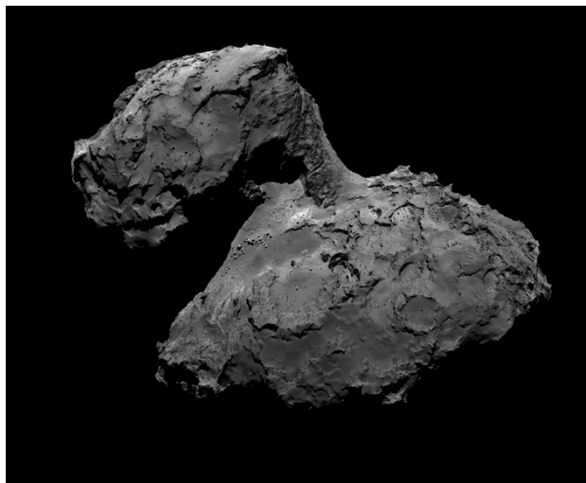
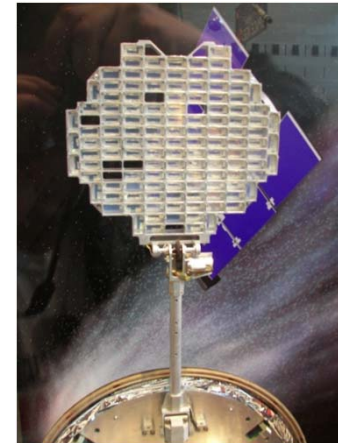
Quels types de molécules dans les comètes?



Comète Wild2

IDP collectés par Stardust (comète Wild 2)
Glycine ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) et méthylamine (CH_3NH_2)

Glavin et al., *Meteor. Planet. sci.*, **43** (2008) 399-413



Mission Rosetta en 2014

Analyse de la phase gaz (ROSINA)

Analyse de grains cométaires (COSIMA)

Analyse du noyau cométaire (COSAC)

Quels types de molécules dans les météorites?

➡ Les météorites chondritiques carbonées :



Matière Carbonée (jusqu'à 5%)

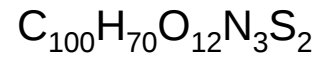
75-95% de macromolécules insolubles

5-25% de molécules solubles

L'IOM de météorites chondritiques

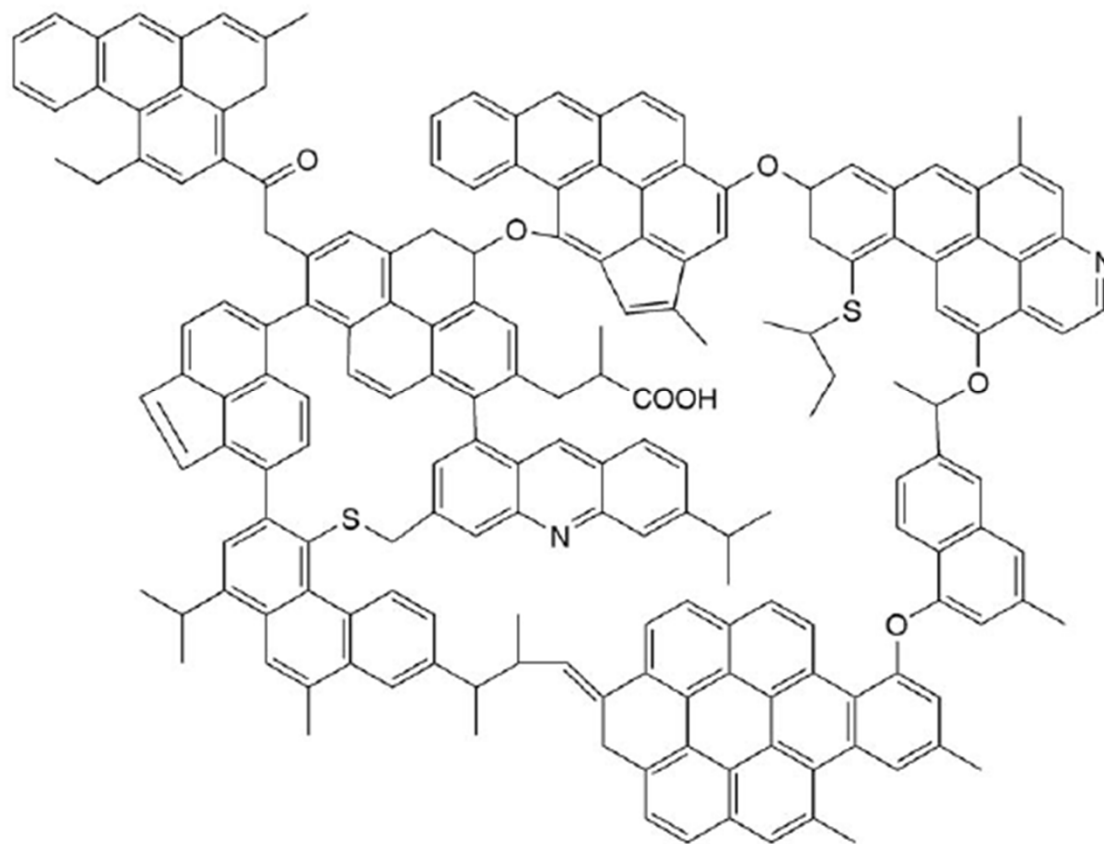
■ Matière Organique Insoluble (IOM)

IOM



H/C=0.7; O/C=0.12; N/C=0.03; S/C=0.02

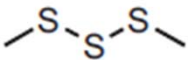
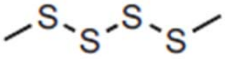
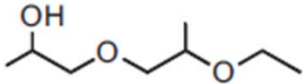
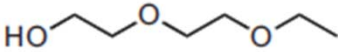
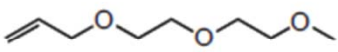
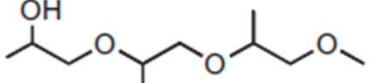
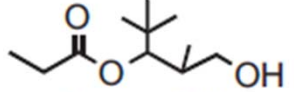
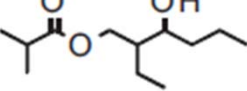
Macromolecular material: ca. 80%



L'IOM de météorites chondritiques

■ Traitement hydrothermal de l'IOM

Table 1. Aliphatic compounds detected in the hydrothermal extracts of Sutter's Mill IOM

Compound	Formula	Abun.*
Dimethyl trisulfide		++
Dimethyl tetrasulfide		++
Ethanol, 2-ethoxy		++
2-propanol, 1-(2-ethoxypropoxy)		++
Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)		+++
1-Propene, 3-[2-(2-methoxyethoxy)ethoxy]-		++
2-propanol, 1-[2-(2-methoxy-1-methylethoxy)-1-methylethoxy]		+++
Propanoic acid, 2-methyl-, 1-(2-hydroxy-1-methylethyl) 2,2-dimethylpropyl ester		++
Propanoic acid, 2-methyl-, 2-ethyl-3-hydroxyhexyl ester		+++
C5-C11 linear acids	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{3-9}-\text{COOH}$	+
C9-C16 linear acid methylesters	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{6-14}-\text{COOMe}$	+

*Approximate abundances in nanograms per milligram of extracted IOM. +++, >500; ++, 100-500; +, 10-100; +, <10; (+), <1 ng.

Analyses non ciblées sur la MOS de météorites chondritiques

- **Matière Organique Soluble (MOS)**

Analyses non ciblées sur la MOS de météorites chondritiques

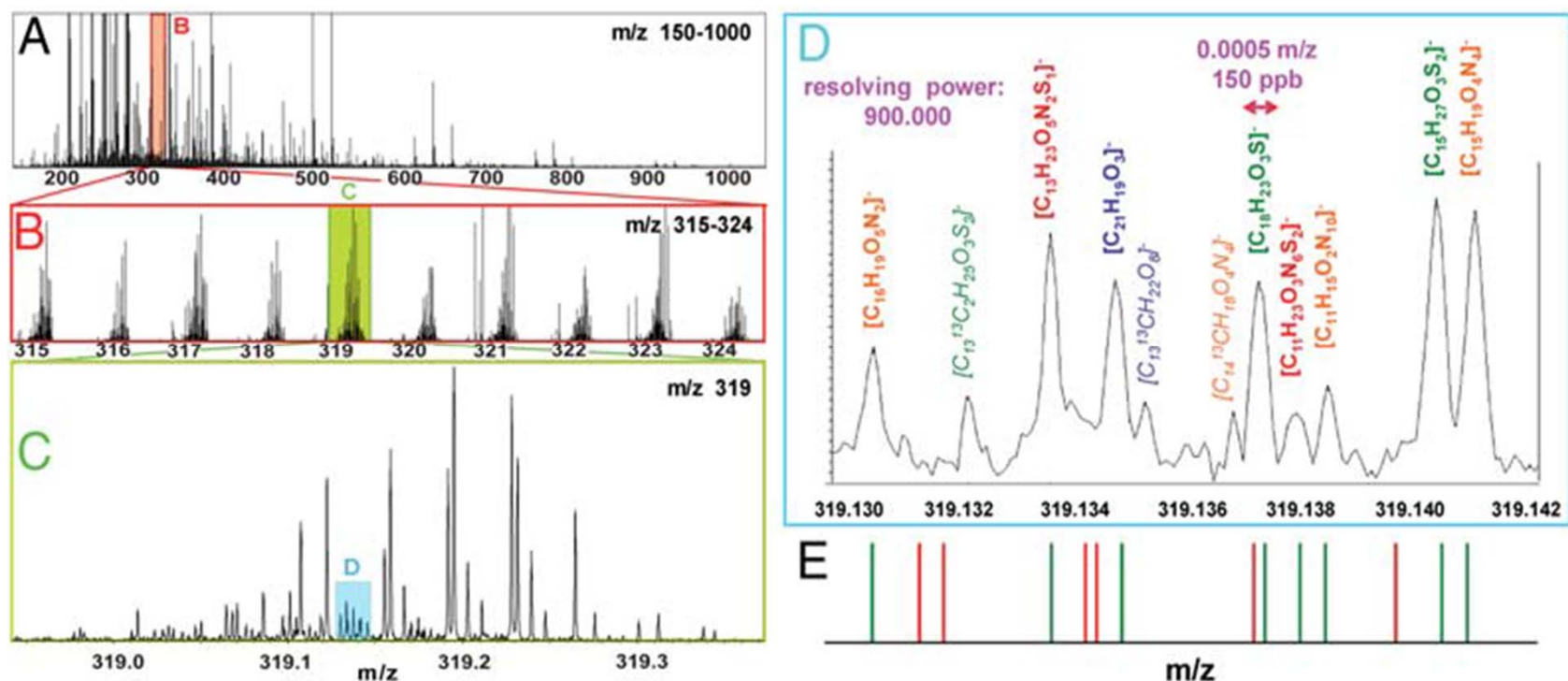
■ Matière Organique Soluble (MOS)

Analyse FT-ICR Schmitt-Koplin et al., *PNAS*, **107** (2010) 2763-2768

MOS



$\text{H/C}=1.55; \text{O/C}=0.2; \text{N/C}=0.03; \text{S/C}=0.03$



Dizaine de milliers de signaux résolus en masse (domaine de m/z=150 à 1000)



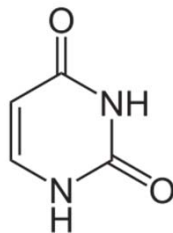
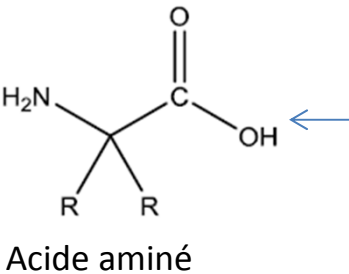
Diversité Moléculaire Disponible

Analyses ciblées sur la MOS de météorites chondritiques

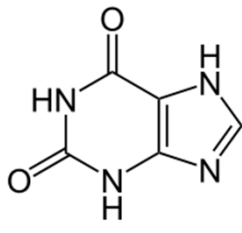
■ Matière Organique Soluble (MOS)



Traitement: extraction (H₂O, 100°C;
hydrolyse HCl 6M) et dérivation



Nucléobase : uracile



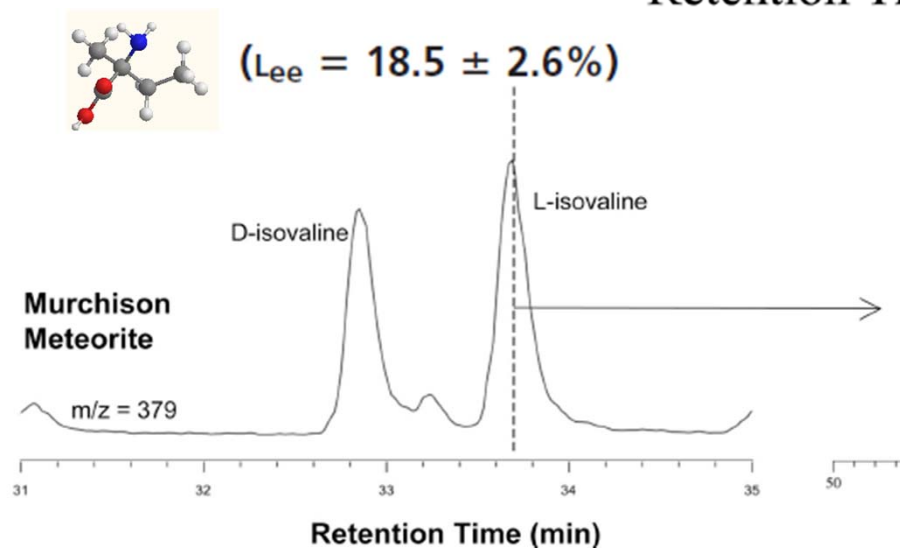
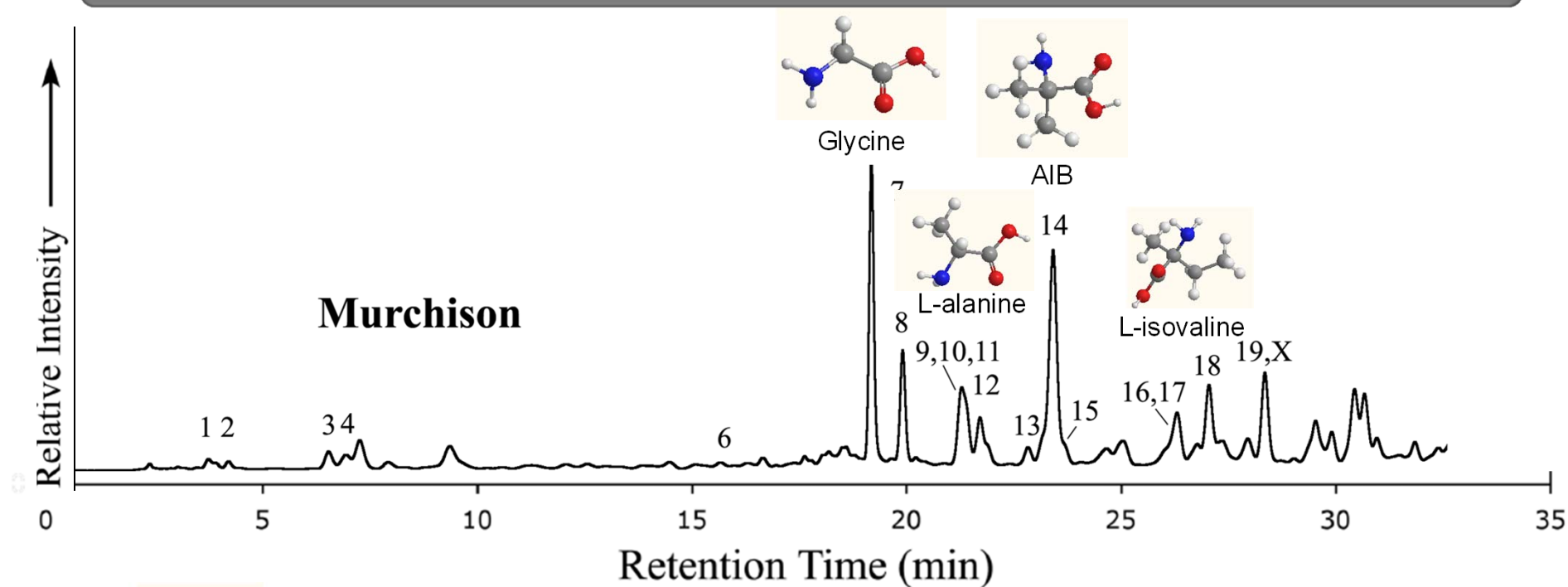
xanthine

Plus de 500 structures identifiées

Insoluble Organic Matter (IOM)	Abundance
Macromolecular material (C ₁₀₀ H ₇₀ N ₃ O ₁₂ S ₂)	70-99% total organic C
Soluble Organic Matter (SOM)	Concentration (ppm)
Carboxylic acids	>300
Polar hydrocarbons	<120
Sulfonic acids	67
Amino acids (83 named)	60
Dicarboxyimides	>50
Aliphatic hydrocarbons	>35
Dicarboxylic acids	>30
Polyols	30
Aromatic hydrocarbons	15-28
Hydroxy acids	15
Amines	13
Pyridine carboxylic acids	>7
N-heterocycles	7
Phosphonic acids	2
Purines and pyrimidines	1

Pizzarello et al., *Meteorites and the Early Solar System II*, 2006, 625-651

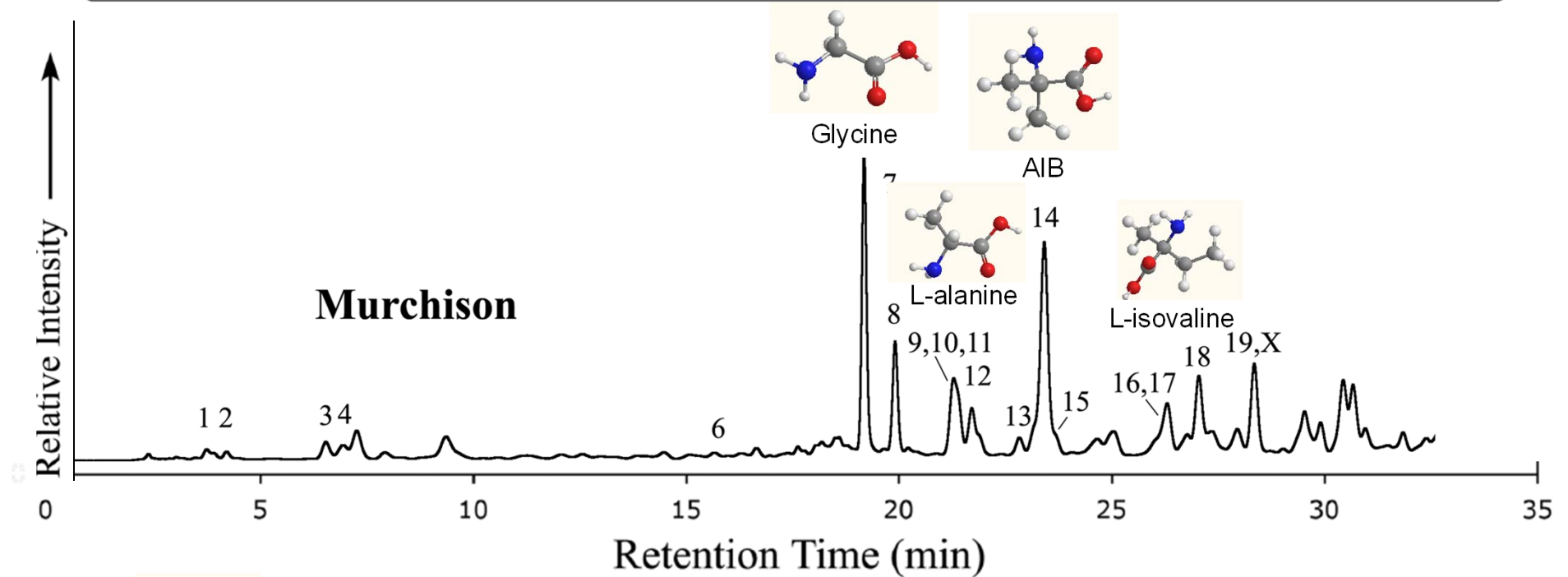
Analyses ciblées sur la MOS de météorites chondritiques



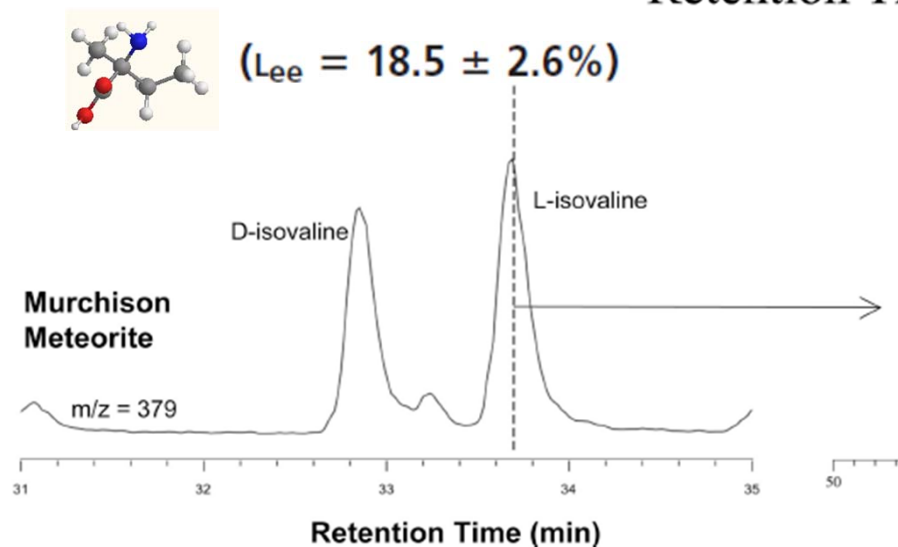
Glavin et al., *Meteor. Planet. Sci.*, **41** (2006) 889-902

Glavin et al., *PNAS*, **106** (2009) 5487-5492

Analyses ciblées sur la MOS de météorites chondritiques



Glavin et al., *Meteor. Planet. Sci.*, **41** (2006) 889-902

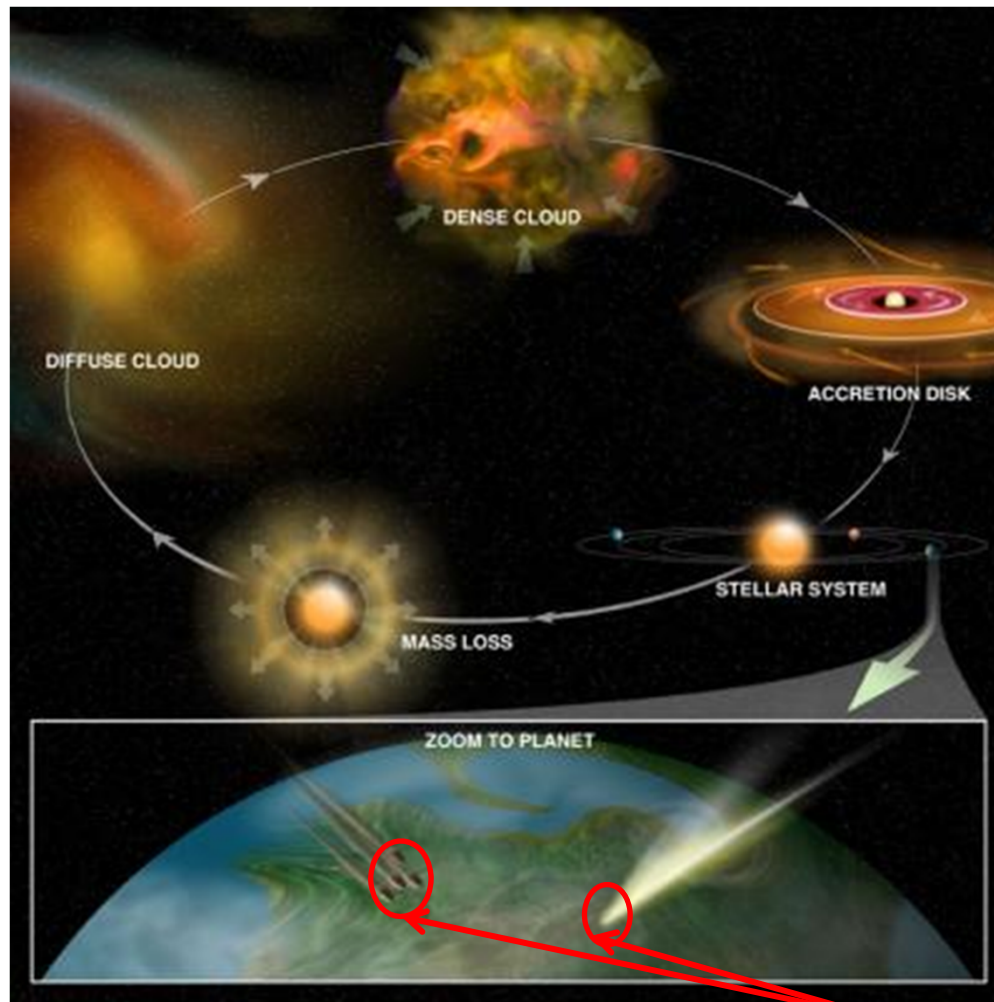


Large excès énantiomérique sur ces acides aminés non biologiques



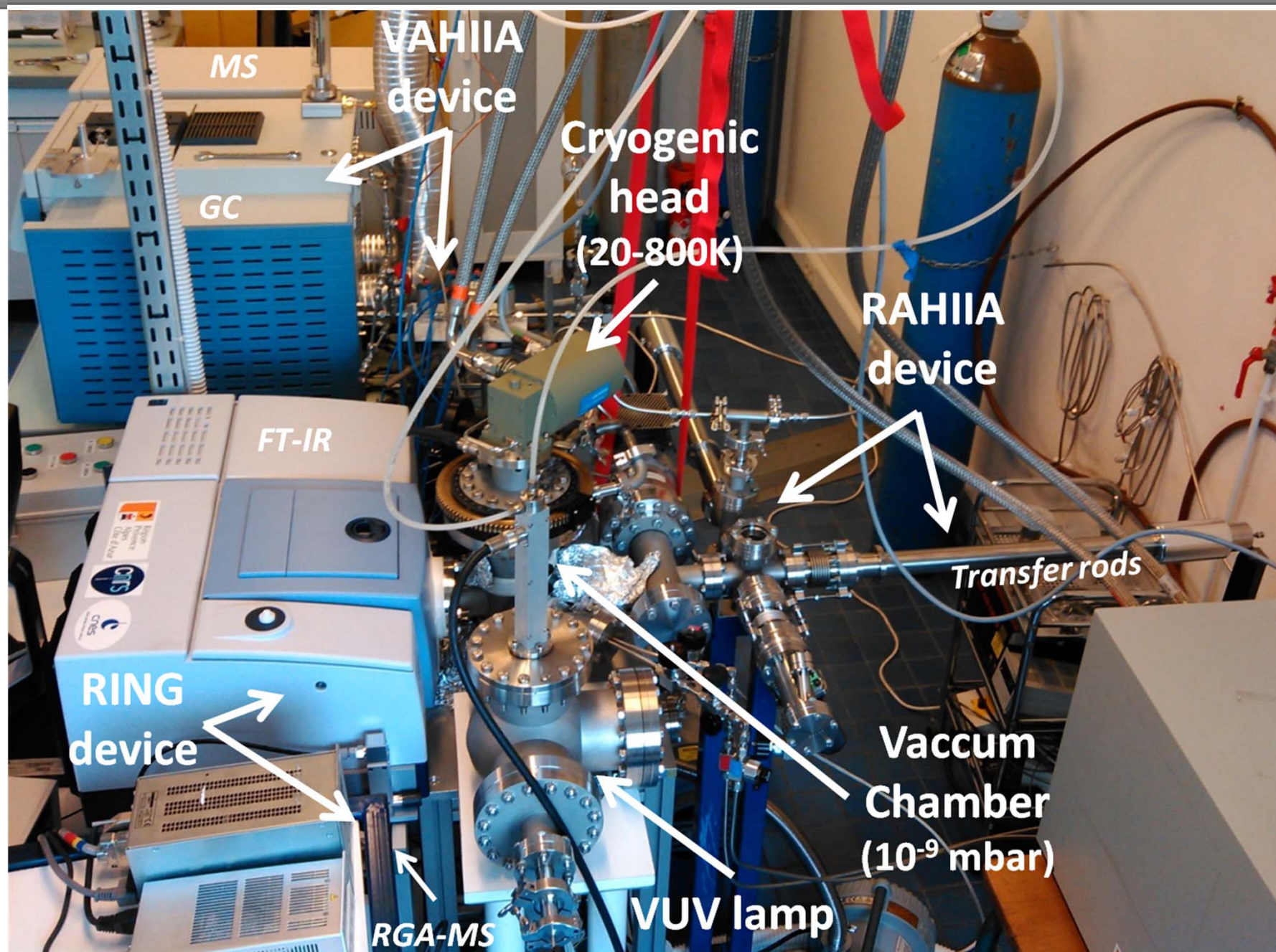
Lien entre la matière extraterrestre et l'origine de l'homochiralité sur Terre?

Cycle de la matière Organique

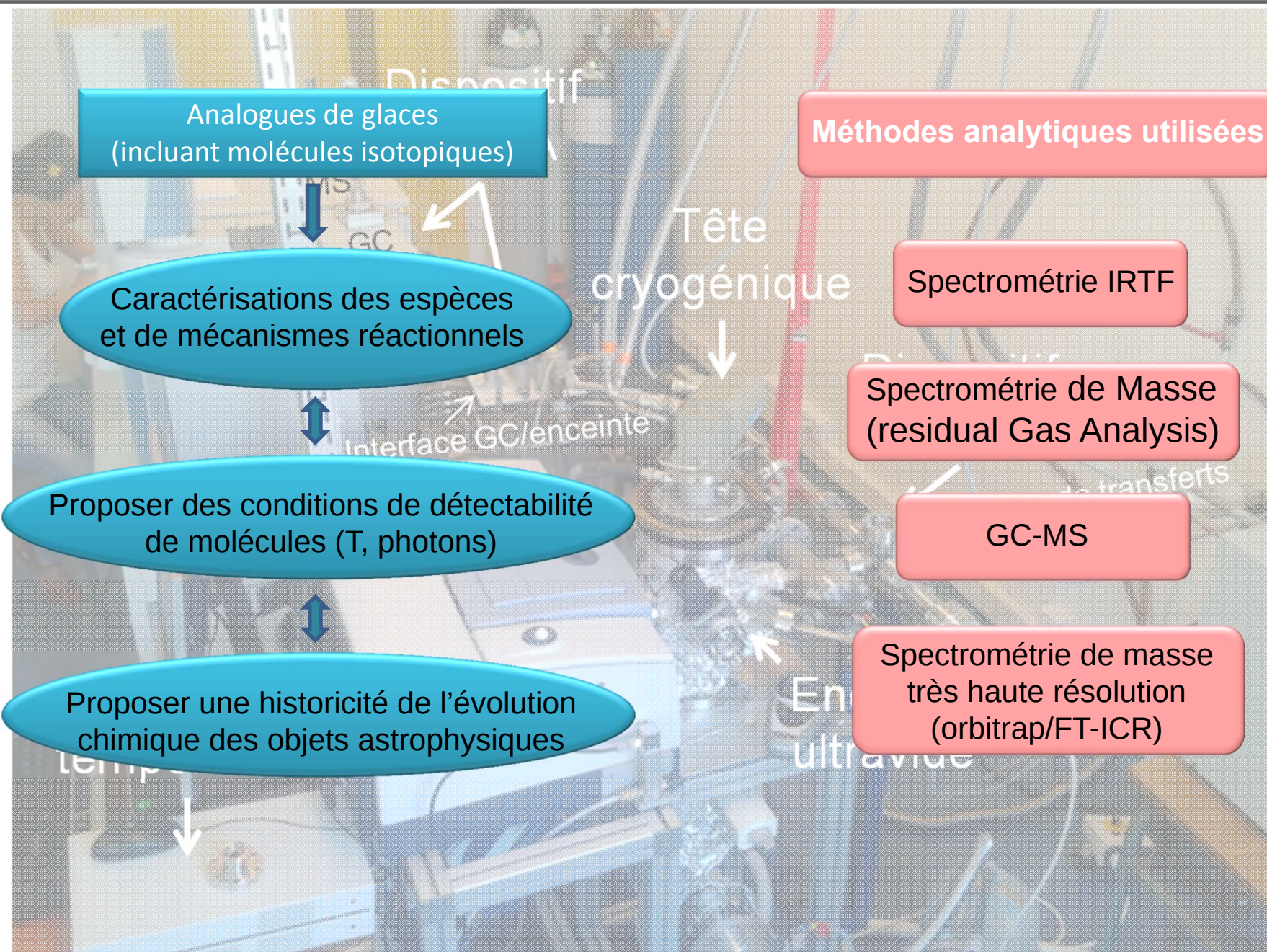


**Réservoir de matière
organique exogène**

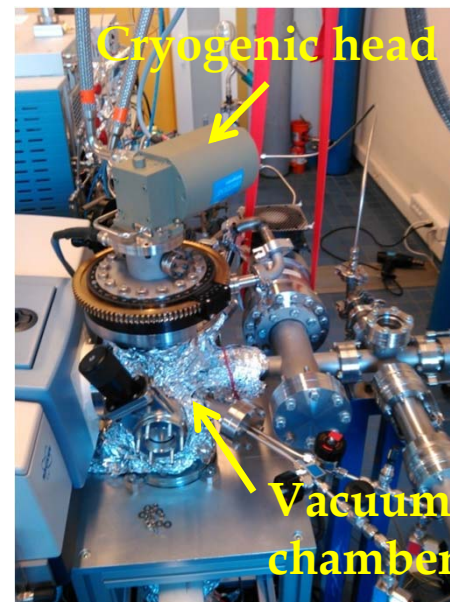
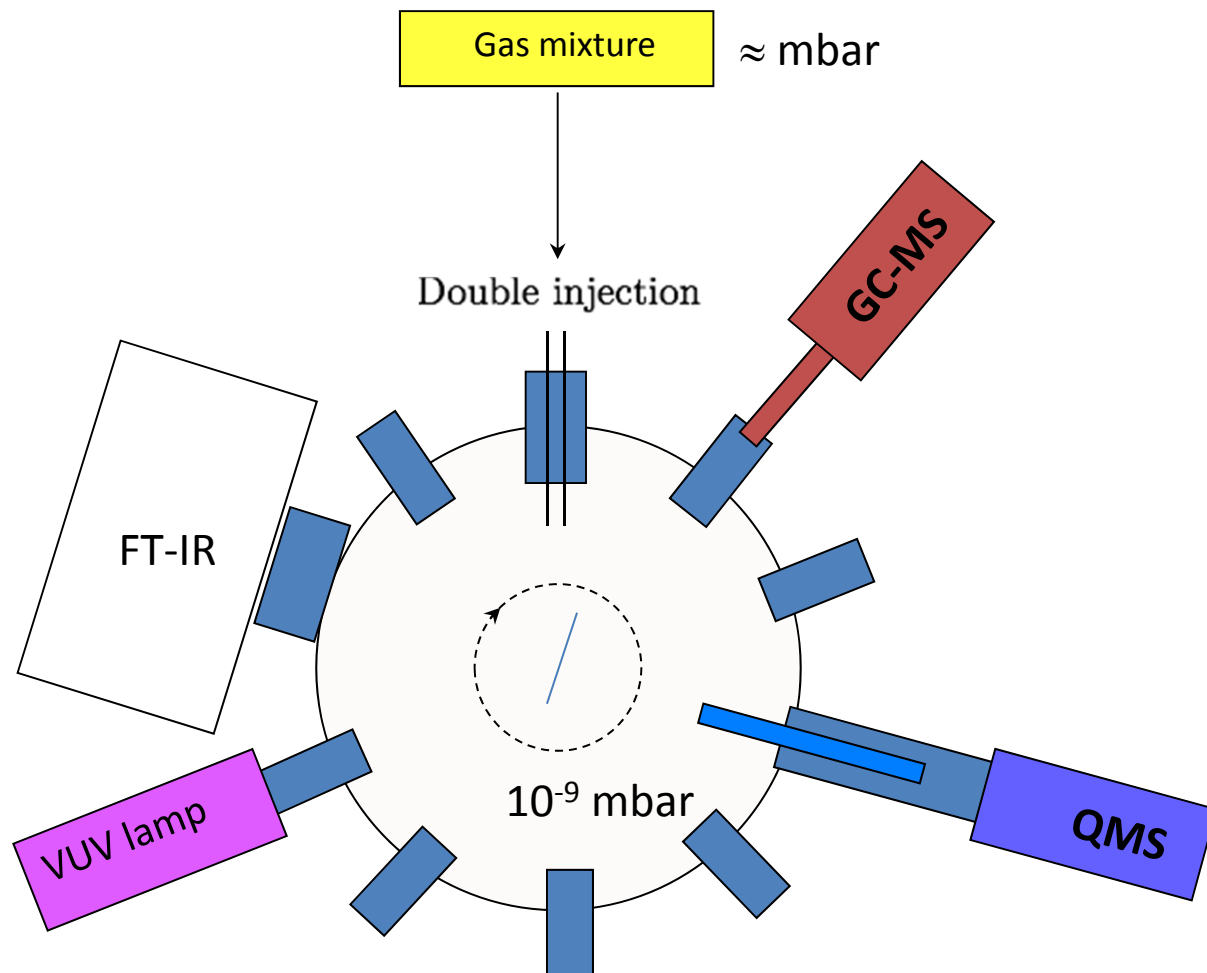
Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires

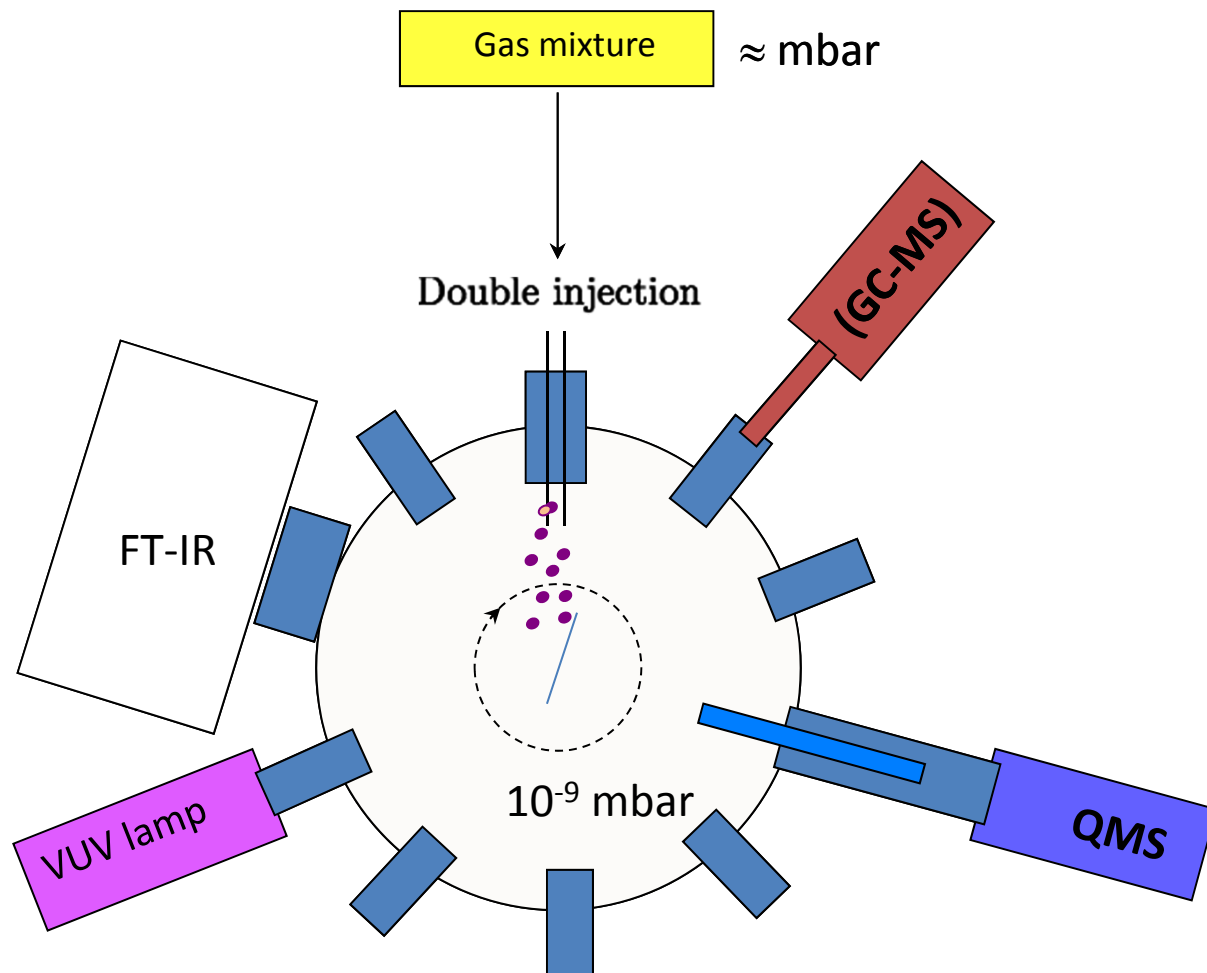


Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



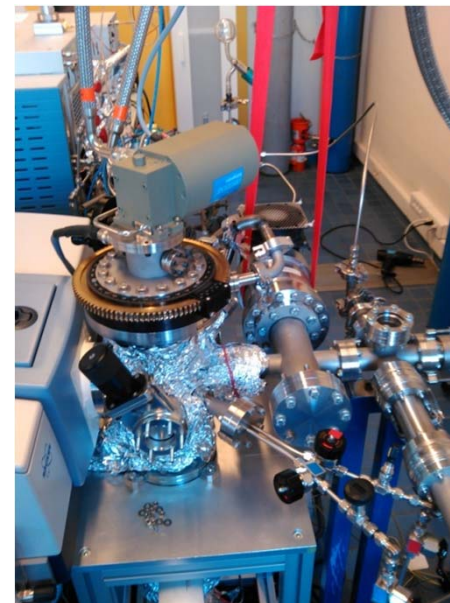
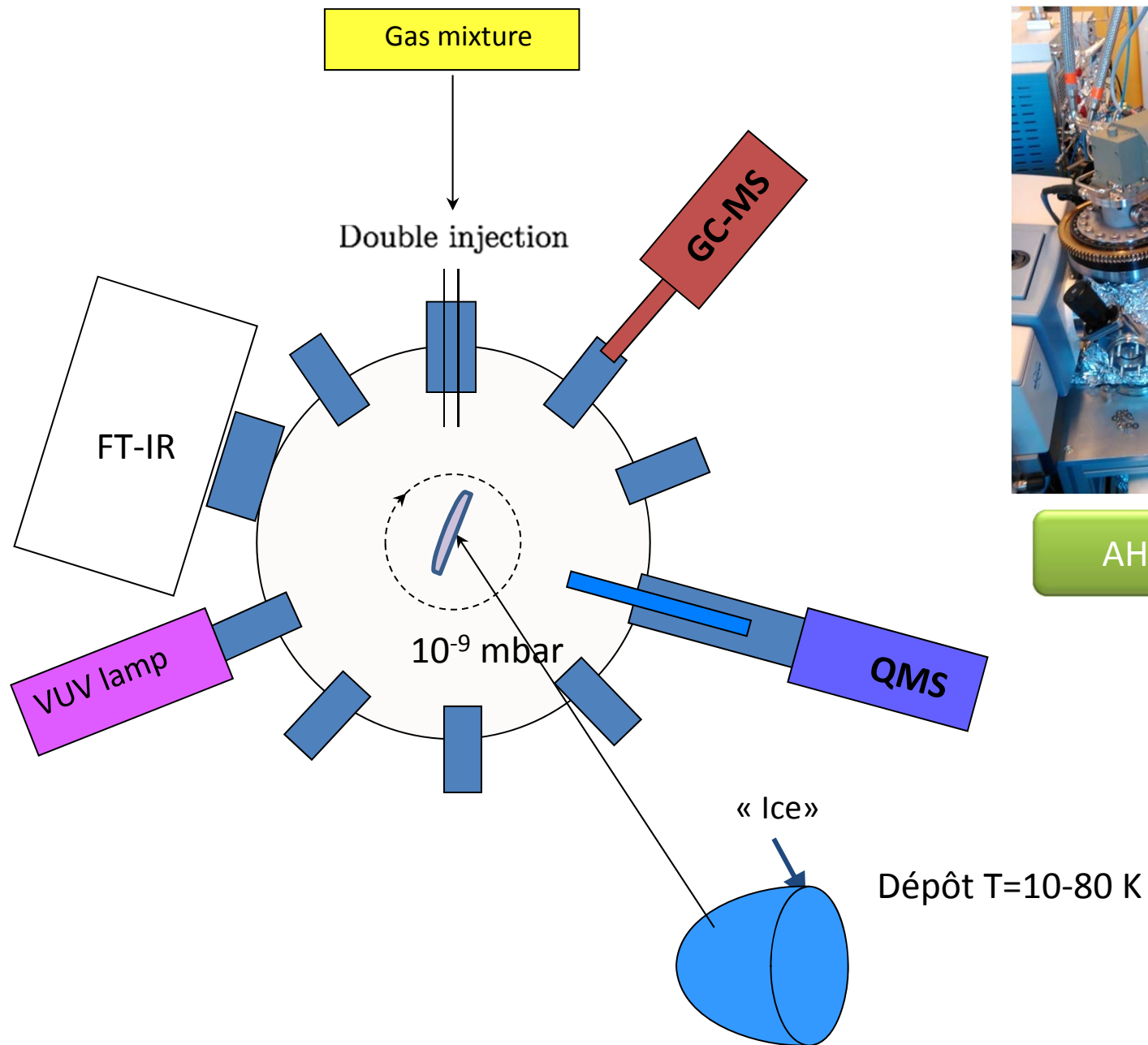
AHIA device

Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



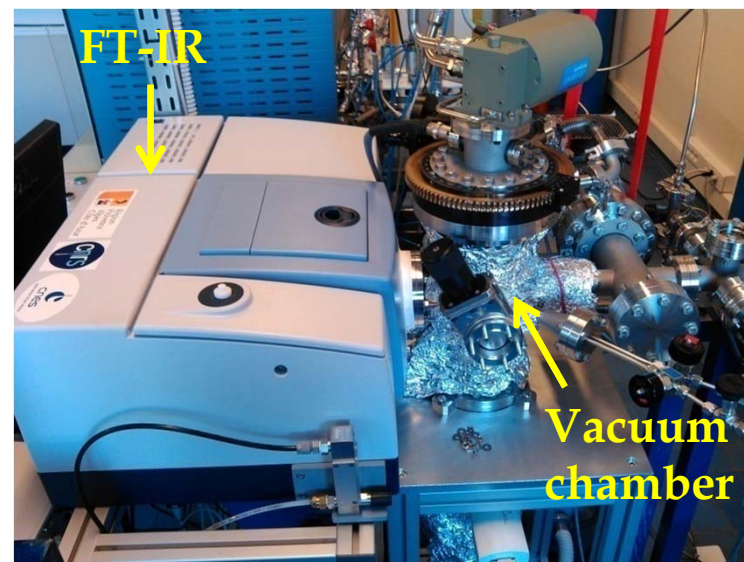
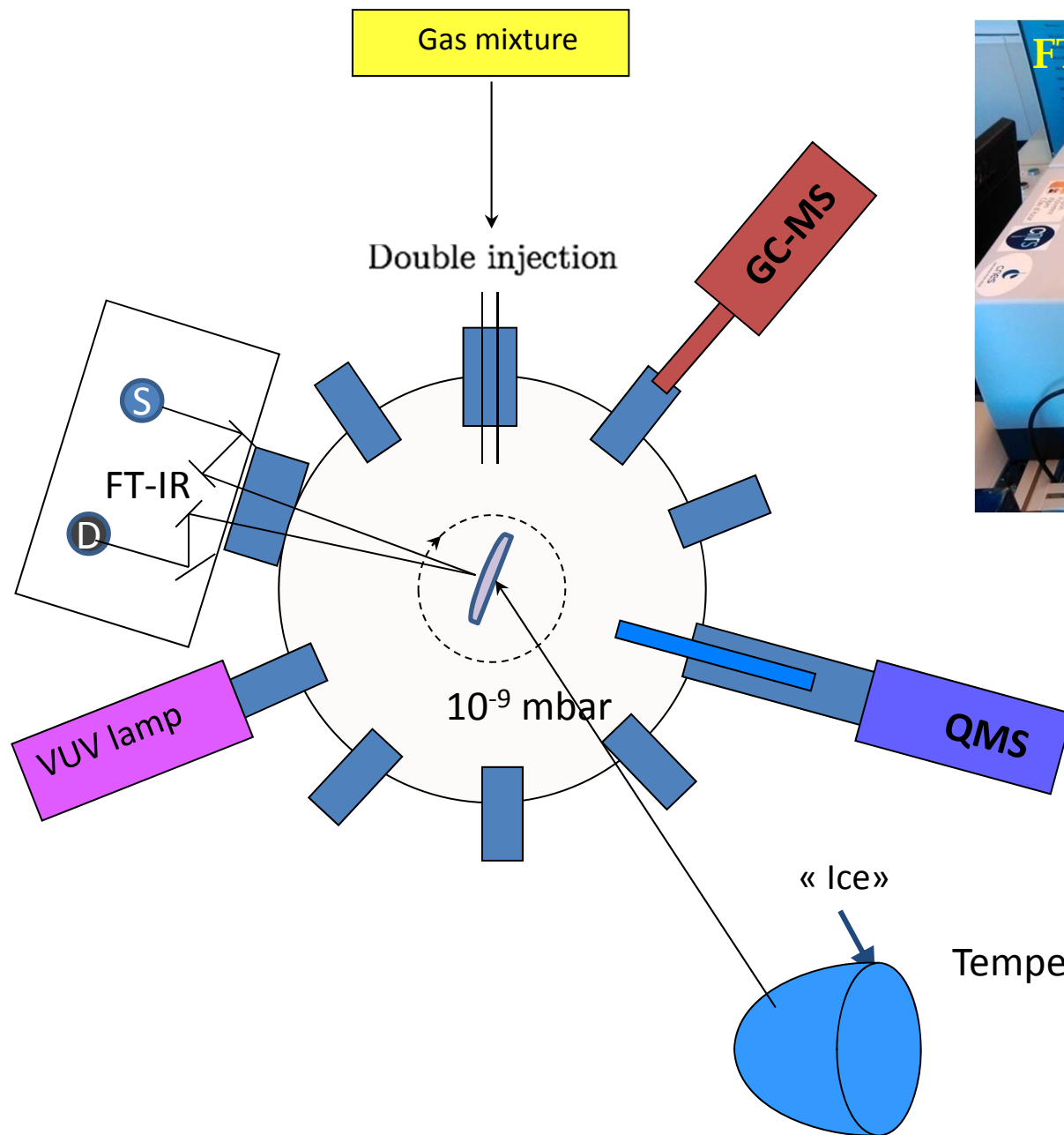
AHIA device

Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires

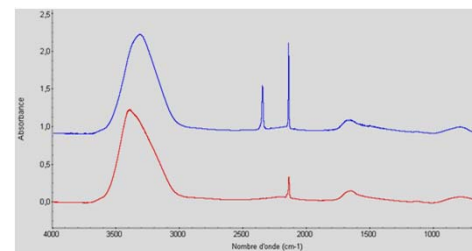


AHIA device

Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires

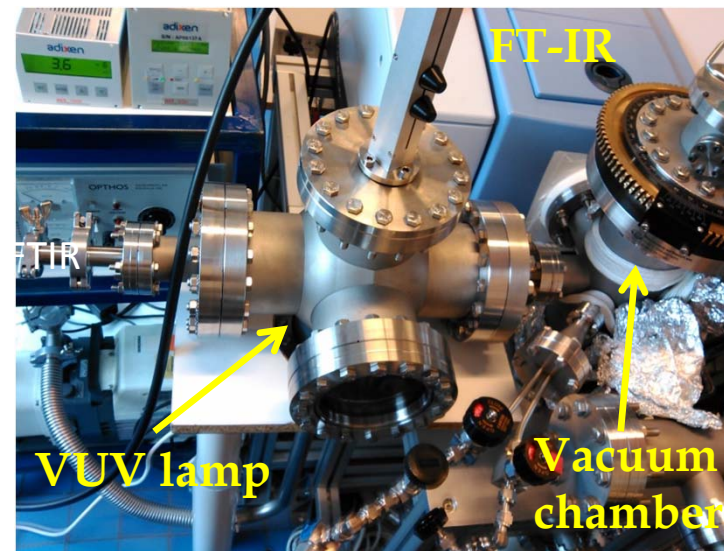
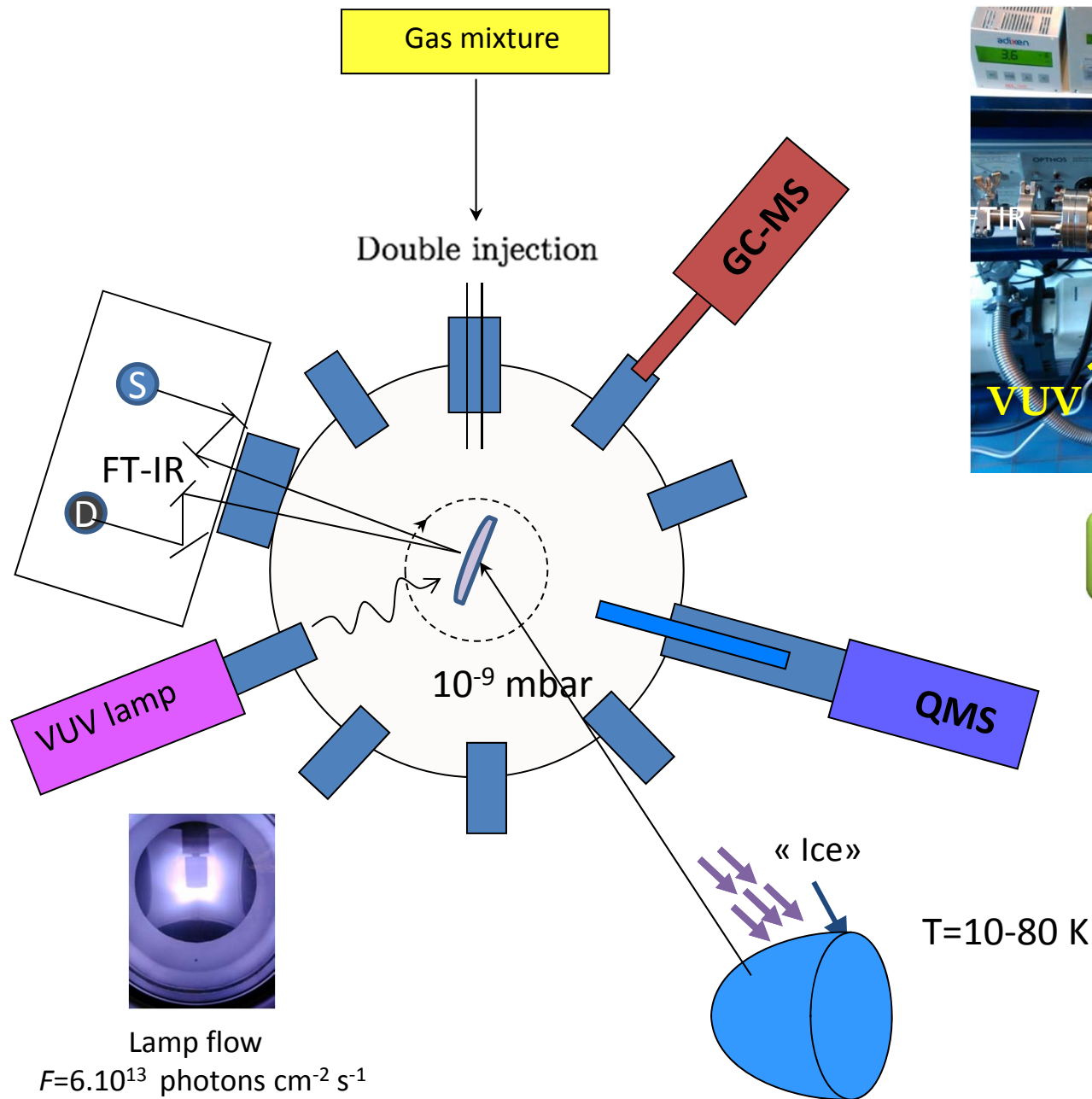


AHIA device

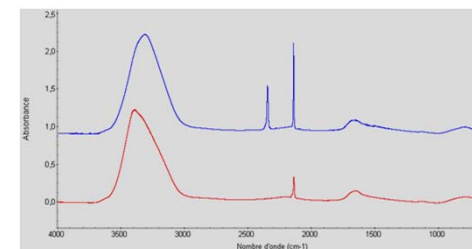


Temperature of deposit 10-80 K

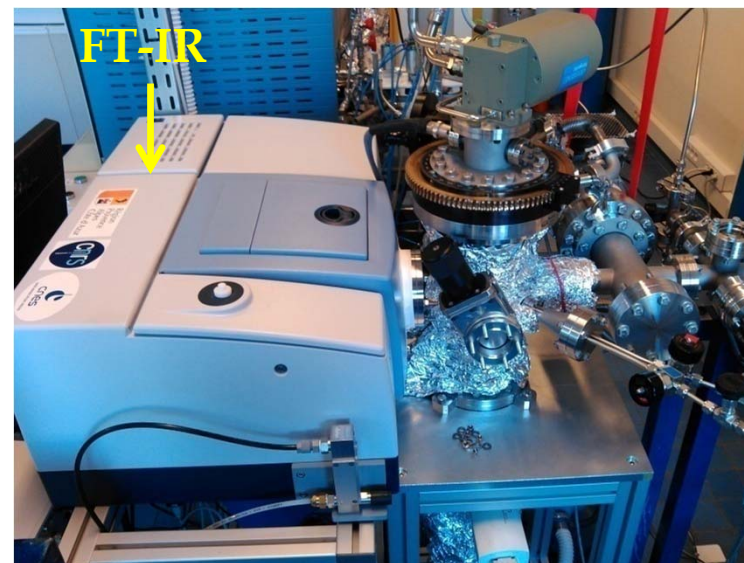
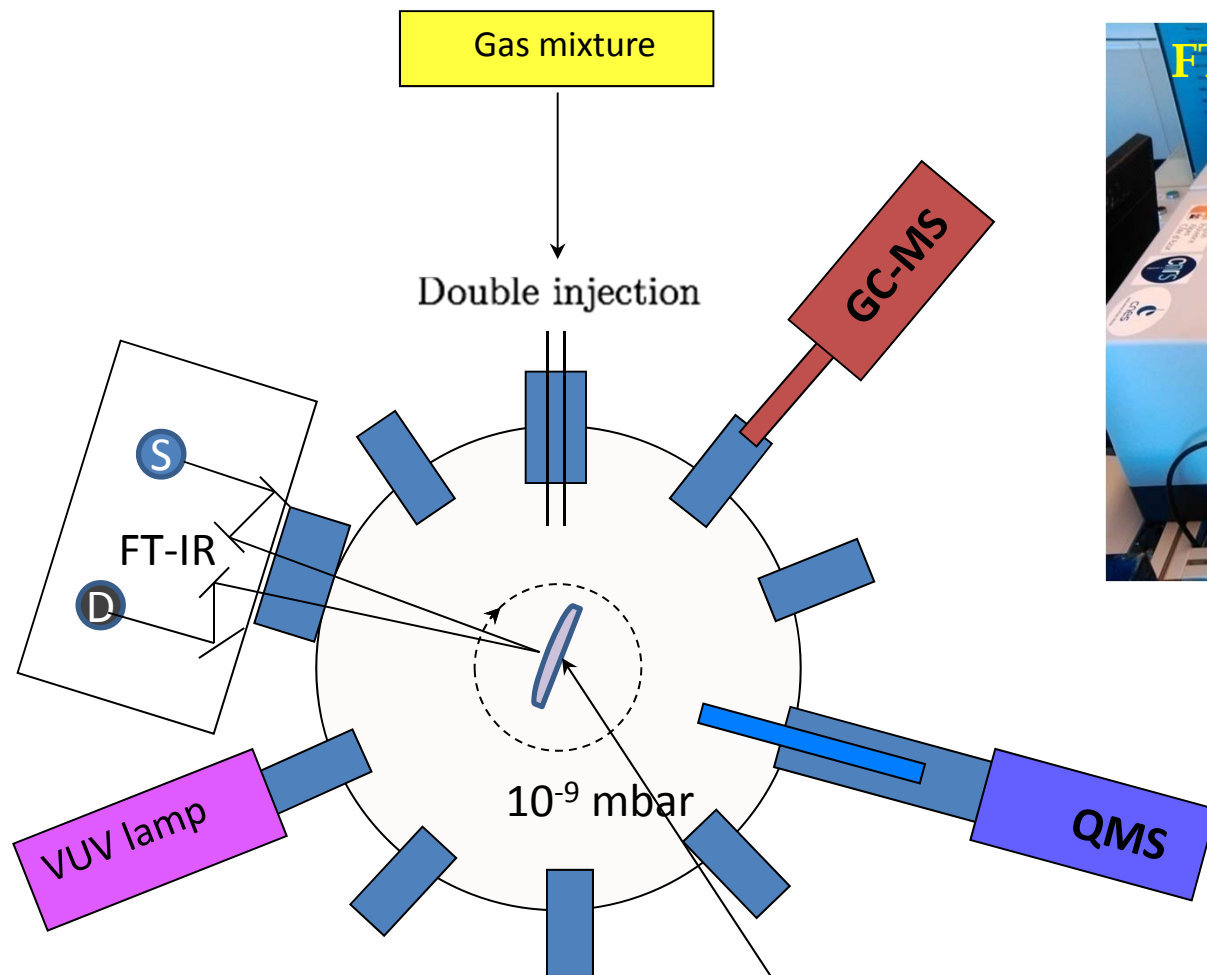
Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



AHIA device

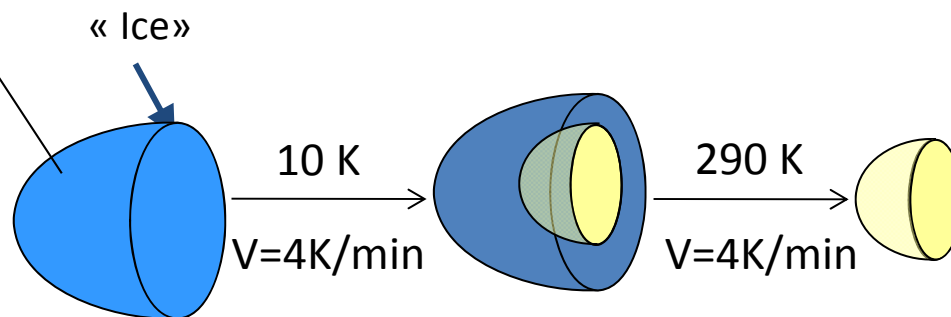
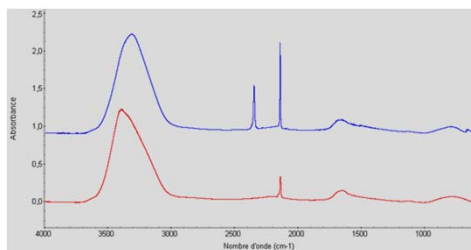


Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires

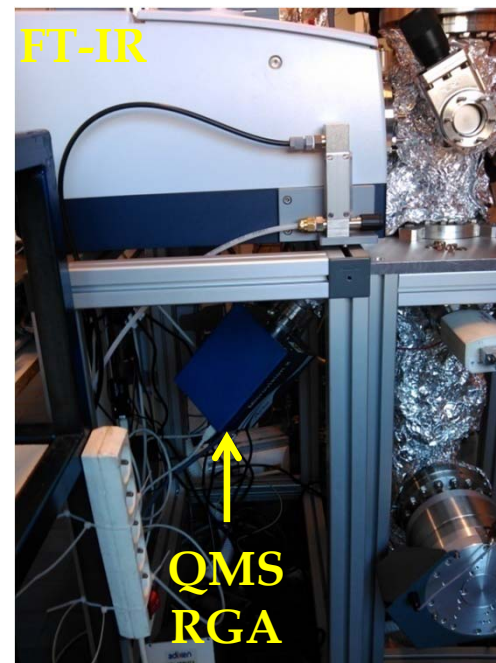
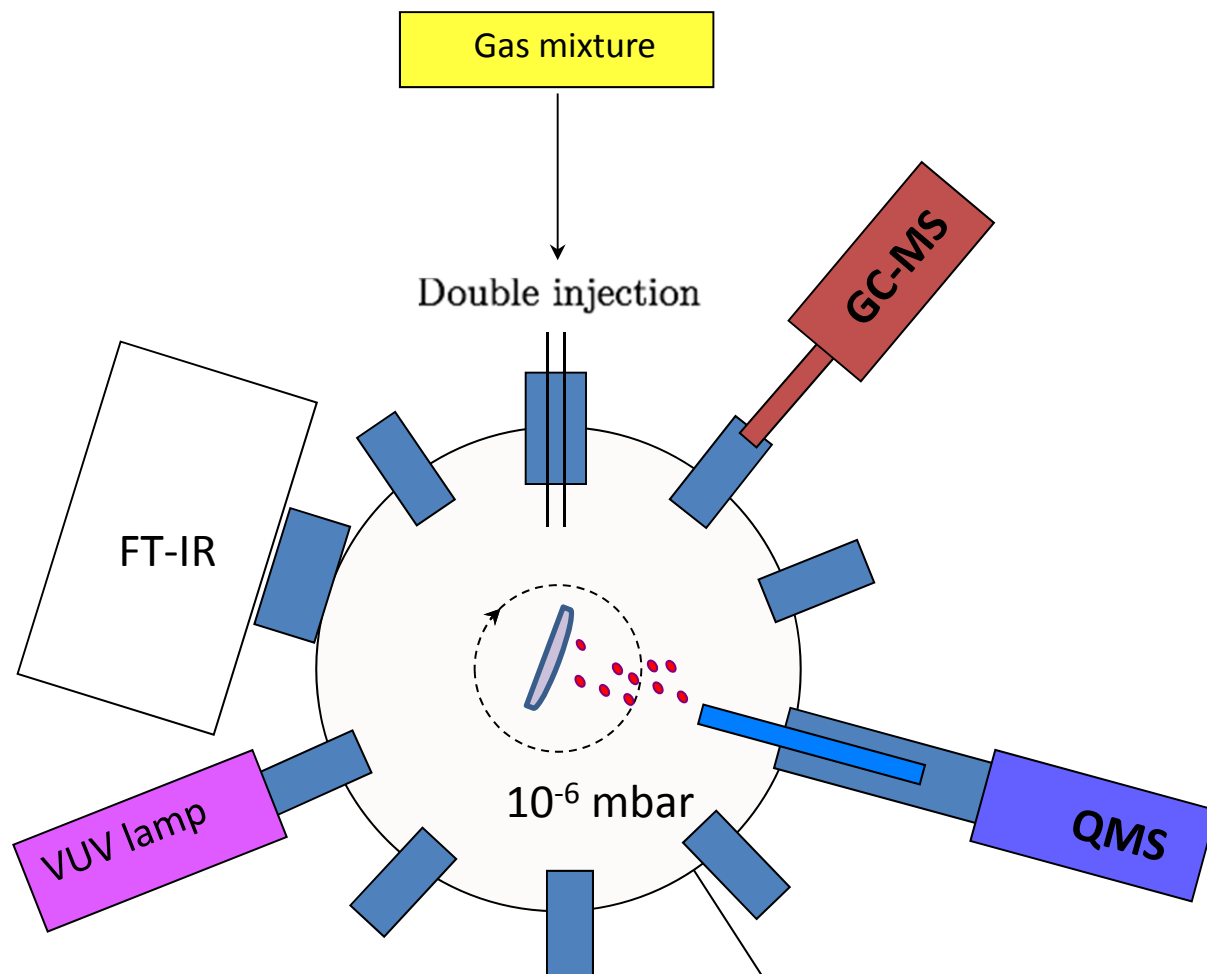


AHIA device

RING project

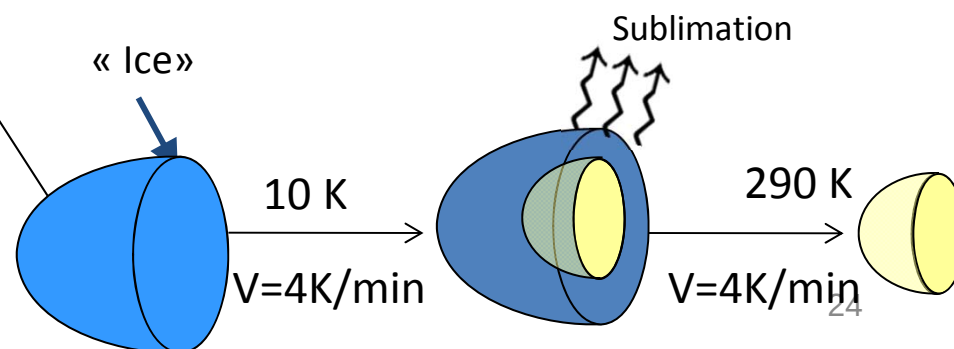
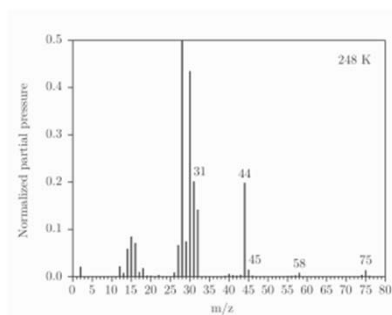


Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



AHIA device

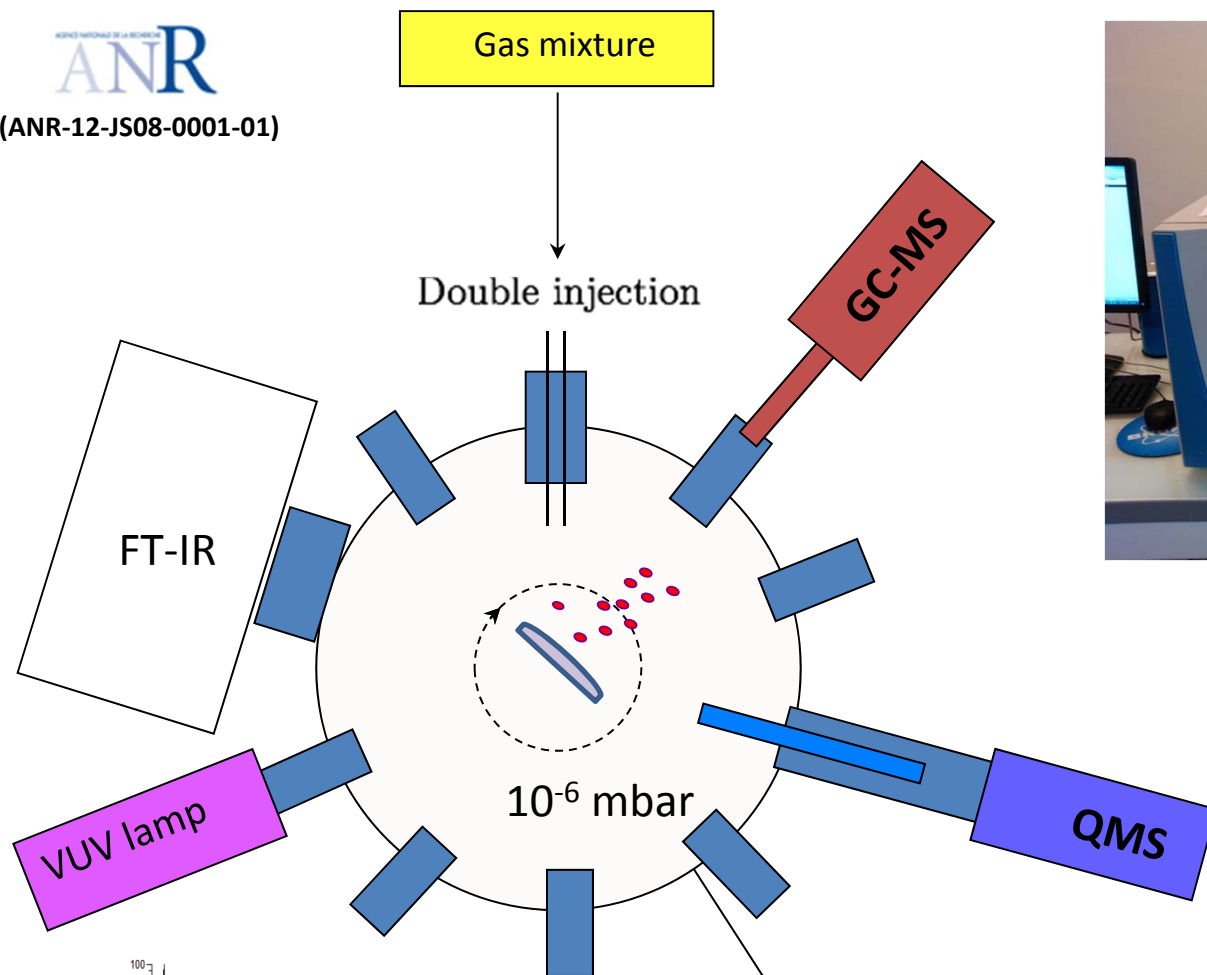
RING project



Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires

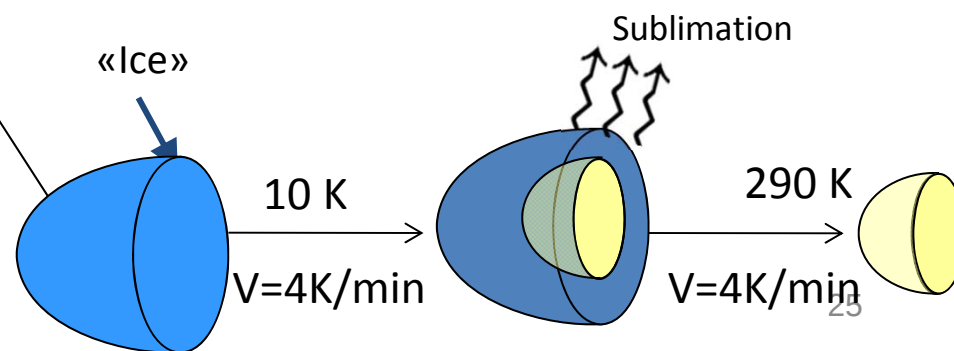
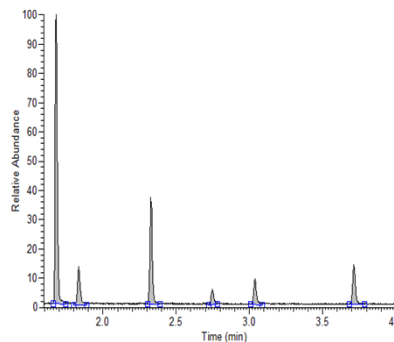


(ANR-12-JS08-0001-01)

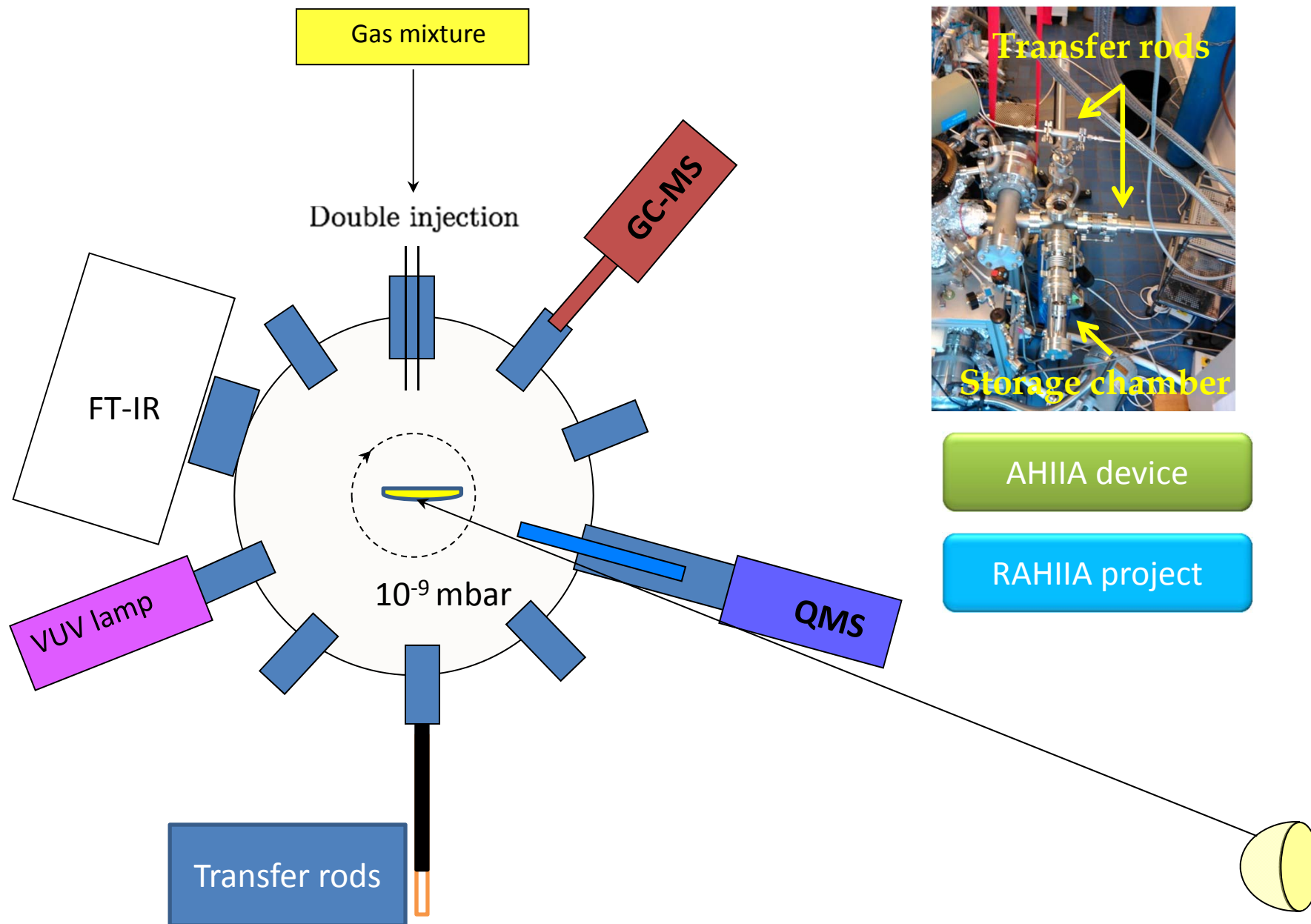


AHIA device

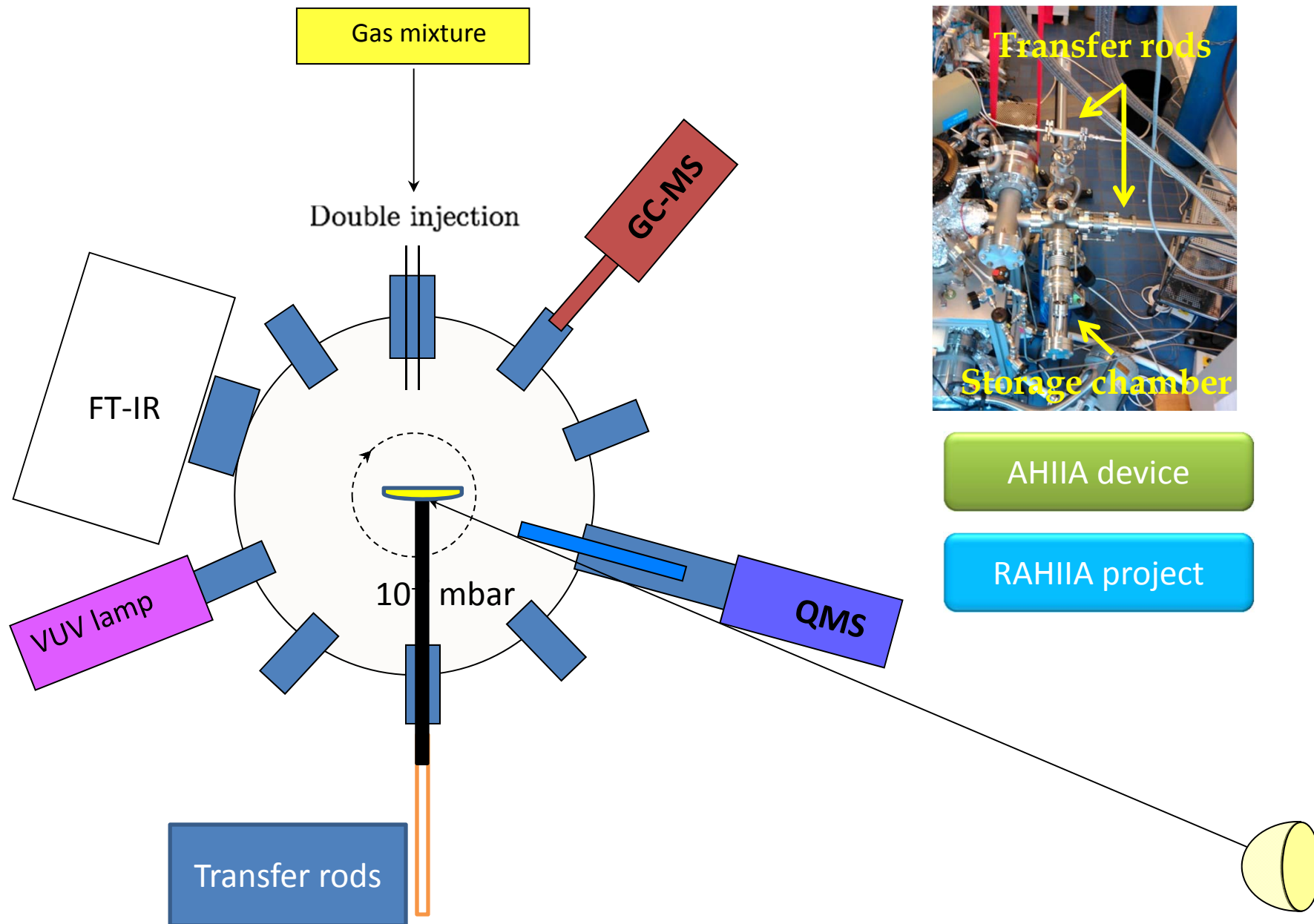
VAHIA project



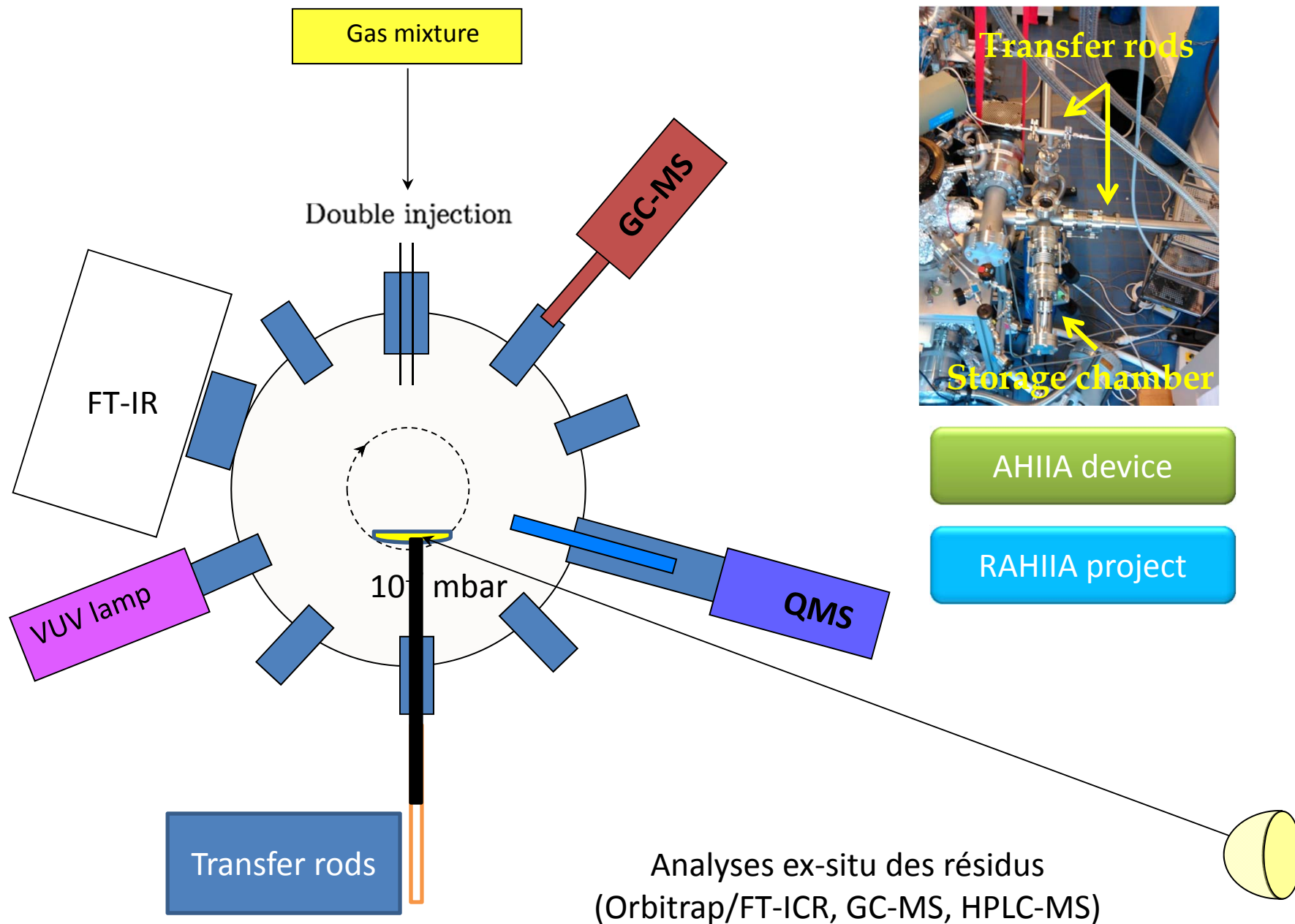
Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



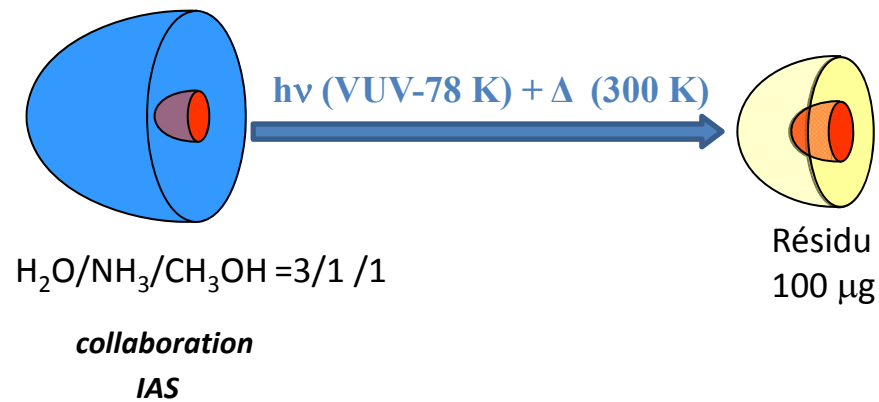
Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



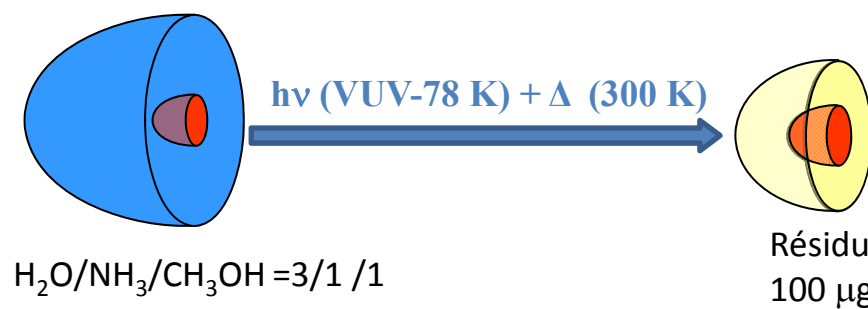
Expériences de simulation en laboratoire sur des analogues de glaces interstellaires



Analyse des résidus réfractaires issus d'analogues de glaces ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$)



Analyse des résidus réfractaires issus d'analogues de glaces ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$)



collaboration
IAS

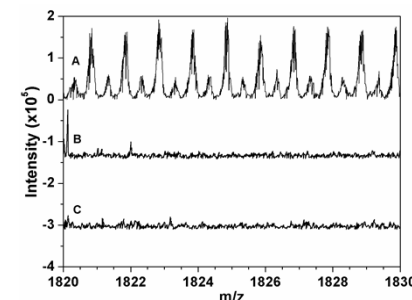
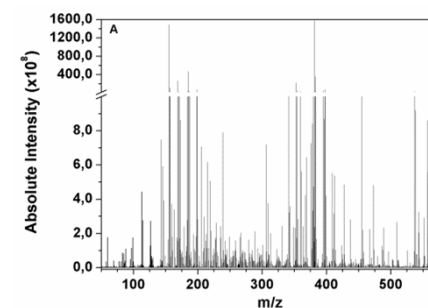
Analyses non ciblées

collaboration
IPAG

Solubilisation dans CH_3OH

Spectrométrie de masse haute
résolution : ORBITRAP

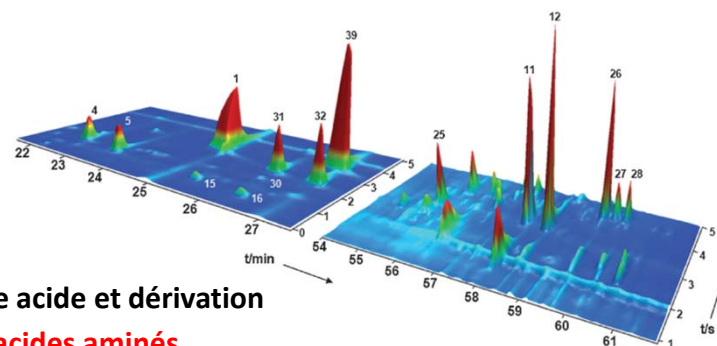
Plusieurs milliers de molécules
 m/z jusqu'à 4000 Da $\rightarrow$ macromolécules



Analyse des résidus réfractaires issus d'analogues de glaces ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$)

Analyses ciblées

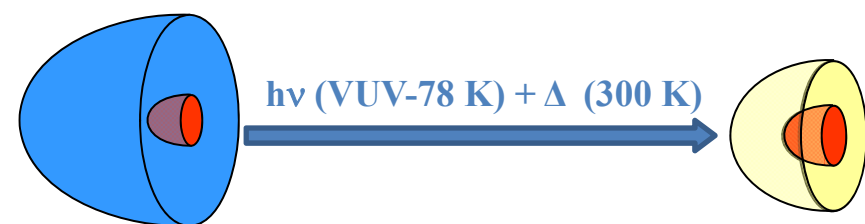
GC-2D-MS/MS



Hydrolyse acide et dérivatisation

30 acides aminés

Meinert et al., *Chem.PlusChem.*, **77** (2012) 186-191



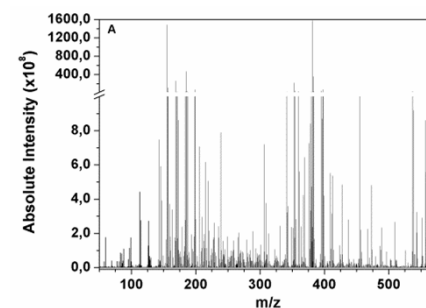
$\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$

collaboration
IAS

Résidu
100 μg

Solubilisation dans CH_3OH

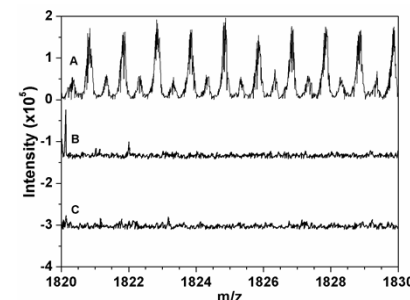
Plusieurs milliers de molécules
 m/z jusqu'à 4000 Da $\rightarrow$ macromolécules



Analyses non ciblées

collaboration
IPAG

Spectrométrie de masse haute
résolution : ORBITRAP

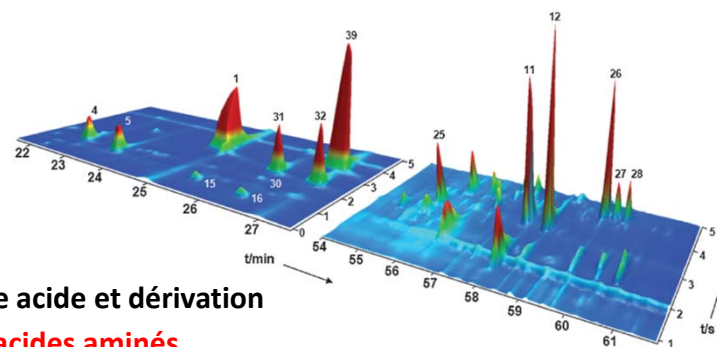


Danger et al., *Geochim.Cosmochim.Acta*, **118** (2013) 184-201

Analyse des résidus réfractaires issus d'analogues de glaces ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$)

Analyses ciblées

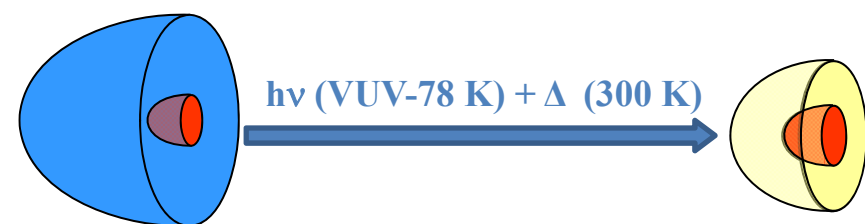
GC-2D-MS/MS



Hydrolyse acide et dérivation

30 acides aminés

Meinert et al., *Chem.PlusChem.*, **77** (2012) 186-191



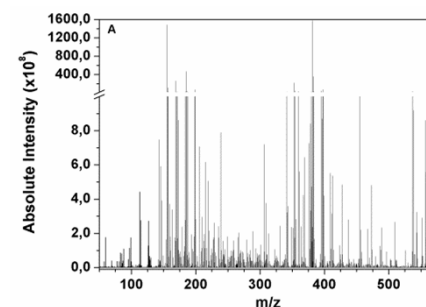
$\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3/\text{CH}_3\text{OH} = 3/1/1$

collaboration
IAS

Résidu
100 µg

Solubilisation dans CH_3OH

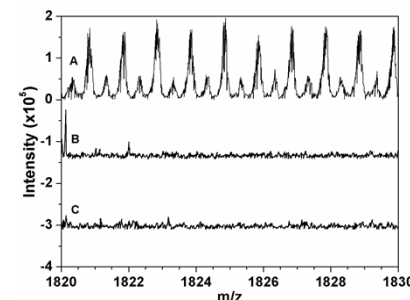
Plusieurs milliers de molécules
 m/z jusqu'à 4000 Da → macromolécules



Analyses non ciblées

collaboration
IPAG

Spectrométrie de masse haute
résolution : ORBITRAP

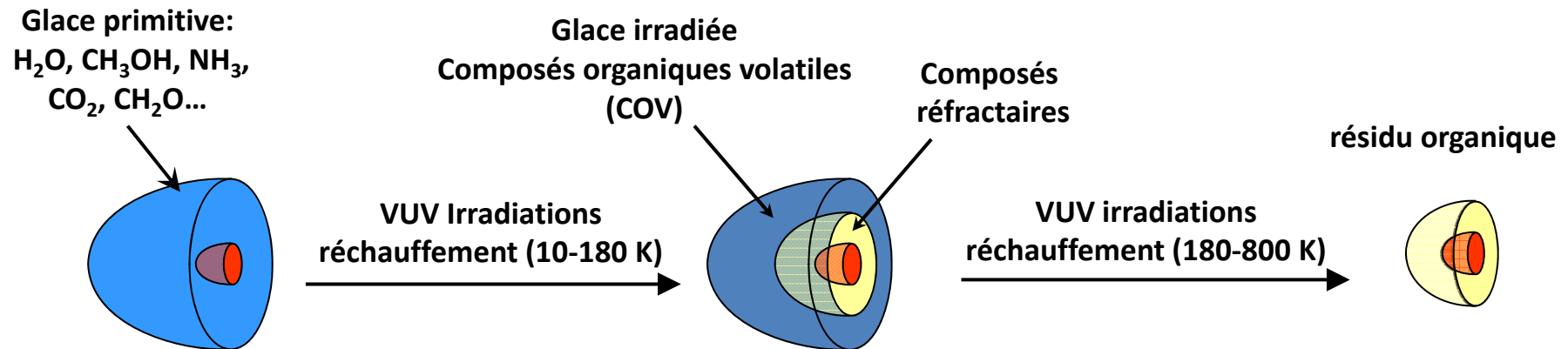


Ces résidus peuvent être considérés comme des
analogues de matière organique astrophysique

Danger et al., *Geochim.Cosmochim.Acta*, **118** (2013) 184-201

Evolution des glaces cométaires: vers la formation de molécules organiques complexes

Simulations expérimentales en laboratoire sur des analogues



Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes

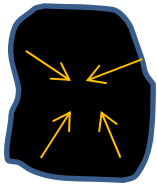
Nuage
moléculaire



$T=10\text{ K}$

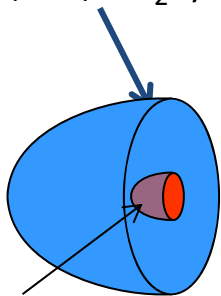
Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes

Nuage
moléculaire



$T=10\text{ K}$

« Glace primitive »
(H_2O , CO, CO_2 ..)



Cœur de
silicates

1% w

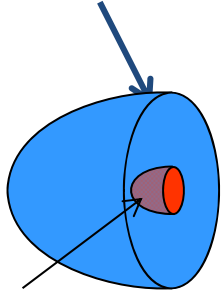
Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes

Nuage
moléculaire



T=10 K

« Glace primitive »
(H₂O, CO, CO₂..)



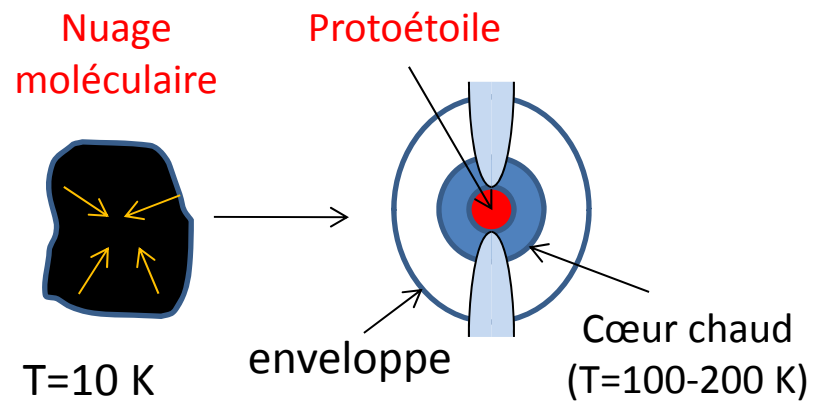
Cœur de
silicates

+ GAZ

1% w

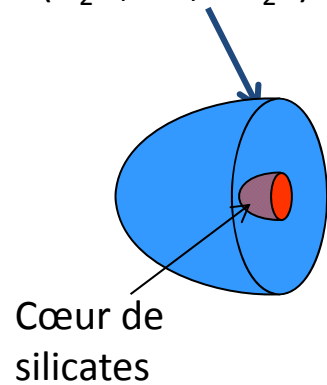
99% w

Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes

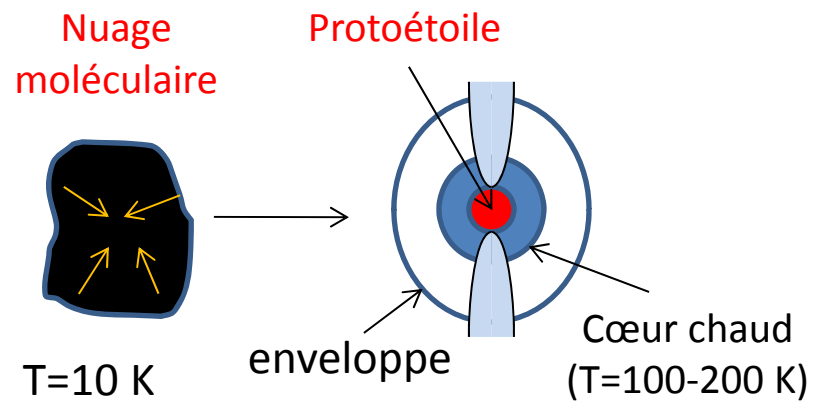


$10^4 - 10^5$ ans

« Glace primitive »
(H_2O , CO, CO_2 ..)

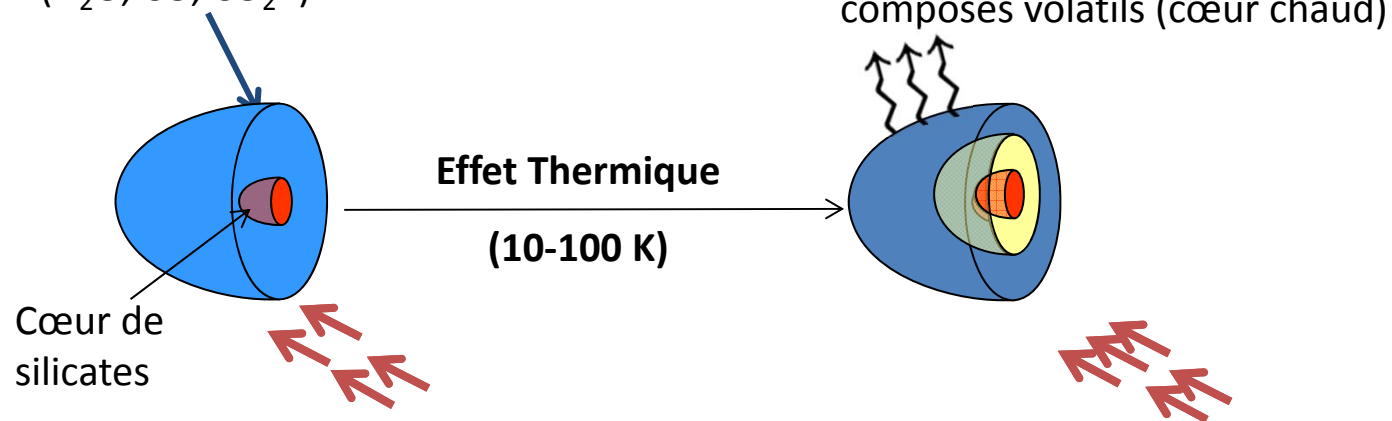


Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes



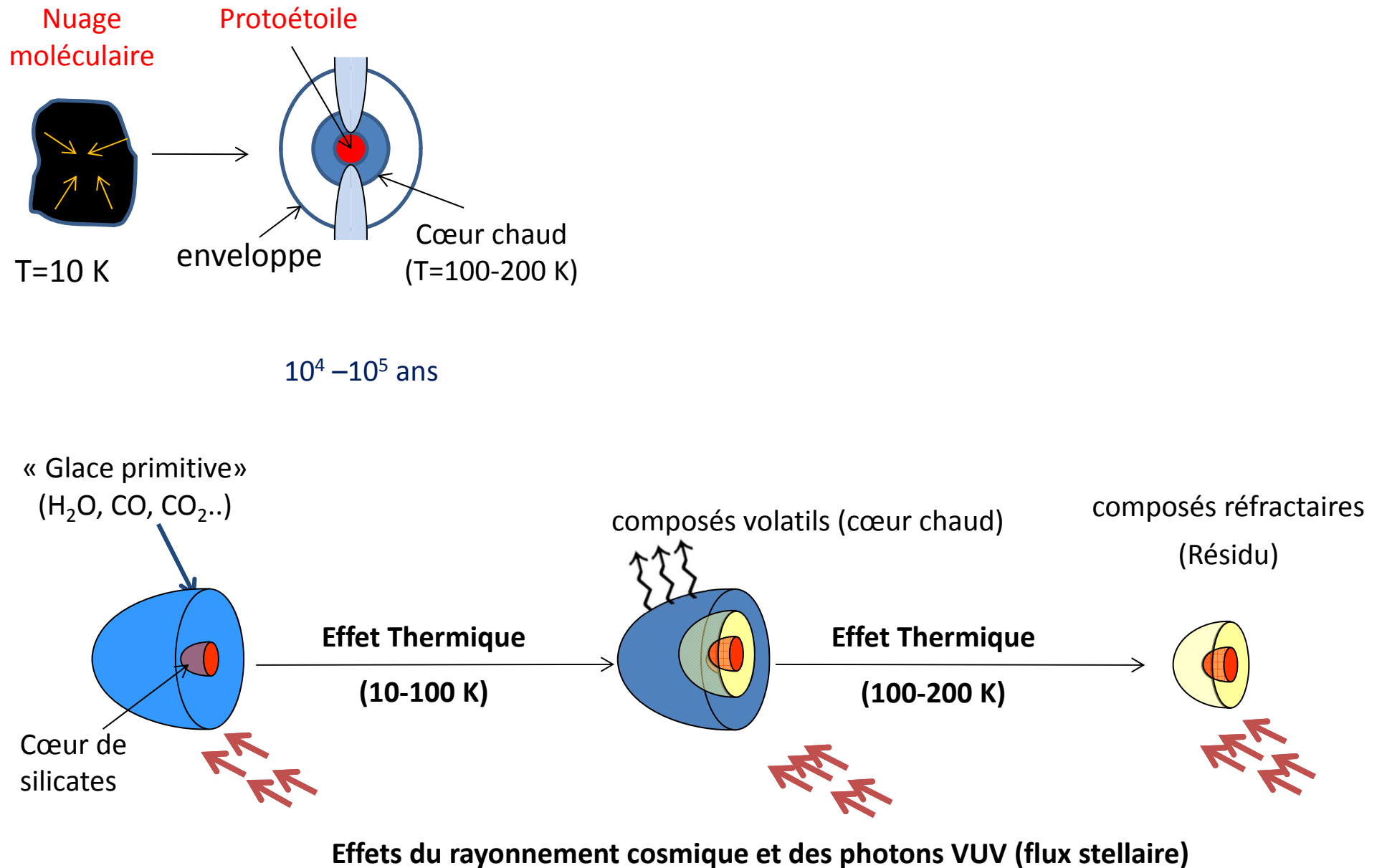
$10^4 - 10^5\text{ ans}$

« Glace primitive »
(H_2O , CO, CO_2 ..)

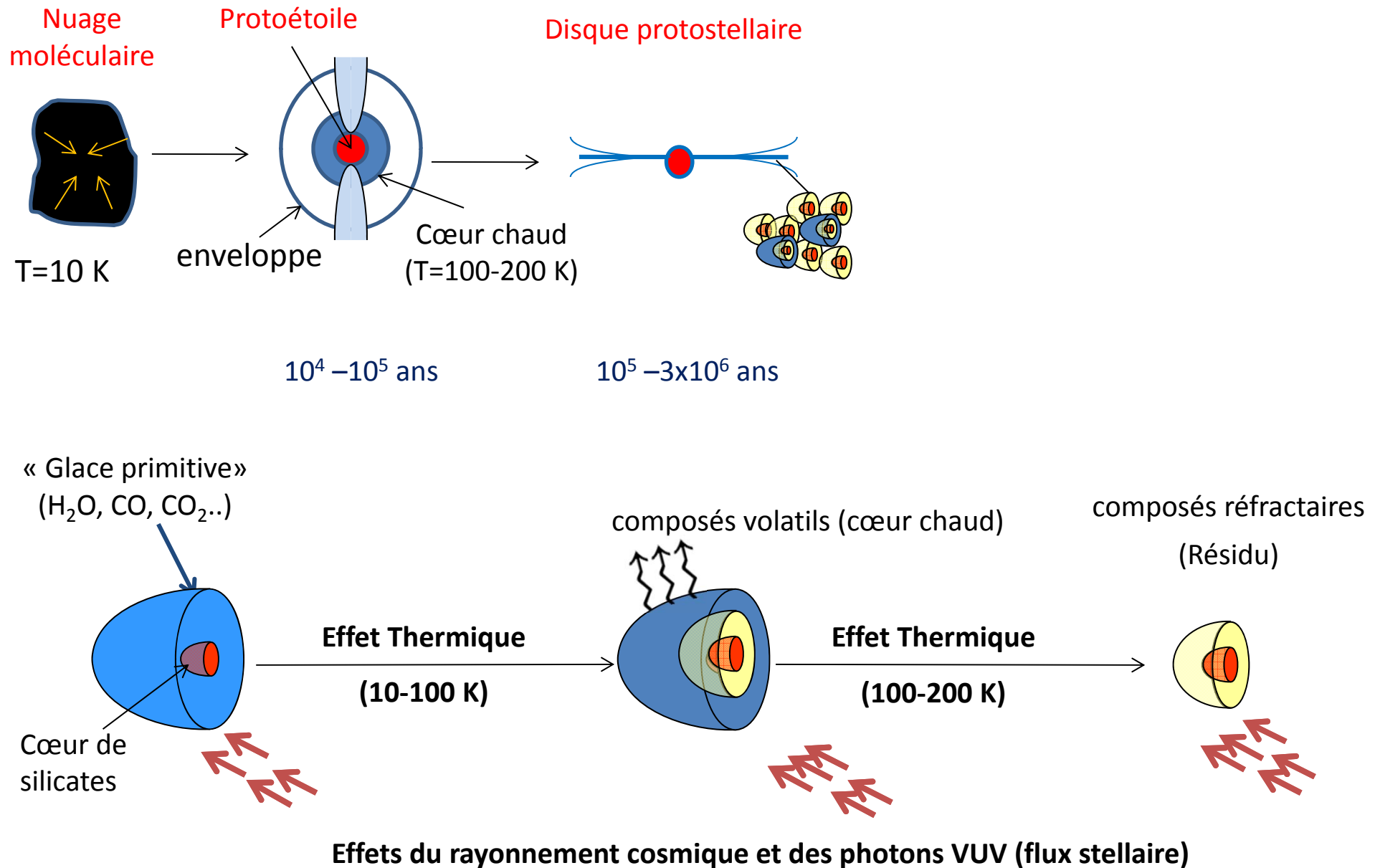


Effets du rayonnement cosmique et des photons VUV (flux stellaire)

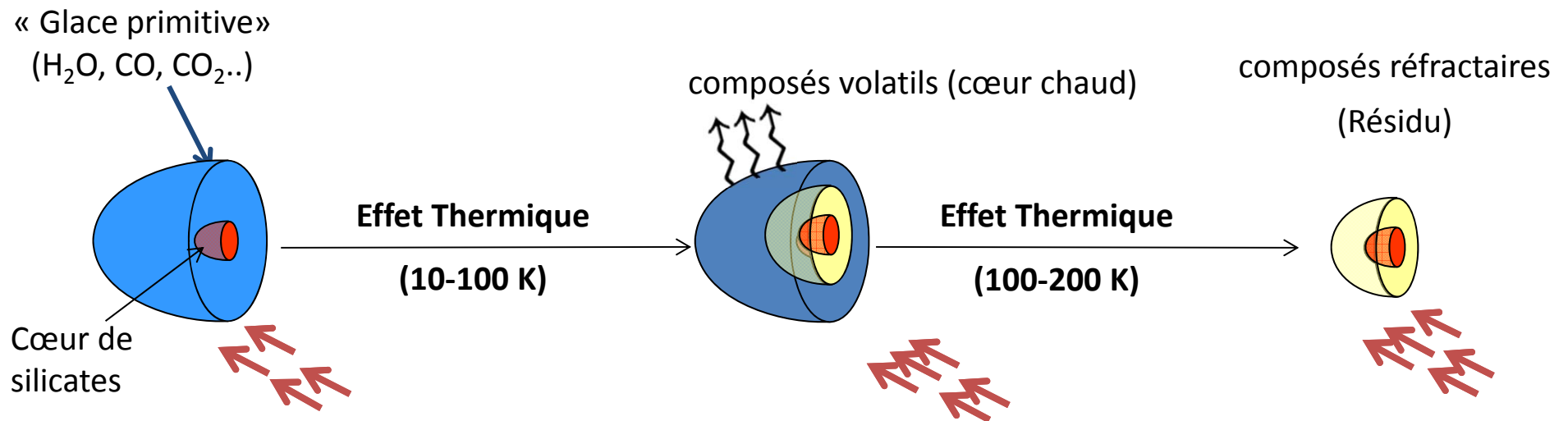
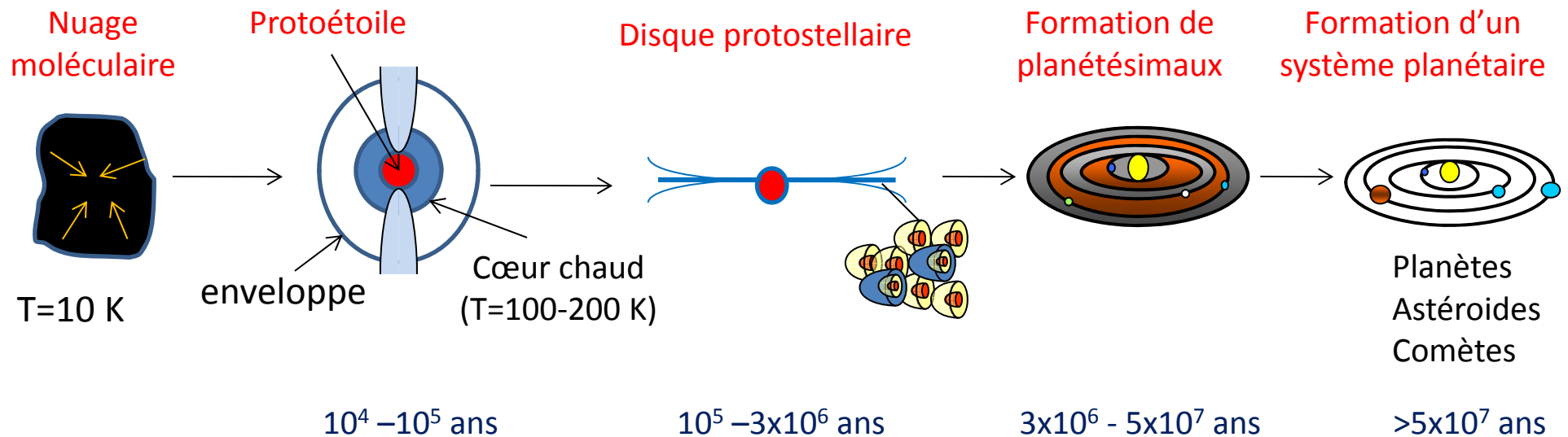
Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes



Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes

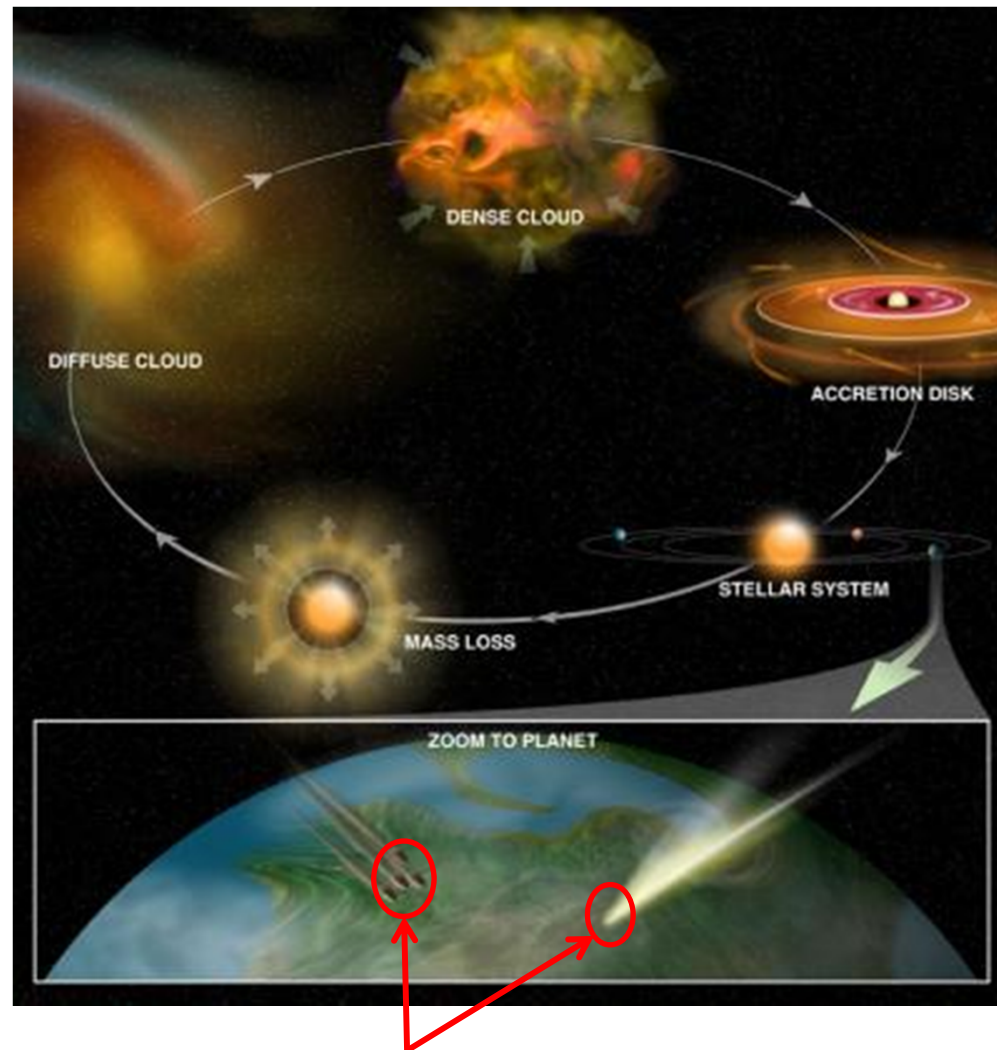


Evolution des grains : vers la formation de molécules organiques complexes



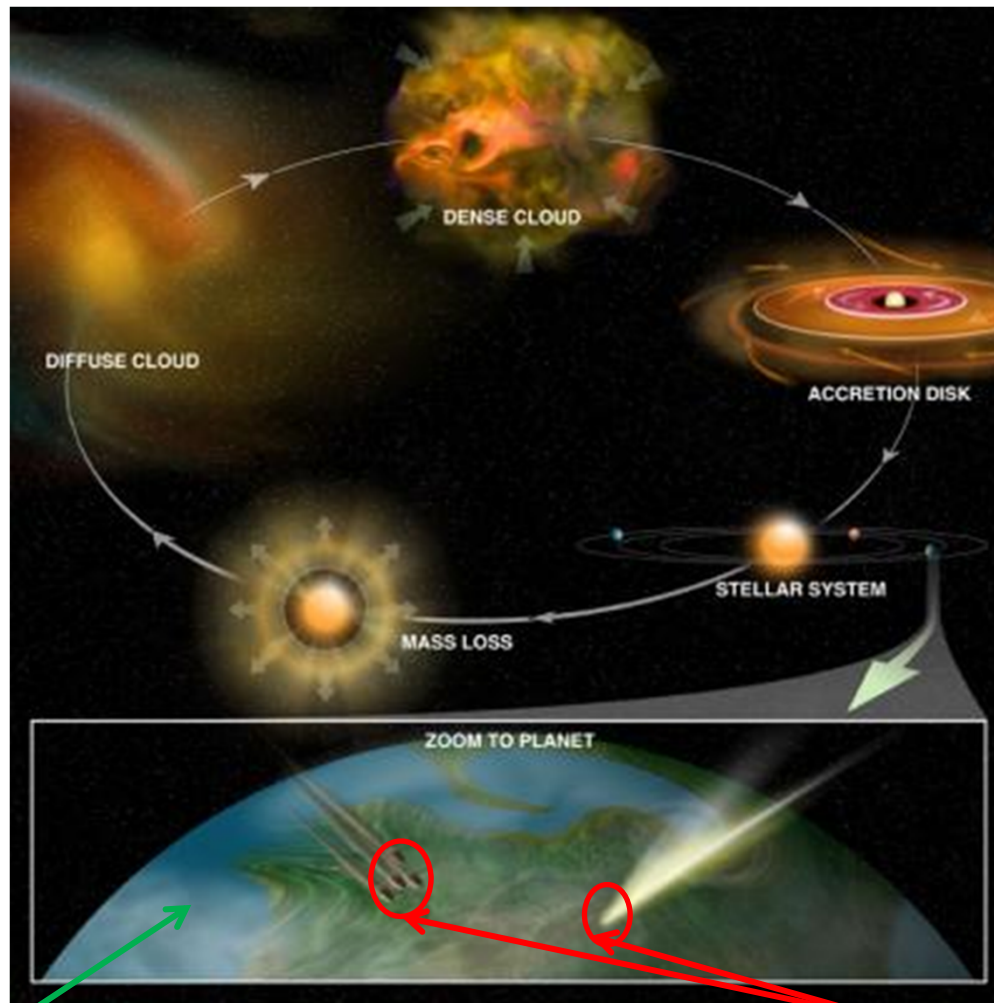
Effets du rayonnement cosmique et des photons VUV (flux stellaire)

Cycle de la matière Organique



**Réservoir de matière
organique exogène « Universel »**

Cycle de la matière Organique



Réservoir de matière
organique endogène
« spécifique »

Réservoir de matière
organique exogène
« Universel »

Quelle matière disponible?

Acides aminés

Alanine	Ala	A	3C	Leucine	Leu	L	6C
Arginine	Arg	R	5+1C	Lysine	Lys	K	6C
Acide Aspartique	Asp	D	4C	Méthionine	Met	M	4+1C
Asparagine	Asn	N	4C	Phénylalanine	Phe	F	3+6C
Cystéine	Cys	C	3C	Proline	Pro	P	5C
Acide Glutamique	Glu	E	5C	Sérine	Ser	S	3C
Glutamine	Gln	Q	5C	Thréonine	Thr	T	4C
Glycine	Gly	G	2C	Tryptophane	Trp	W	3+8C
Histidine	His	H	3+3C	Tyrosine	Tyr	Y	3+6C
Isoleucine	Ile	I	6C	Valine	Val	V	5C

B

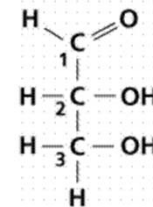
2C Glycine	4C α -aminobutyrique acide	5C Valine
3C Alanine	α -aminoisobutyrique acide	Proline
Sarcosine	N-Méthylalanine	Isovaline
	N-Ethylglycine	Norvaline
6C Leucine	7C 2-Aminoheptanoïque acide	2-Amino-2-éthylpentanoïque acide
Isoleucine	2-Amino-2,4-diméthyl pentanoïque acide	2-Amino-3-méthylhexanoïque acide
Norleucine	2-Amino-2,3-diméthyl pentanoïque acide	2-Amino-3,4-diméthyl pentanoïque acide
2-Méthylnorvaline	2-Amino-3-éthylpentanoïque acide	2-Amino-5-méthyl hexanoïque acide
2-Amino-2,3-diméthyl butanoïque acide	2-Amino-4-méthyl hexanoïque acide	2-Amino-2,3,3-triméthyl butanoïque acide
2-Amino-2-éthyl butanoïque acide	2-Amino-3,3-diméthyl pentanoïque acide	2-Amino-2-éthyl-3-méthyl butanoïque acide
Pseudoleucine	2-Amino-4,4-diméthyl pentanoïque acide	2-Amino-2-méthylhexanoïque acide
Cycloleucine		

C

Acide Aspartique	2-Aminobutane -1,4-dioïque acide	2-Aminoheptane -1,7-dioïque acide
Acide Glutamique	2-Amino-2-méthyl pentanoïque acide	
2-Amino-3-méthyl butane-1,4-dioïque acide	2-Aminohexane -1,6-dioïque acide	

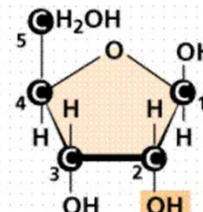
Sucres

Three-carbon sugar

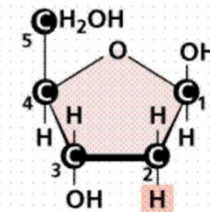


Glyceraldehyde

Five-carbon sugars

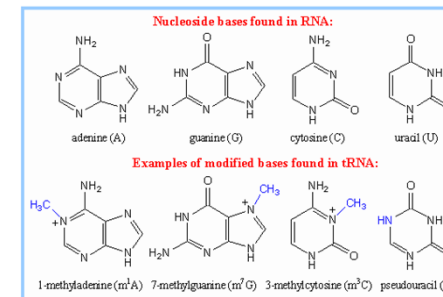


Ribose



Deoxyribose

Bases nucléiques



- Comment former les macromolécules que sont les peptides et les oligonucléotides.

Molécules simples
(i.e. NH_3 , CO_2 , CH_4)

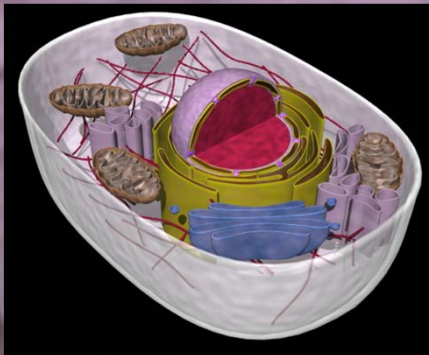


building blocks

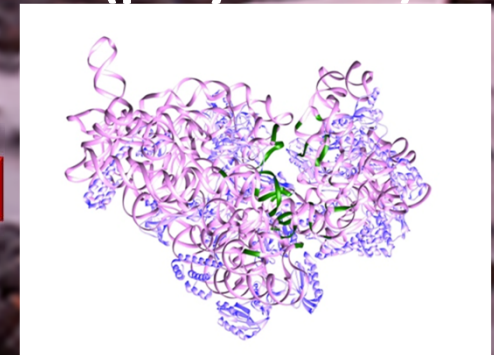
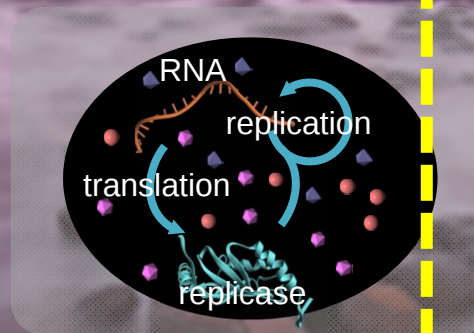


“biomolecules”
(polymères)

Cellule vivante

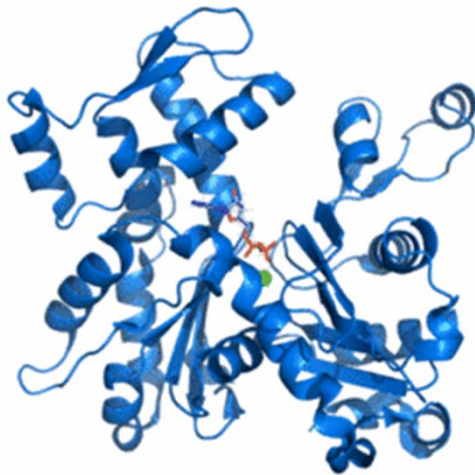
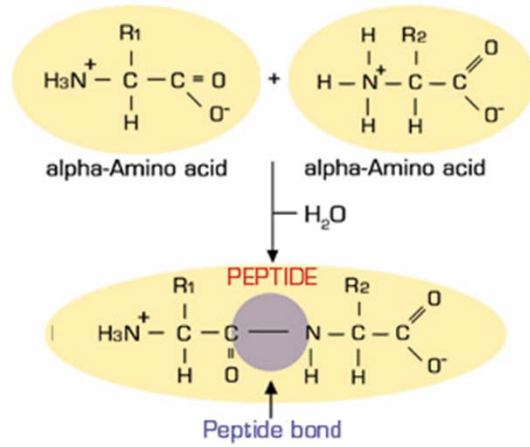


Cellule primitive



Quelles molécules formées?

● Les oligopeptides

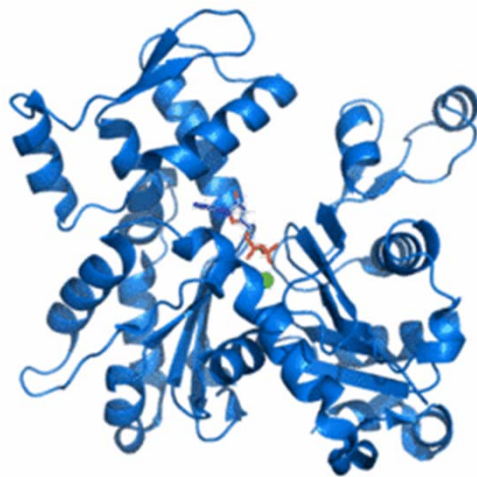
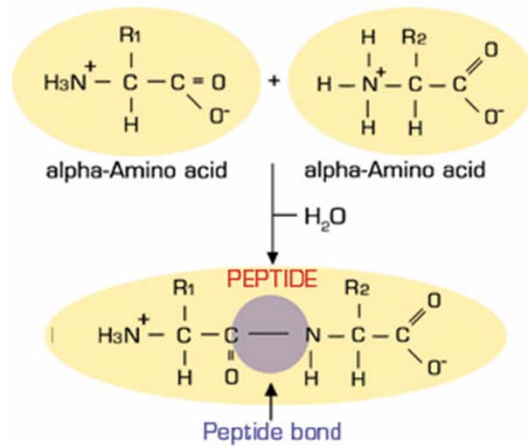


Structuration
Catalyseur

Protéine
Enzyme

Quelles molécules formées?

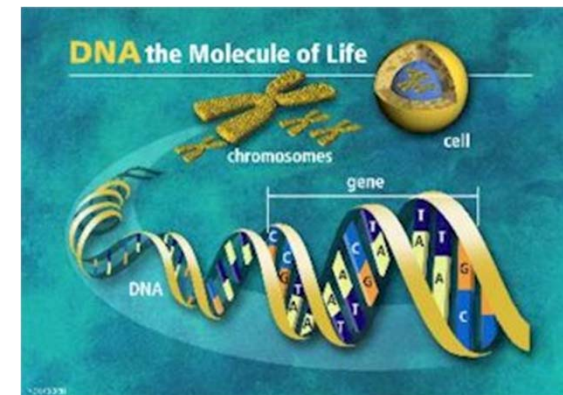
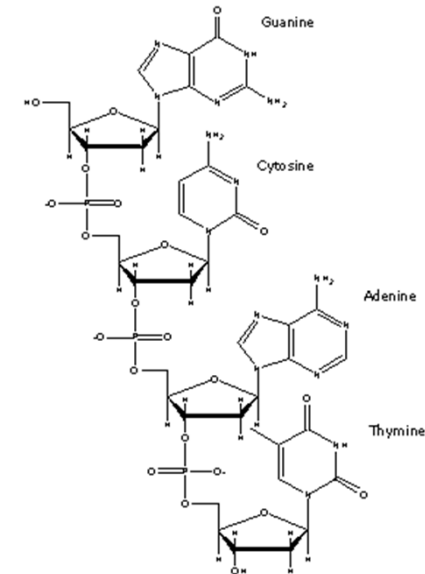
Les oligopeptides



Structuration
Catalyseur

Protéine
Enzyme

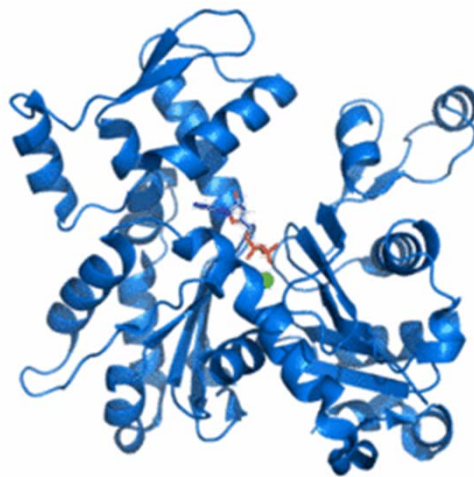
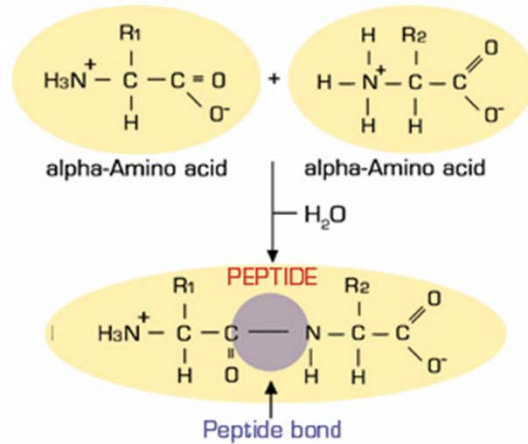
Les oligonucléotides



Support de l'information génétique (ADN/ARN)
Catalyseur (ribozymes)

Quelles molécules formées?

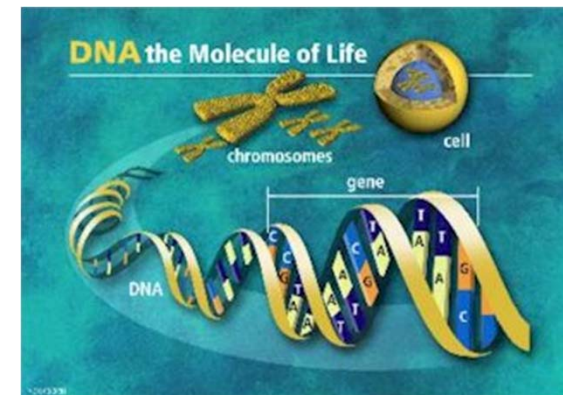
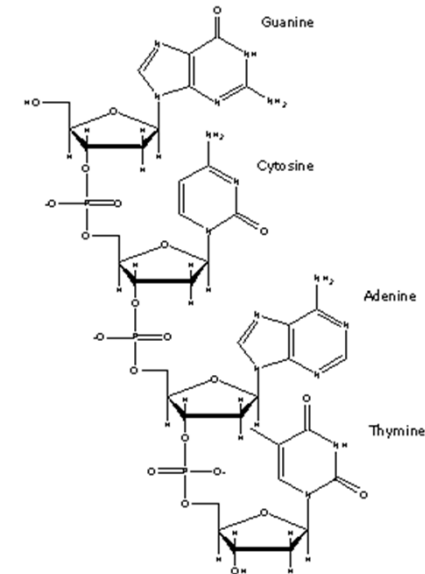
Les oligopeptides



Structuration
Catalyseur

Protéine
Enzyme

Les oligonucléotides



Interconnecté

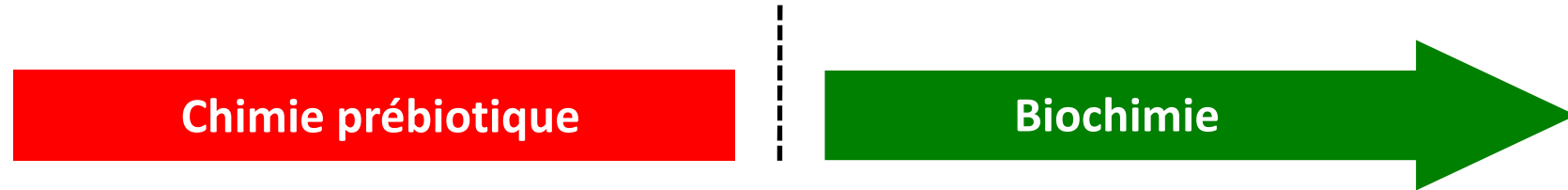


- ① Pas de protéines sans réplication
- ② Pas de réplication sans protéines

Support de l'information génétique (ADN/ARN)
Catalyseur (ribozymes)

A la recherche de l'origine du vivant

Origine du vivant



Chimie prébiotique:

Comment former des structures complexes en terme moléculaire ou de réseaux chimiques

Comment peuvent évoluer ces réseaux chimiques vers des systèmes biochimiques

(évolution chimique, sélectivité, réplication...).

A la recherche de l'origine du vivant

Origine du vivant

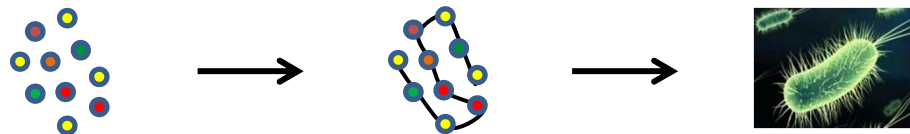
Chimie prébiotique

Biochimie

Chimie prébiotique:

Comment former des structures complexes en terme moléculaire ou de réseaux chimiques
Comment peuvent évoluer ces réseaux chimiques vers des systèmes biochimiques
(évolution chimique, sélectivité, réplication...).

1- Matière organique à partir des réservoirs endogène et exogène.
Etablir quels passages possibles des briques à l'échelle macromoléculaire.



A la recherche de l'origine du vivant

Origine du vivant

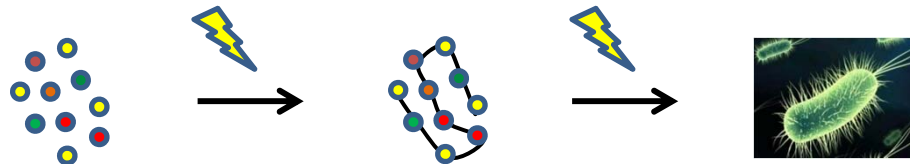
Chimie prébiotique

Biochimie

Chimie prébiotique:

Comment former des structures complexes en terme moléculaire ou de réseaux chimiques
Comment peuvent évoluer ces réseaux chimiques vers des systèmes biochimiques
(évolution chimique, sélectivité, réplication...).

1- Matière organique à partir des réservoirs endogène et exogène.
Etablir quels passages possibles des briques à l'échelle macromoléculaire.



2- Energie.

A la recherche de l'origine du vivant

Origine du vivant

environnement spécifique

Chimie prébiotique

Biochimie

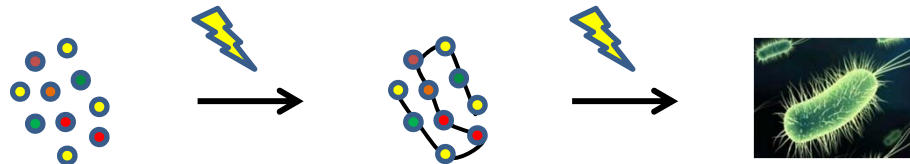
Chimie prébiotique:

Comment former des structures complexes en terme moléculaire ou de réseaux chimiques

Comment peuvent évoluer ces réseaux chimiques vers des systèmes biochimiques (évolution chimique, sélectivité, réplication...).

1- Matière organique à partir des réservoirs endogène et exogène.

Etablir quels passages possibles des briques à l'échelle macromoléculaire.



2- Energie.

3- Auto-organisation de la matière.

Evolution chimique et sélectivité.

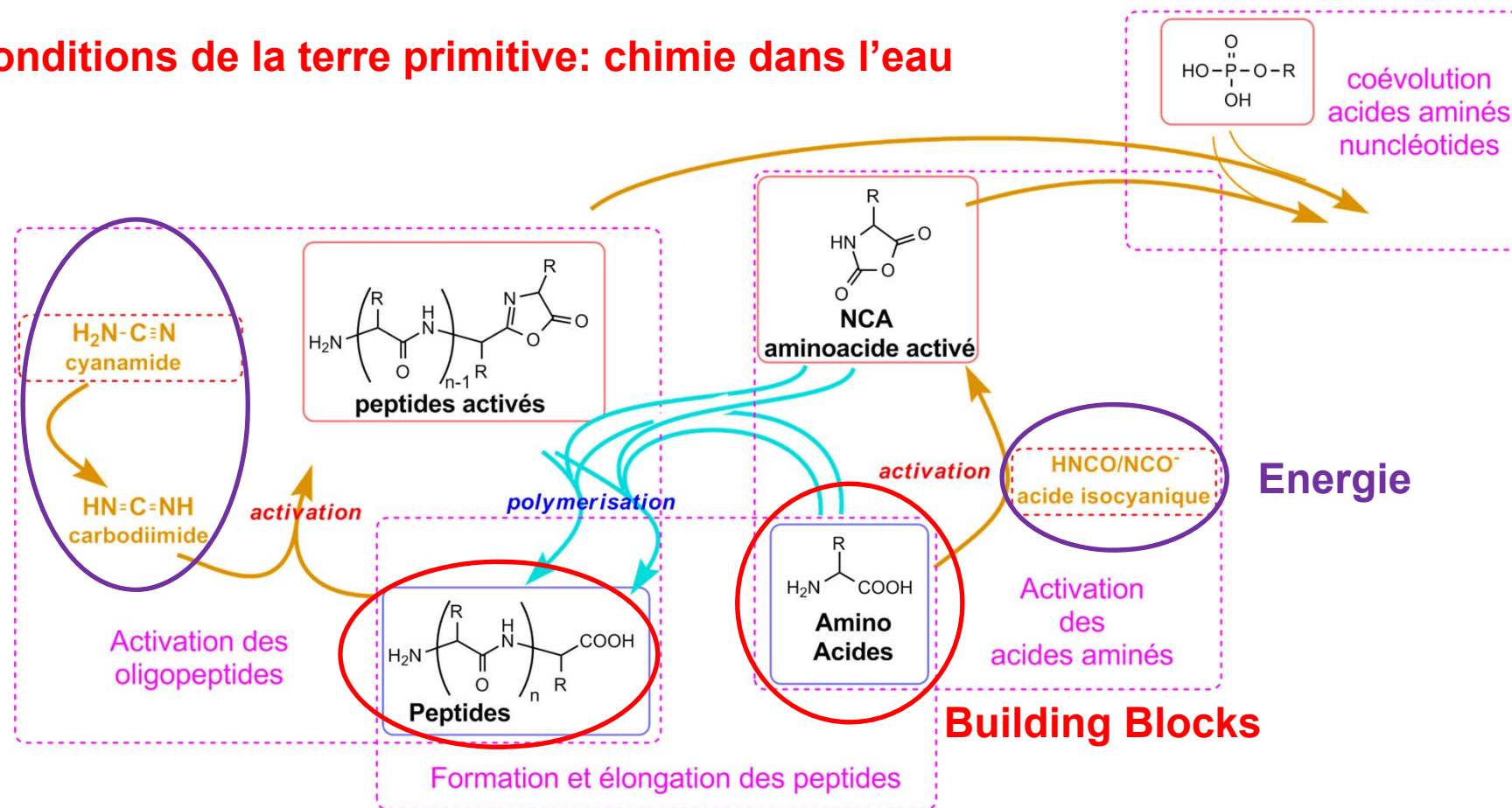
Pascal R., *J.Syst.Chem.*, **3** (2012) 3

Pross et al., *Open Biology*, **3** (2013) 120190

Pross A., *J.Syst.Chem.*, **2** (2011) 1-14

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution

Conditions de la terre primitive: chimie dans l'eau



Danger et al., *Angew.Chem., Int. Ed.*, **52** (2013) 611-614

Danger et al., *J.Am.Chem.Soc.*, **128** (2006) 7412-7413

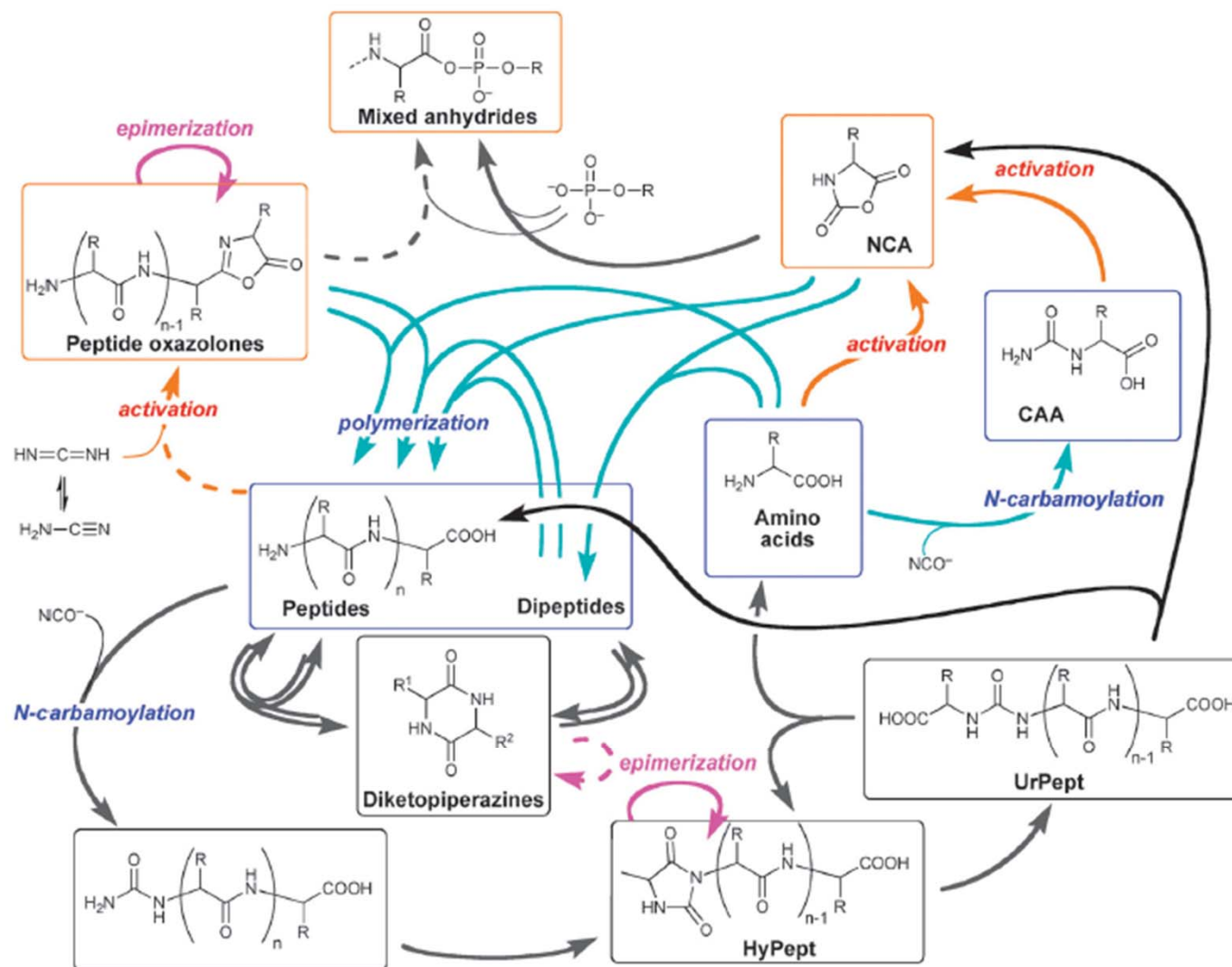
Biron et al., *Angew.Chem., Int. Ed.*, **44** (2005) 6731-6734

Pascal et al., *Top.Curr.Chem.*, **259** (2005) 69-122

pH 6-7
T°C 25-80°C

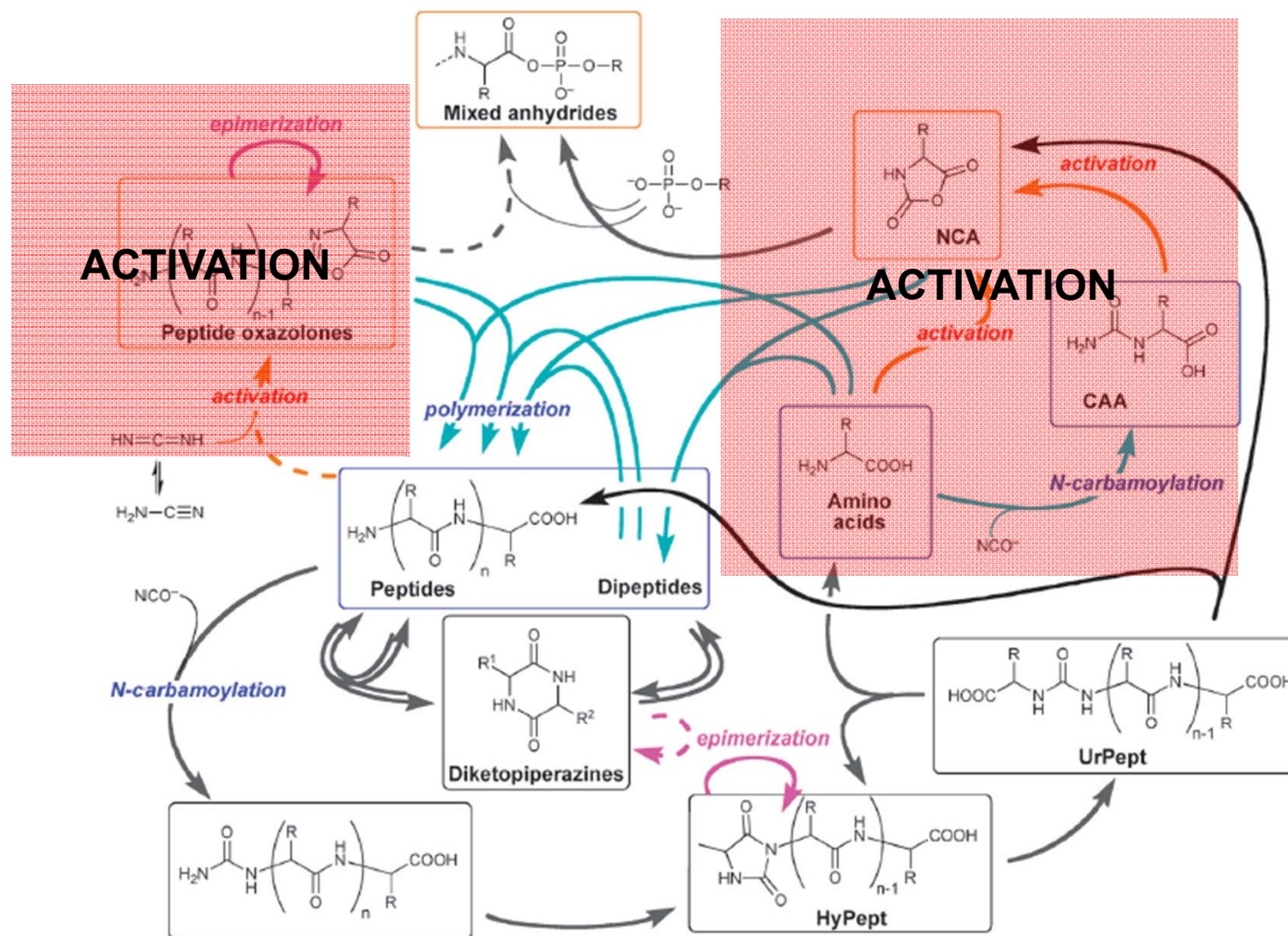
Concentrations $\approx$ mM

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution



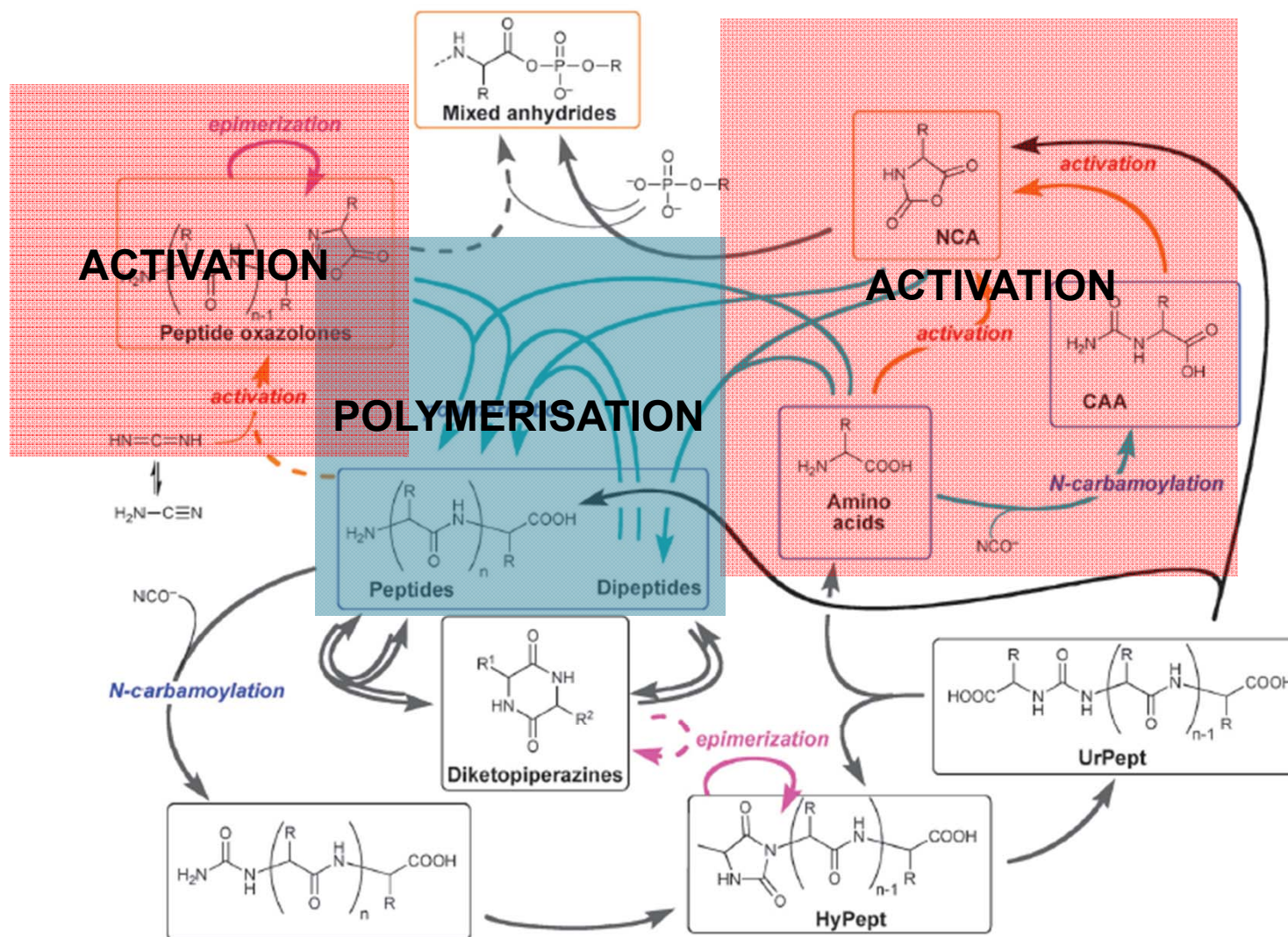
Scheme 13 Overall view of selected pathways identified from experiments or presumed from the analysis of the literature, which could constitute the systems chemistry of α -amino acids and peptides in prebiotic aqueous environments at values of pH close to neutrality. The network is based on the reactivity of four cyclic intermediates, namely NCAs, 5(4*F*)-oxazolones, hydantoins, and diketopyrazines, which are involved in reaction loops and introduce possibilities of racemization/epimerization. The high reactivity of NCAs and 5(4*F*)-oxazolones gives rise to possibilities of connection with nucleotide chemistry.

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution



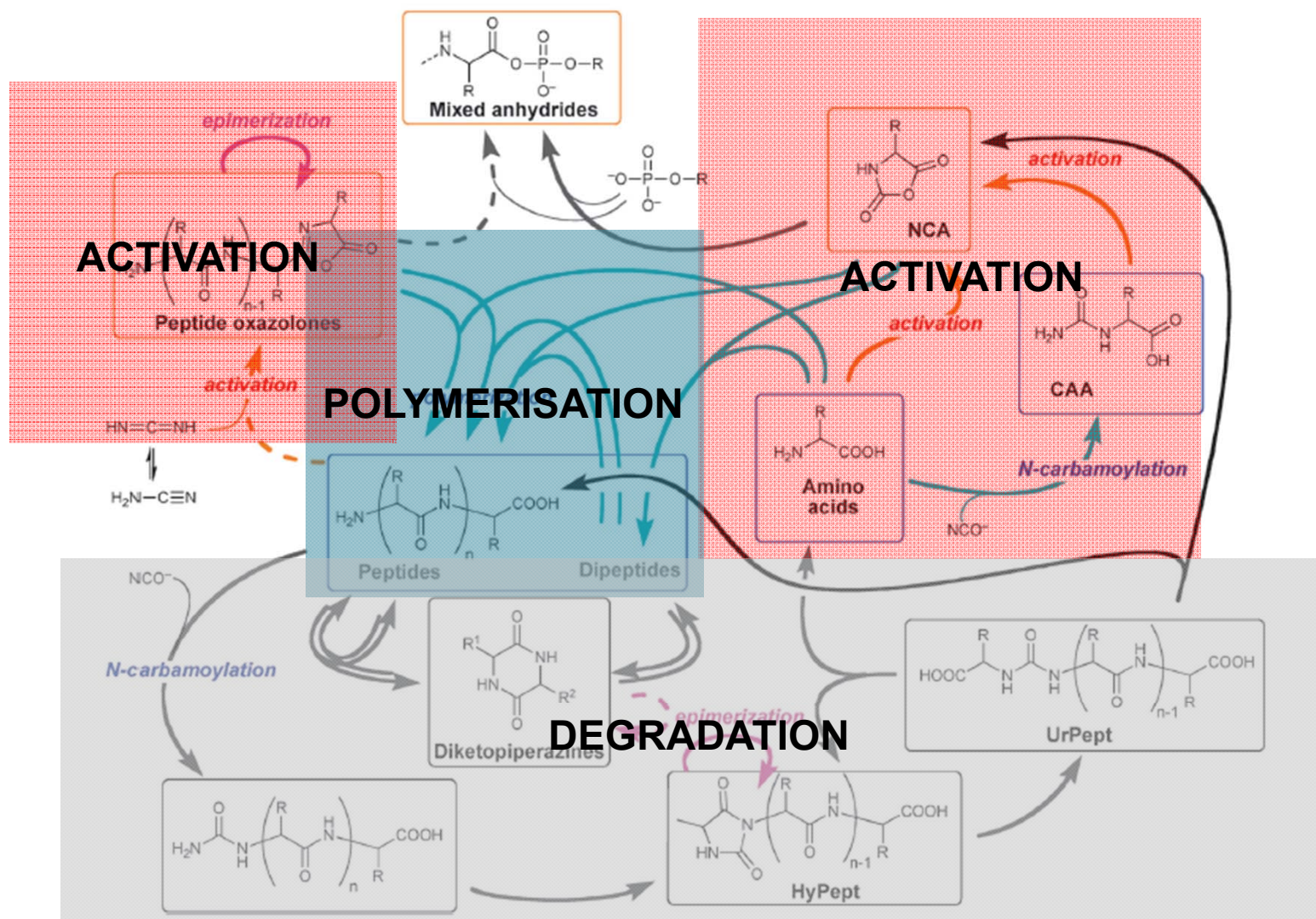
Scheme 13 Overall view of selected pathways identified from experiments or presumed from the analysis of the literature, which could constitute the systems chemistry of α -amino acids and peptides in prebiotic aqueous environments at values of pH close to neutrality. The network is based on the reactivity of four cyclic intermediates, namely NCA, 5(4H)-oxazolones, diketopiperazines, and dipeptides, which are involved in reaction loops and introduce possibilities of racemization/epimerization. The high reactivity of NCAs and 5(4H)-oxazolones gives rise to possibilities of connection with nucleotide chemistry.

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution



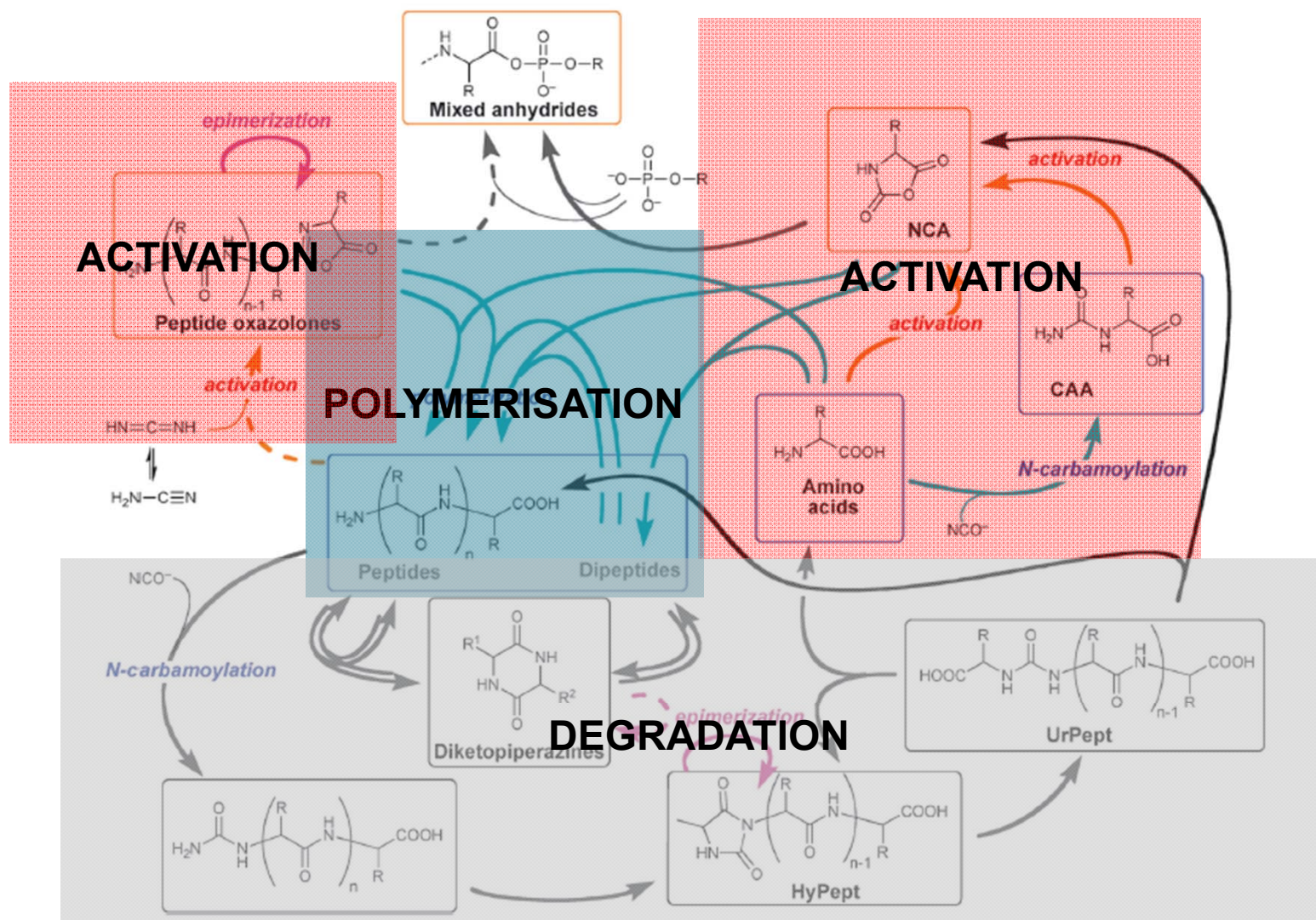
Scheme 13 Overall view of selected pathways identified from experiments or presumed from the analysis of the literature, which could constitute the systems chemistry of α -amino acids and peptides in prebiotic aqueous environments at values of pH close to neutrality. The network is based on the reactivity of four cyclic intermediates, namely NCA, 5(4H)-oxazolones, peptide oxazolones, and diketopiperazines, which are involved in reaction loops and introduce possibilities of racemization/epimerization. The high reactivity of NCAs and 5(4H)-oxazolones gives rise to possibilities of connection with nucleotide chemistry.

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution



Scheme 13 Overall view of selected pathways identified from experiments or presumed from the analysis of the literature, which could constitute the systems chemistry of α -amino acids and peptides in prebiotic aqueous environments at values of pH close to neutrality. The network is based on the reactivity of four cyclic intermediates, namely NCAs, 5(4H)-oxazolones, hydantoins, and diketopiperazines, which are involved in reaction loops and introduce possibilities of racemization/epimerization. The high reactivity of NCAs and 5(4H)-oxazolones gives rise to possibilities of connection with nucleotide chemistry.

Projet PEPSE: Prebiotic Environment for Peptide Synthesis and Evolution

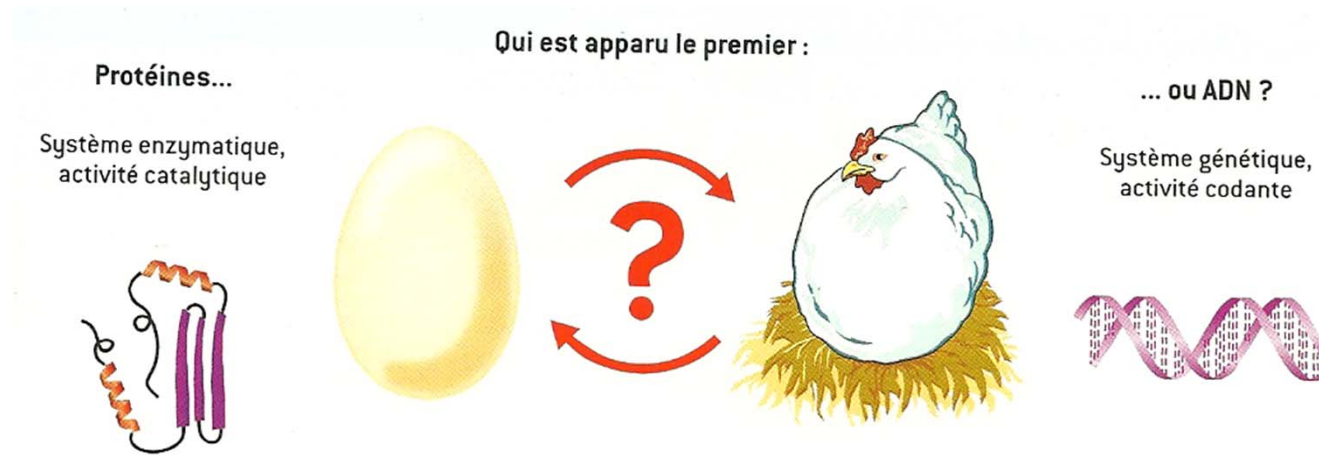


Scheme 13 Overall view of selected pathways identified from experiments or presumed from the analysis of the literature, which could constitute the systems chemistry of amino acids and peptides in prebiotic environments. The network is based on the reactivity of four cyclic intermediates, which are involved in reaction loops and introduce possibilities of accumulation and amplification. The degradation of NCA and CAA structures gives rise to possibilities of connection with nucleotide chemistry.

SELECTIVITE et EVOLUTION

Les Différents scénarios

Le métabolisme ou la réplication



● Métabolisme en premier

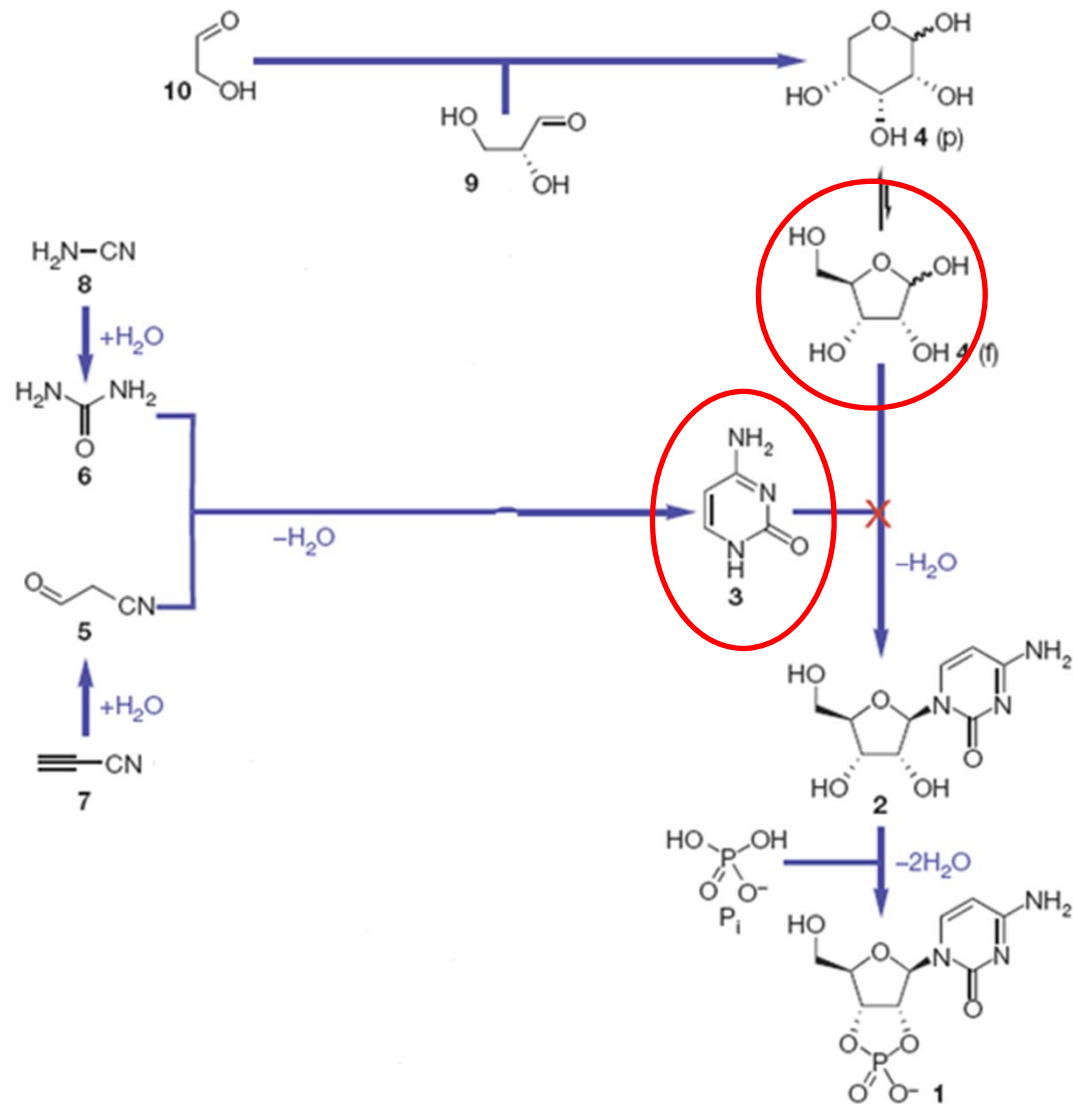
- Formations peptide, ARN, compartimentation
- Propriété de catalyse des oligopeptides
- Matière disponible et synthèse prébiotique faisable
- Quelle capacité d'évolution?
- Emergence du code génétique?

● Réplication en premier

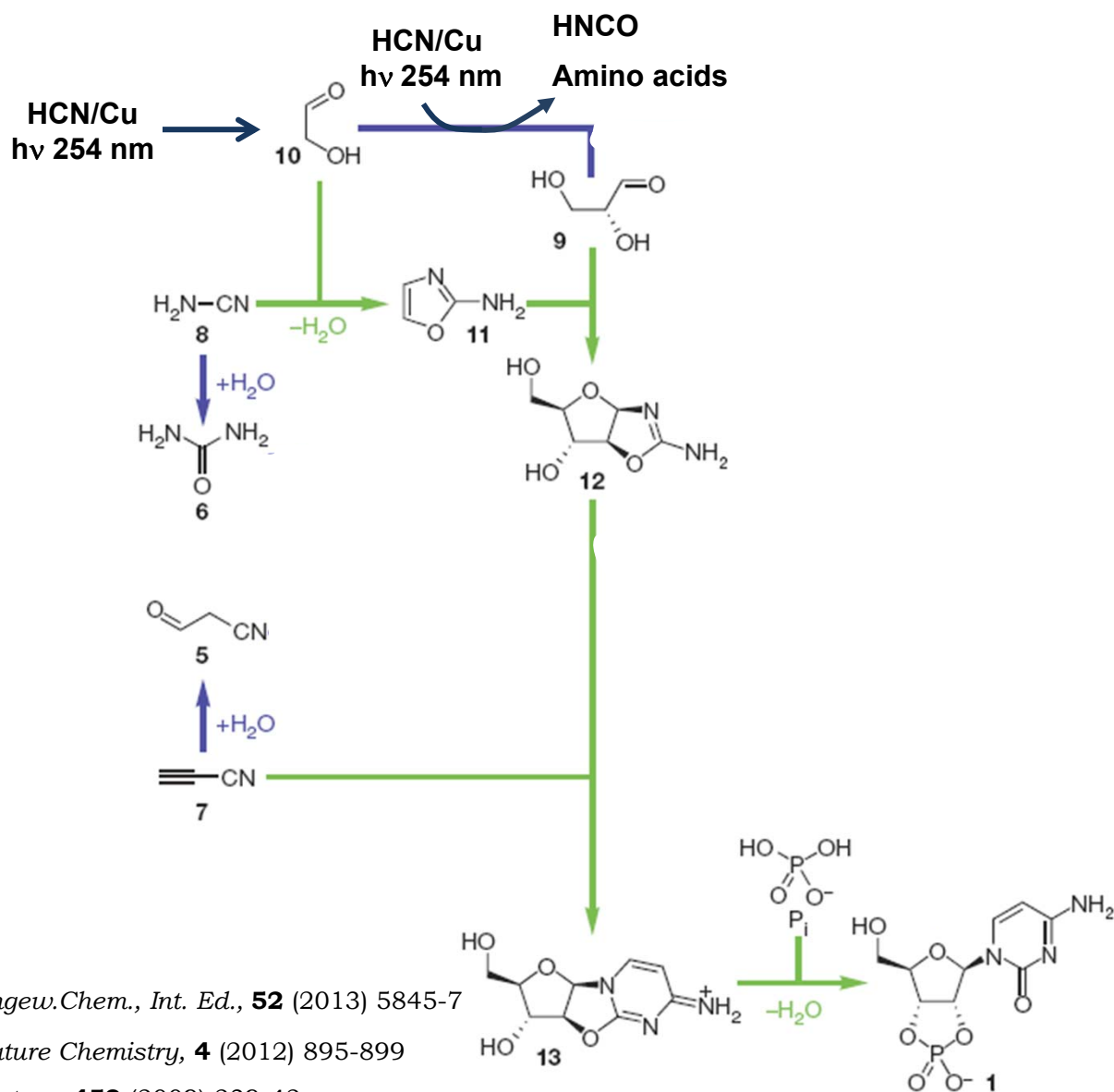
- ARN support de l'information génétique
- Base de la réplication = base de l'évolution
- Rôle catalytique démontré (ribozymes)
- Difficile de former l'ARN sans enzymes

Oligonucleotides

● Formation des nucléosides (S+B) et nucléotide (S+B+P)



Oligonucleotides

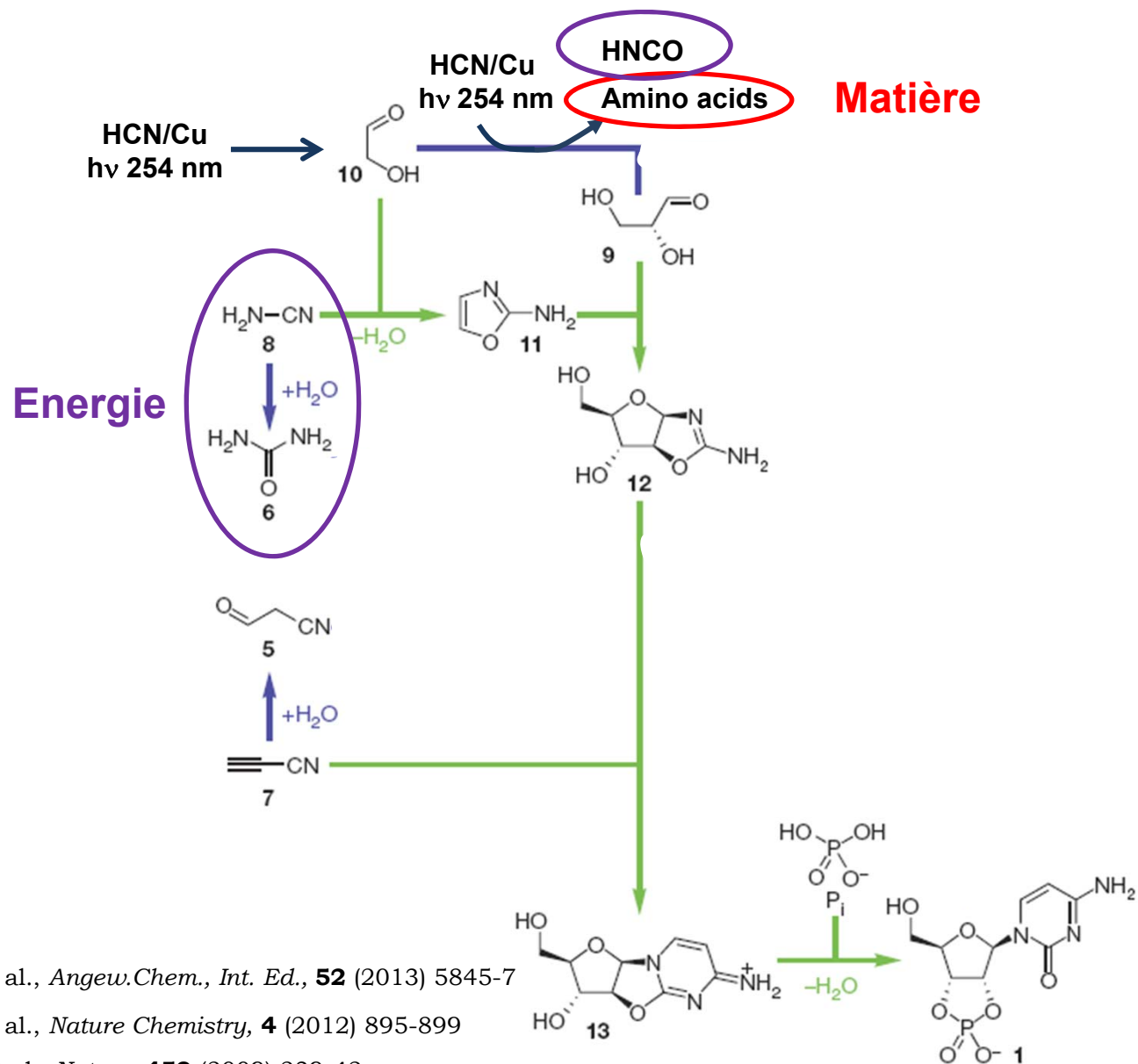


Ritson et al., *Angew.Chem., Int. Ed.*, **52** (2013) 5845-7

Ritson et al., *Nature Chemistry*, **4** (2012) 895-899

Powner et al., *Nature*, **459** (2009) 239-42

Oligonucleotides



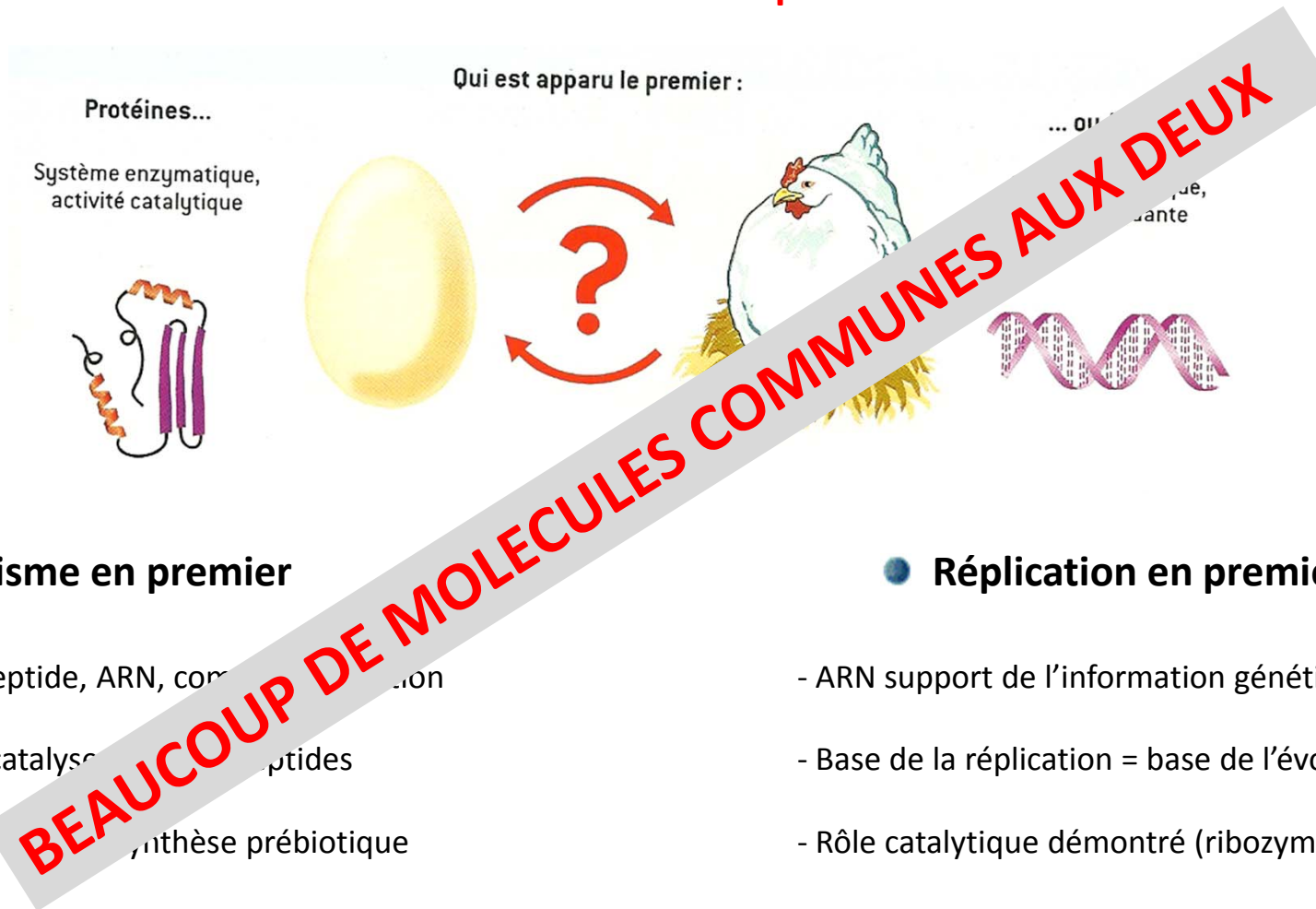
Ritson et al., *Angew.Chem., Int. Ed.*, **52** (2013) 5845-7

Ritson et al., *Nature Chemistry*, **4** (2012) 895-899

Powner et al., *Nature*, **459** (2009) 239-42

Les Différents scénarios

Le métabolisme ou la réplication



● Métabolisme en premier

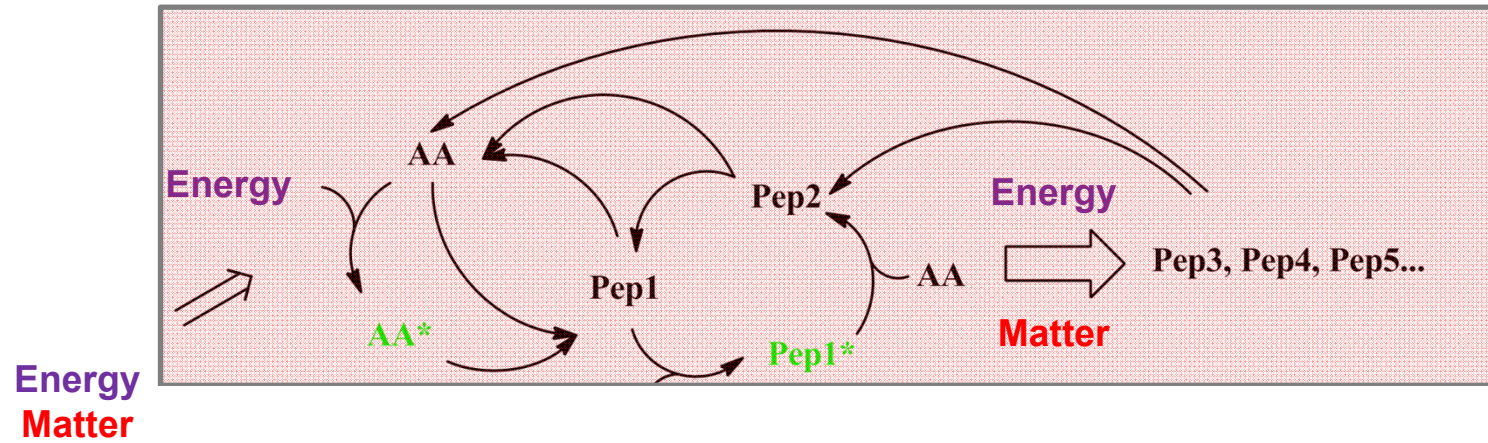
- Formations peptide, ARN, composition
- Propriété de catalyser les peptides
- Matière disponible, synthèse prébiotique faisable
- Quelle capacité d'évolution?
- Emergence du code génétique?

● Réplication en premier

- ARN support de l'information génétique
- Base de la réplication = base de l'évolution
- Rôle catalytique démontré (ribozymes)
- Difficile de former l'ARN sans enzymes

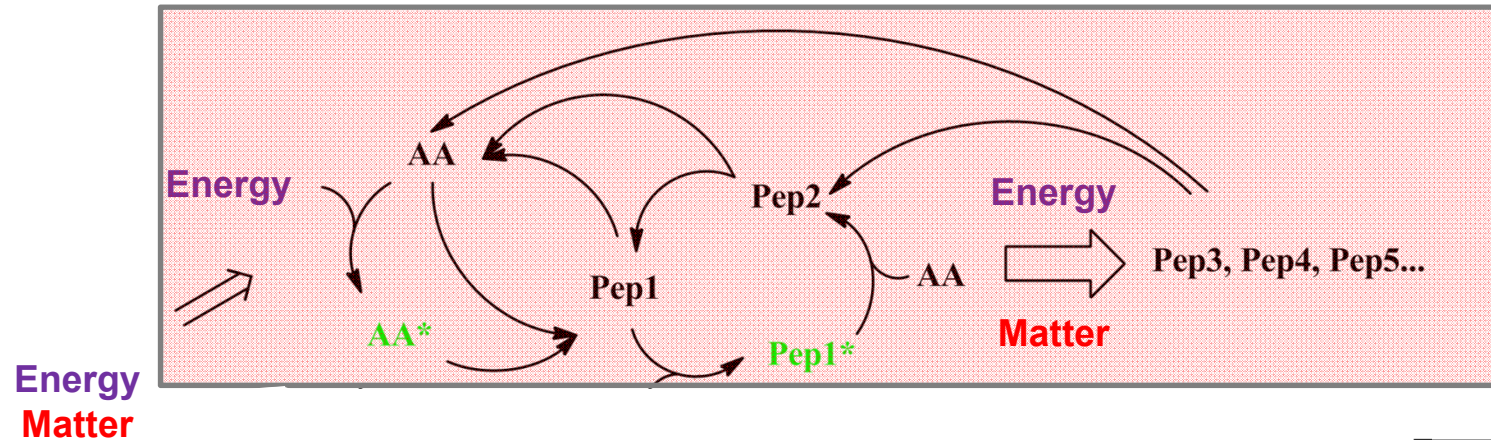
Les Différents scénarios

**Protein
formation**

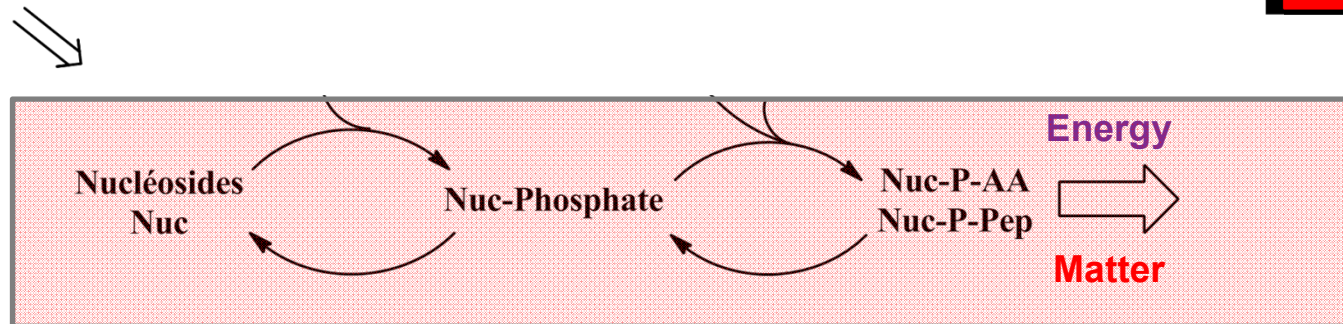


Les Différents scénarios

Protein formation



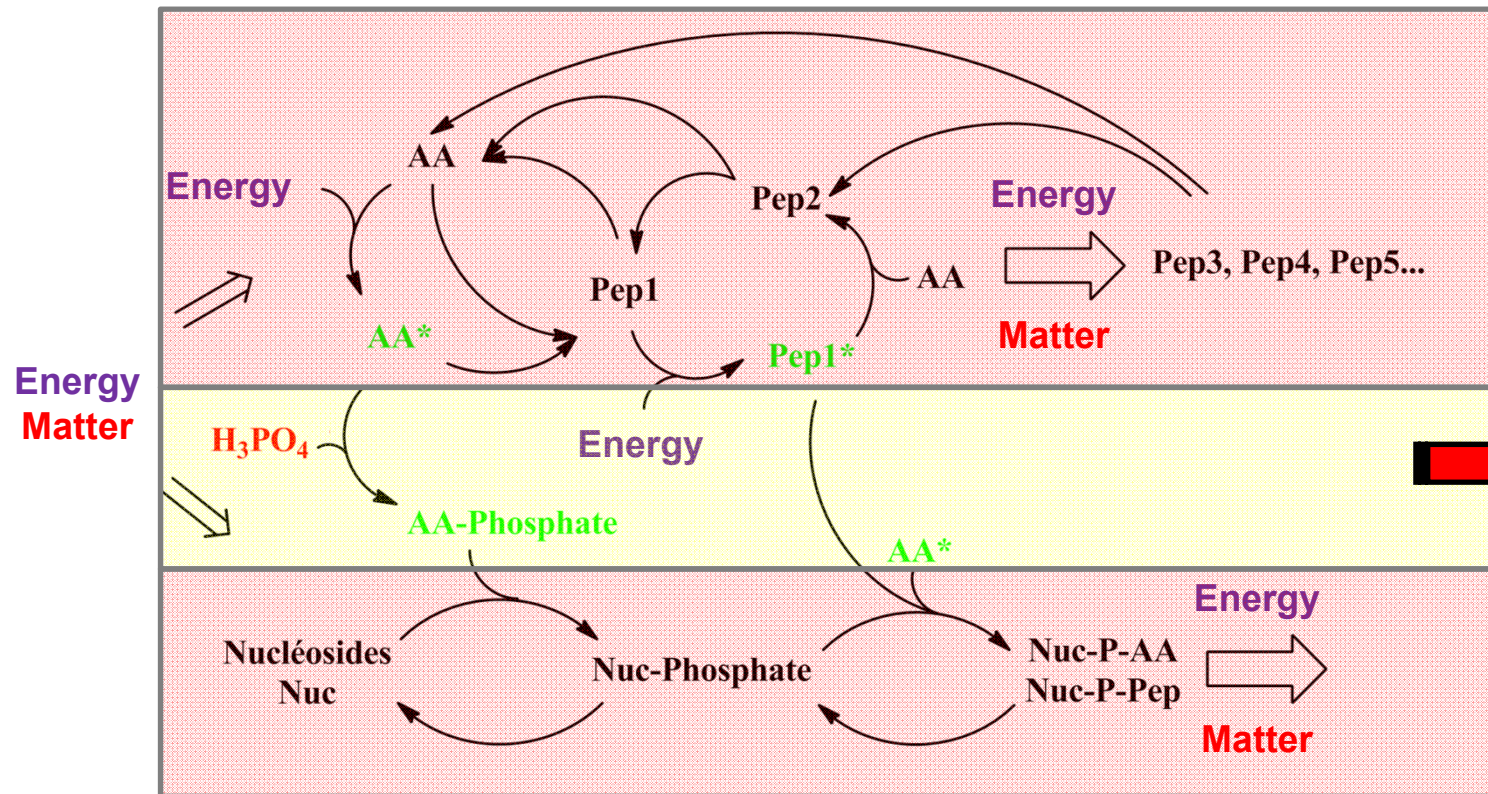
Coevolution



DNA/RNA formation

Les Différents scénarios

Protein formation

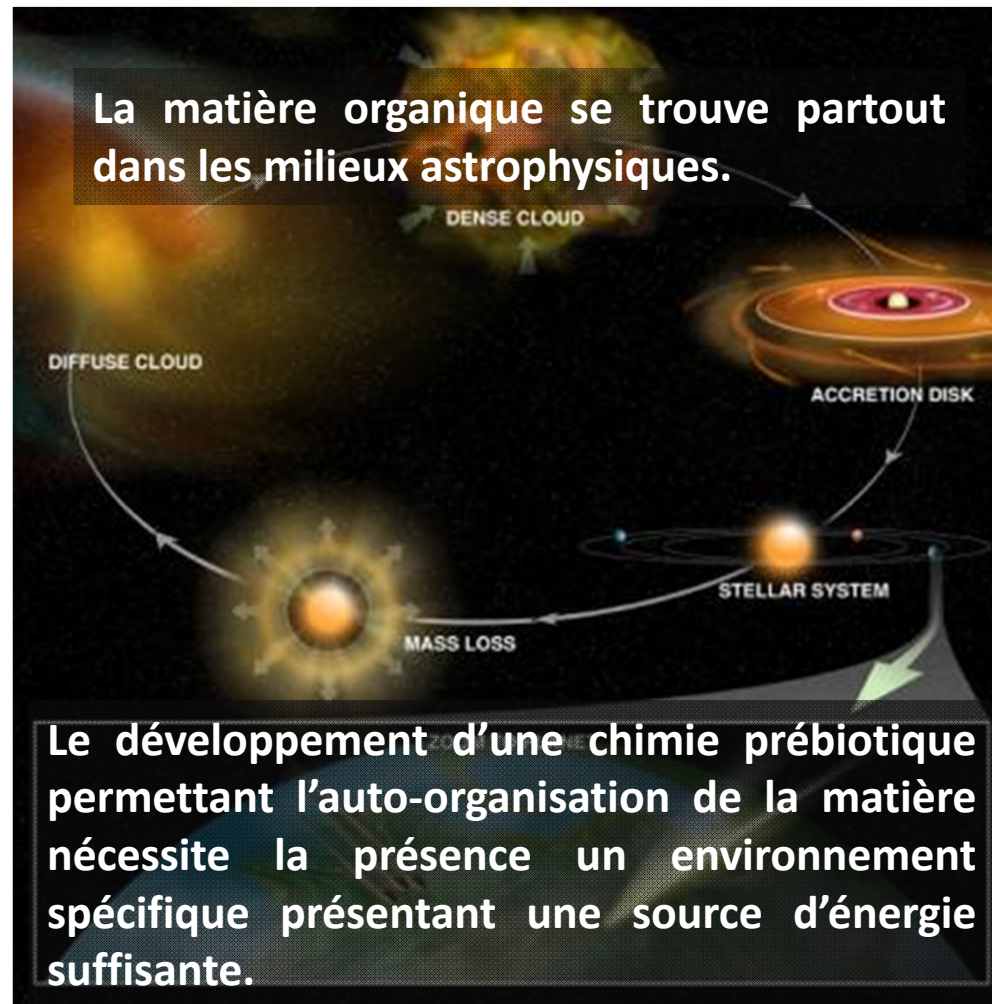


DNA/RNA formation

Biron et al., *J.Am.Chem.Soc.*,
126 (2004) 9198-9199

Biron et al., *Angew.Chem., Int. Ed.*,
44 (2005) 6731-6734

Cycle de la matière organique



Prébiotique

Environnement spécifique

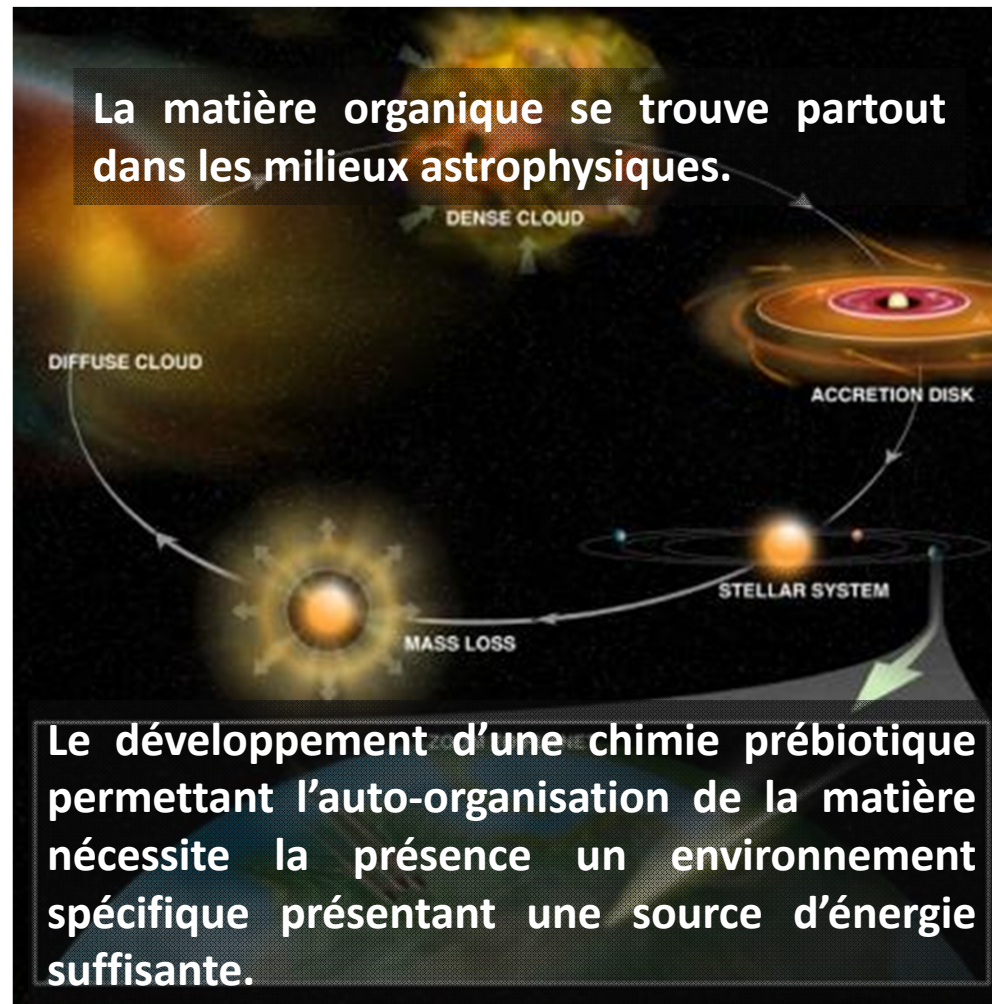
Chimie pérbiotique

Origine du vivant

Biotique

Biochimie

Cycle de la matière organique



Prebiotique

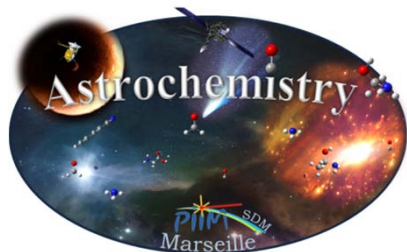
Environnement spécifique

Biotique

Evolution continue

Quelle importance ont les apports exogènes pour l'exobiologie?

- La matière organique exogène est une observable (ex. météorites),
- La matière organique exogène peut être disponible dans d'autres systèmes planétaires,
- La matière organique exogène une base de départ pour comprendre les environnements permettant le développement de processus prébiotiques (ex. Terre Primitive),
- Disponibilité d'analogues de cette matière au sein des laboratoires,
- Etudier le comportement d'analogues dans différentes conditions physico-chimiques.



Astrochemistry Group, team Spectrométries et Dynamique Moléculaire
 Laboratory Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires
 UMR-CNRS 7345, Centre Saint-Jérôme, case 252
 Aix-Marseille University, 13397, Marseille, France
<http://piim.univ-amu.fr/SDM-Astrochimie>



Fabien Borget



Ninette Belles-Limeul
(Post-Doc)



Thierry Chiavassa



Isabelle Couturier



Grégoire Danger



Fabrice Duvernay



Aurélien Fresneau
(PhD student)



Jennifer Noble
(Post-doc)



Nathalie Pietri



Patrice Theulé



Abdelkrim Toumi
(PhD student)

Collaboration and funding

H. Cottin, N. Fray, V. Vinogradoff LISA Paris est

L. D'Hendecourt, P De Marcellus, Paola Modica IAS Paris Sud

JC Guillemin, Y. Trolez, ENSC Rennes

R. Pascal, IBMM, Montpellier

J. Sutherland, MRC-LMB, Cambridge, GB

C. Favre, MRC-LMB, University of Michigan, USA

A. Rimola, Barcelona Nanoclusters Chemistry, Spain

D. Talbi, P. Ghequiere IBMM, Montpellier

R. Thissen, V. Vuitton, F. Orthous-Daunay, IPAG, Grenoble

M. Viso, CNES

Funding: CNRS (PCMI/EPOV/PNP), CNES, région
 PACA and ANR