***Terre & Univers***

***Les objectifs*** ***du cours.***

* ***Appréhender l’architecture de l’Univers.***
* ***Comprendre l’histoire de la matière, du Big bang au cycle de vie et de mort des étoiles.***
* ***Connaître les constituants de notre « nouveau système solaire ».***

Il y a 17000 ans à Lascaux, les ‘Michel-Ange’ de la préhistoire représentaient déjà les constellations du ciel… C’est ce que semblent révéler les travaux d’archéo-astronomie de Chantal JEGUES-WOLKIEWIEZ, ethno-astronome. Pour Chantal JEGUES-WOLKIEWIEZ, les peintures rupestres de Lascaux représentent une carte du ciel…

**I – L’architecture de l’Univers mise en lumière…**

1 - L’Univers, de l’infiniment petit à l’’infiniment grand…

A – La matière: particules et interactions

.

a – Les particules élémentaires

b – Les interactions fondamentales

B – Parlons un peu de nous…

C – L’Univers à la manière des poupées russes…

a – Le système solaire

b – Les étoiles proches

c – La Galaxie (Voie Lactée)

d – L’amas local

e – Le superamas local

f – Le Cosmos

D – La place du ‘vide’ dans l’Univers

2 – Lumière et rayonnement électromagnétique

A – La lumière visible et le spectre électromagnétique

B – Spectre atomique et composition de la matière

C – L’effet Doppler

D – La lumière: une formidable machine à remonter le temps

**II – Une petite histoire de la matière**

1 – « Aux origines, avant que rien n’existe, …

2 – Le ‘Big Bang’, des origines de l’Univers à la Vie…

3 – Les premiers pas des galaxies

4 – Naissance, vie et mort des étoiles

A – Qu’est ce qu’une étoile ?

B – Naissance et nucléosynthèse

C – Classification des étoiles

D – Des destins variés…

5 – Planètes en construction

**III – Notre ‘nouveau’ système solaire**

1 – Introduction

2 – Le Soleil

3 – Les planètes

A – Mercure

B – Venus

C – Terre

D – Mars

E – Jupiter

F – Saturne

G – Uranus

H – Neptune

4 – Les planètes naines

A – Cérès

B – Les plutoïdes

a – Les plutinos: Pluton

b – Les cubewanos: Makemake & Haumea

c – Les objets épars: Éris

d – Les objets détachés: bientôt Sedna ?

5 – Les petits corps du système solaire

A – Les objets trans-neptuniens

B – Les comètes

C – Les astéroïdes

D – Les objets géocroiseurs

6 – Les planètes extrasolaires (exoplanètes)

7 – La vie dans le système solaire

**I – L’architecture de l’Univers mise en lumière…**

**1 - L’Univers, de l’infiniment petit à l’’infiniment grand…**

**A – La matière: particules et interactions (Attention, la taille du proton a été revue à la baisse -> 0.8418 x 10-15 m.)**

**a – Les particules élémentaires**

**D’autres bosons prédits par la physique des particules restent à découvrir: le graviton et le boson de Higgs,** **et l’antimatière (une antiparticule de chaque fermion).**

Le spin permet de différencier les fermions (spin =1/2) des bosons (spin =1).

Les particules appartenant à la catégorie III sont très instables tandis que ceux de la catégorie 1 sont stables.

Les quarks sont soumis à tous les types d’interactions.

Les bosons sont vectrices des forces fondamentales des forces de l’univers (gravité, force nucléaire, … ex : photon ).

Les gluons : connectent les différentes particules/molécules.

Ils existent des molécules hypothétiques ( pas encore découvertes) telles que le graviton qui serait responsable de la gravité(spin=2) et le boson de Higgs (spin 0) qui serait responsable de la masse.

L’antimatière sont des particules est une antiparticule d’e-.

**b – Les interactions fondamentales**

**Tous les phénomènes observés dans l’Univers semblent expliqués par 4 interactions fondamentales. (Les bosons sont les vecteurs de ces interactions).**

* Force électromagnétique *Photon (γ) Grains de lumière, magnétisme, électricité…*
* Force nucléaire forte 8 Gluons (g) Cohésion des quarks, des nucléons,…
* Force nucléaire faible Bosons de force faible (W+, W-, Z0) Radioactivité β , fusion nucléaire,…
* Force de gravitation Graviton (G) *hypothétique Attraction, marées, orbites, sphéricité…*
* + Force de masse ? Boson de Higgs (H) *hypothétique Responsable de la masse des particules*

Les bosons sont porteurs d’interactions fondamentales.

* La force électromagnétique : portée par le photon (lumière)
* La force nucléaire forte : portée par le gluon (cohésion des quarks)
* La force nucléaire faible : portée par les bosons de force faible (responsable de la radioactivité)
* La force de gravitation : portée par le graviton (hypothétique) (responsable de la cohésion des corps solides, des étoiles autour de la galaxie)
* La force de masse ? : portée par le boson de Higgs (toujours hypothétique) responsable de la masse des particules.

**B – Parlons un peu de vous…**

65% d’oxygène (52 kg)

18,5% de carbone (14,8 kg)

9,5% d’hydrogène (7,6 kg) **Calcul effectué pour un homme de 80 kg, constitué de 71.027 atomes d’une 20aine d’éléments chimiques différents (O, H, C et N constituant à eux-seuls 96,2% de la masse corporelle).**

3,2% d’azote (2,6 kg)

1,5% de calcium (1,2 kg)

1% de phosphore (0,8 kg)

Pour un Homme de 80kg :

O,H,N, et C constituent 96.2% de notre masse corporelle.

Dans nos poumons, molécules organiques,…

Ces atomes viennent d’étoiles massives (O, C) il y a 4.5 milliards d’années, nous sommes donc des poussières d’étoiles.

**C – L’Univers à la manière des poupées russes…**

***Cosmos [≈ 159 al] Superamas de la Vierge[≈ 1006 al] Amas local étendu [≈ 206 al] Galaxie(Voie Lactée) [≈ 100.000 al] Étoile proches[≈ 4,3 - 20 al] Système solaire[≈ 1,6 al]***

**a – Le système solaire**

**L’architecture cosmique est faite de structures emboîtées, unifiées par la gravité.**

***D [Terre-Lune] = 380.000 km D [Terre-Soleil] = 150.000.000 km = 1 ua D [Soleil-Neptune] = 30 ua***

1. ***Système solaire interne & Ceinture d’astéroïdes [0 – 5,2 ua]***
2. ***Ceinture de Kuiper: [30 – 50 ua]***
3. ***Nuage d’Oort: [10.000 – 100.000 ua]***

Mesure 1.6 année lumière. Une année lumière (al) est la distance parcourue par la lumière en une année ( à la vitesse de 300 000km/s).

Il est composé des planètes telluriques (M🡪M), et des planètes externes (gazeuse/joviennes : J🡪N).

Pluton n’en fait pas partie, il est une planète naine.

D [Terre-Lune] = 380 000km

Le soleil est entouré par

* une ceinture d’astéroïdes, où une unité astéroïde (ua) = 150 millions de km.
* Ceinture de Kuiper (30-50ua)
* Nuage de Oort (10000 et 100 000ua)

**b – Les étoiles proches (*4,3 – 20 al.)***

**- La majorité de ces étoiles ne sont pas visibles à l’œil nu (hormis ‘Sirius’ et ‘Procyon’).**

**- On distingue des étoiles dotées d’un éclat bleu (étoiles + chaudes) ou rouge (étoiles - chaudes), le Soleil étant une étoile jaune (T° dans la moyenne).**

**- Un certain nombre sont des systèmes doubles ou triples d’étoiles** (ex: système triple ‘Alpha Centauri’, le système d’étoiles le plus proche de nous).

**- Certaines étoiles possèdent des systèmes planétaires (ex: ‘Gliese 876’).**

***Système α Centauri***

***•*** *Système triple (Constellation du Centaure) • α Centauri A et B forment un système binaire,*

*auquel s’ajoute la naine rouge Proxima Centauri*

*• Proxima Centauri est l’étoile la plus proche du Soleil (4,3 al) • Age = 6 milliards d’années*

***Gliese 876 ‘Gliese 876 d’ est interprétée comme une planète tellurique mais une autre hypothèse serait qu’elle soit une planète gazeuse (de type Uranus). T° (‘Gliese 876 d’) = [500-700] K.***

*• Naine rouge (15,2 al, Constellation du Verseau)*

*• Age ≈ 11 milliards d’années*

*• Masse ≈ 200 M[Jupiter] (≈ Mo / 3)*

*• Magnitude absolue = 11,8 (≈ Lo / 600)*

*• Système planétaire: Gliese 876 b (géante gazeuse; M ≈ 2 M[Jupiter] )*

*Gliese 876 c (géante gazeuse ; M ≈ 0,56 M[Jupiter] )*

*Gliese 876 d (planète tellurique géante ; M ≈ 7,5 M[Terre] )*

**c – La galaxie (Voie Lactée) et ses voisines *(250.000 al.)***

**Les galaxies, des ‘Univers-îles’ au niveau de vide avec autour des galaxies satellites…   
 La Voie Lactée construit son disque par absorption de ses galaxies satellites…**

• Galaxie spirale de 200 à 400 milliards d’étoiles

• Masse ≈ [180 à 370] x 109 Mo

• Orbite (Soleil) = 225 millions d’années

• Age ≈ 10 milliards d’années

Notre galaxie a commencé a émergé il y a 225 milliards d’années. La majorité des étoiles abritent des planètes, ce qui fait beaucoup de planète…

***Les nuages de Magellan***

• Déjà mentionnée en 964 par l’astronome perse Al-Soufi

• Distance à la Voie Lactée: ≈ 50 kpc pour LMC ; ≈ 60 kpc pour SMC  
Où kpc = kilo parsec (parralax seconde) c’est la distance à laquelle on voit une unité astronomique sous une seconde d’arc.

• Masse: M(LMC) ≈ [6 - 20] x 109 Mo ; M(SMC) ≈ 0,8 x 109 Mo

• Fortes interactions gravitationnelles avec la Voie Lactée (effet de marée) qui génèrent les courants de Magellan sur 100al

***La galaxie naine du Sagittaire***

• Découverte en 1994

• Distance à la Voie Lactée: ≈ 20 kpc

• Masse ≈ 150 x 106 Mo

• Fortes interactions gravitationnelles avec la Voie Lactée (effet de marée)

Elle est en rotation autour de la voie lactée.

***La galaxie naine du Grand Chien***

**•** Découverte en 2003

• Distance à la Voie Lactée ≈ 7,7 kpc

• Masse ≈ 500 x 106 Mo (*⇔* 1% masse ‘disque Voie Lactée’)

• Surdensité d’étoiles géantes, vue comme un anneau complexe

Contribue par « cannibalisation » aussi à la croissance de la voie lactée.

**d – L’amas local *[2-20] x 106 al***

* **[30 - 40] galaxies**
* **Plusieurs sous-groupes de galaxies et leurs satellites**
* **Galaxies spirales, elliptiques et irrégulières**

*La galaxie du Triangle (M33)  
La galaxie d’Andromède (M31) et ses satellites*

* Dans 3.07 milliards d’années, la galaxie d’Andromède et la Voie Lactée :

**• Voici une simulation de cette fusion galactique***(les positions de 20 millions de particules-tests sont calculées en utilisant un algorithme de perturbations à N-corps)* **qui se rapprochent actuellement à 115km/s, entreront en collision.**

**(les 5 étapes représentées sont séparées de ≈ 400 millions d'années)**

*Collision entre les galaxies ‘’NGC 2207 et ‘IC 2163’* *dans la constellation du Grand Chien (Image Hubble)-Collision entre les ‘galaxies des antennes’ (‘NGC 4038’ & ‘NGC 4039’) dans la constellation du Corbeau (Image Hubble).*

**e – Le superamas local *[75-100] x 106 al***

**Notre amas de galaxies est situé au sein d’un vaste essaim de milliers de galaxies: le superamas de la Vierge.**

*Modélisation 3D d’un amas*

**• Un amas de près de 200 amas.**

**• ≈ 2.500 grandes galaxies et ≈ 50.000 galaxies naines.**

**• ≈ 200 milliards de milliards d’étoiles…**

* **Le superamas local est centré sur l’amas de la Vierge:**

**- amas massif de ≈ 2.000 galaxies dont ≈ 160 de grande taille,**

**- taille comparable au groupe local (15 x 106 al) mais 50 fois plus de galaxies (dont ‘M87’: 4.000 x 109 Mo**

**f – Le cosmos (*14 x 109 al)***

**• Univers visible ≈ 10 millions de superamas.**

**• Nb. Étoiles ≈ 30 milliards de trillions (≈ 3 x 1022).**

**• Les superamas s’étendent sous forme de filaments de centaines de millions d’al., et sont séparés par des bulles de vide cosmique…**

*‘Millennium Simulation Project’ (Springel et al. 2005)*

Retracer l’évolution de la distribution de la matière dans un cube de 2,4 x 109 al. de côté, contenant plus de 109 particules, pendant ≈ 14 milliards d’années.Plus d’un mois de calcul par le supercalculateur du *‘Max Planck Institute’* de Garching en Allemagne (25.000 Go de données).

**⮞ *Et au-delà de l’Univers observable ?***

**• Certains amas de galaxies sont attirées dans une direction préférentielle *(‘dark flow’)*.**

**• Ce pourrait être un 1er indice de l’existence de zones très denses d’espace-temps au-**

**delà de l'horizon cosmique, qui marque normalement la limite de l‘Univers observable…**

**D – La place du ‘vide’ dans l’Univers**

**La densité d'énergie de l’Univers correspond à l'énergie par unité de volume en un point. L'énergie sombre est une forme d'énergie dotée d'une pression négative (elle agit comme une force gravitationnelle répulsive).**

**Matière noire** (**≈ 21 à 27%,** *Weakly Interactive Massive Particles ?*) **et énergie sombre (≈ 69 à 75 %, énergie du vide quantique ?) constituent environ 96% de la densité d’énergie de l’Univers…**

**Le reste (environ 4 % de matière ordinaire), c’est:**

**En nombre d’atomes:**

**90,76% d’hydrogène,**

**9,09% d’hélium,**

**0,15% de tout le reste…**

**En masse:**

**70% d’hydrogène,**

**28% d’hélium environ**

**2% de tout le reste…**

Mais de quoi sont donc constitués 96% de l’Univers ? Un problème invisible…

L’exploration de la nature de la matière noire et de l’énergie sombre est l’un des plus grands défis de la physique des particules et de la cosmologie d’aujourd’hui.

C’est ce défi que tentent de relever les expériences ATLAS et CMS menées au LHC du CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire).

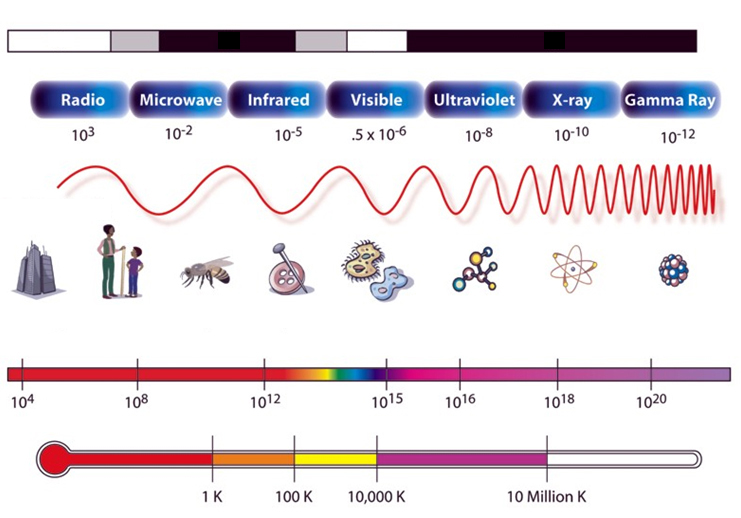
**2 – Lumière et rayonnement électromagnétique**

**A – La lumière visible et le spectre électromagnétique**

**• A travers un prisme, la lumière blanche se décompose en un spectre chromatique de 7 couleurs (λ de 400 à 700 nm).**

**• Mais ceci ne correspond qu’à une petite portion du spectre électromagnétique, en grande partie invisible…**

**• Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par leur longueur d’onde (l en nm), leur fréquence (n en Hz) et leur énergie (*E* en eV).**

****

**Grossièrement, les étoiles bleues sont plus chaudes et les étoiles rouges moins chaudes…**

*Observation du spectre électromagnétique émis par la galaxie d’Andromède dans différentes longueurs d’onde.*

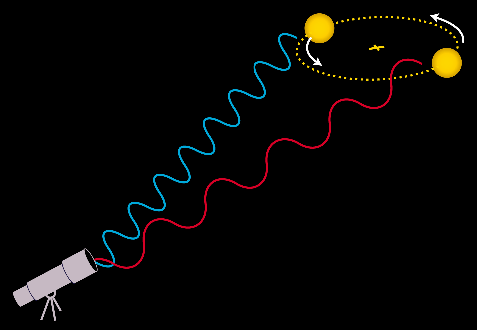
**B – Spectre atomique et composition de la matière**

**La largeur et l’intensité de ces raies d’absorption permettent de déterminer la pression, la densité et la température de l’objet observé. La source lumineuse contenant des atomes qui absorbent la lumière sur des longueurs d’ondes spécifiques, le spectre coloré est haché par des raies spectrales sombres L’étude détaillée du spectre de raies d’absorptions nous informe sur la source lumineuse (composition,…)**

**C – L’effet Doppler-Fizeau et l’expansion de l’Univers**

**Une étoile qui se dirige vers nous va présenter des longueurs d’ondes plus courtes, compressées et décalées vers le bleu *(effet blueshift)*.**

**• Une étoile qui s’éloigne montrera des longueurs d’ondes allongées et décalées vers le rouge *(effet redshift)*.**

****

**En mesurant l’effet Doppler de la lumière émise par les étoiles et les galaxies, il est possible d’en déduire dans quelle direction elles se déplacent et à quelle vitesse.**

**En 1929, après avoir étudié un grand nombre de spectres, Edwin Hubble montre que les galaxies s’éloignent de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance (loi de Hubble).**

**Les corps célestes s’éloignant les uns des autres, on peut en déduire que l’Univers est en expansion. A partir de là, on est en mesure de penser que toute la matière en expansion s’étend depuis un point unique, et que cette expansion a un commencement.**

**D – La lumière: une formidable machine à remonter le temps**

**La lumière peut-elle nous aider à remonter le temps ? Dans l'univers, les distances séparant les corps célestes sont très grandes, la lumière met donc des temps importants pour aller des uns aux autres…**

**La vitesse de la lumière étant fini, regarder loin dans l’Univers, c’est remonter le temps…**

*Ex: l’étoile la plus proche, Proxima Centauri, est située à 4,3 années lumières .Sa lumière met donc 4,3 années (4 ans, 3 mois, 18 jours) à nous parvenir. Si elle s’éteignait aujourd’hui, nous ne le saurions que dans plus de 4 ans…*

**Quand nous observons au télescope des étoiles situées à 10.000 années-lumière, nous les voyons telles qu'elles étaient il y a 10.000 ans…**

*Ex:* La galaxie d’Andromède est située à 2 millions d’al. Sa lumière met donc2 millions d’années à nous parvenir.

**II – Une petite histoire de la matière**

**1 – « Aux origines, avant que rien n’existe, … »**

Ce cours de Sciences de la Terre et de l’Univers a pour but de présenter objectivement les théories scientifiques actuelles, de l’origine de l’Univers à l’apparition de la Vie et de l’Homme.

Mais *Science & Foi* ne s’excluent pas nécessairement, et *‘l’origine des origines’* est une question personnelle dont la réponse appartient à chacun…

*Science & Foi* ne s’excluent pas nécessairement car elles n’expérimentent pas le même questionnement:

• La *Science* cherche à comprendre et à décrire le *Comment…*

• La *Foi* n’explique pas le *Comment* mais expérimente le sens du *Pourquoi*…

**2 – Le ‘Big Bang’, des origines de l’Univers à la Vie…**

***La théorie du ‘big bang’ contre celle de l’état stationnaire…***

Le terme de ‘big bang’ est utilisé pour la première fois de manière péjorative par le physicien anglais Fred Hoyle lors d’un programme radio sur la BBC:*’ Nature of thinks’*, dont le texte fut publié en 1950.Hoyle défendait un autre modèle cosmologique abandonné depuis: la théorie de l’état stationnaire…

Illustration (bas): Fred Hoyle enseignant sur les étoiles à l’université de Rice en 1975 *(© Clemson University & Donald D. Clayton)*.

**Attention, contrairement à une idée souvent véhiculée, l’expansion de l’Univers ne résulte pas d’une explosion initiale, qui aurait projeté la matière vers l’extérieur. C’est l’espace lui-même qui est en expansion, le ‘big bang’ n’étant que le point de départ de cette expansion.**

**1: Big bang (t = 10-43 s ; T = 1032 K)**

**2 & 3: fluctuations quantiques & inflation (à t = 10-35 s, V(univers) x 2100)**

**• Unification des forces fondamentales… (t = 10-33 s)**

**• Apparition des particules les plus élémentaires (quarks, leptons, puis neutrons, protons, …)**

**• Nucléosynthèse primordiale (t = 3 minutes)**

**Trois processus expliquent la synthèse des éléments chimiques: la nucléosynthèse primordiale, la nucléosynthèse stellaire et la spallation nucléaire. Isotopes: même nb. de protons mais nb. variable de neutrons. N° atomique (Z = nb. de protons) et Nb. de masse (A = nb. protons + nb. neutrons).**

**Les éléments chimiques les plus légers et leurs isotopes sont formés, dans des proportions particulières La nucléosynthèse primordiale**

* **H hydrogène + isotopes (~3/4)**
* **He hélium + isotopes (~ 1/4)**
* **Li lithium + isotope (traces)**

**- Be béryllium (traces)**

***Les ‘piliers de la création’* *vus par Hubble dans lanébuleuse de l’aigle, son tconstitués d’hydrogène et de poussières…***

**- Recombinaison : les électrons s’associent aux 1ers neutrons et protons (aux 1ers noyaux) pour former les 1ers atomes.**

**- Après le CMB vient l’âge sombre pendant lequel il n’y a rien de visible dans l’univers.**

**L’expansion produit un décalage spectrale du rayonnement vers le rouge et même l’infrarouge : plus rien n’est visible, jusqu’à la naissance des 1ères étoiles (après 100 millions d’années) dans les 1ères galaxies. Ces étoiles vont ioniser les gaz de l’univers et l’allumer dans le domaine visible…**

**4: Fin de la recombinaison (= association des électrons aux 1ers noyaux)**

**Les premiers atomes étant formés, ils émettent des photons…**

**t = 389.000 ans -> Fond diffus cosmologique (CMB).**

• En 1964, les radio-astronomes Penzias et Wilson travaillent sur une antenne de télécommunication pour ‘Bell Telephone’. Fortuitement, ils captent un bruit de fond extraterrestre de toutes les directions, faible mais constant, à une T° de 2,7 K (micro-ondes radio). Ils pensent que ce bruit est dû aux fientes de pigeons et font nettoyer l’antenne, le bruit persiste…

• Sans le savoir, ils avaient découvert le *‘fond diffus cosmologique’* ou *‘Cosmic Microwave Background’*, prédit par la théorie du big bang, ce qui leur vaudra de recevoir le Prix Nobel de physique en 1978. Ce *‘ rayonnement fossile’* est un reliquat de la chaleur générée lors du big bang, maintenant refroidie à 2,73 K.

En 1992, le satellite COBE mesure les radiations de fond, il détecte la présence d’infimes variations de T° et dresse une carte des anisotropies.

• T = 2,725 K +/- ~ 30 µK.

• Ces fluctuations révèlent les hétérogénéités de la densité de l’univers, qui ont mené à la formation de ses grandes structures (par instabilité gravitationnelle).

Depuis WMAP, il y a eu PLANCK, dont les 1ers résultats ont été divulgués en janvier 2011… En 2003, le satellite WMAP améliore encore la précision de la mesure du rayonnement cosmologique (micro-ondes).

Cette image représente la densité de l’univers, à l’âge de 389.000 ans.

Il est possible d’analyser ces infimes fluctuations de la T° en fréquences et de les traduire en son (onde de pression).

**Le 1er cri de l’Univers: une ouverture en 3 mouvements… (un cri perçant descendant, un hurlement profond et un sifflement grandissant, qui engendre au final la première génération d'étoiles).**

***• Le premier cri de l’univers, une ouverture en 3 mouvements…***

**1. un cri perçant descendant**

**2. un hurlement profond**

**3. un sifflement grandissant**

**A - Spectre de son brut:**

- Amplitude: 110 dB

- Fréquence: 50 octaves sous ‘La 440’ (Hz)

- Timbre: présence d’harmoniques

**B - Son nettoyé (distorsions)**

**C - Reconstitution du spectre sonore:**

- 1 million d’années compressées sur 10 secondes

- Fréquence remontée de 50 octaves

- Son joué à volume constant

**5: premières étoiles**

**6: formations de galaxies, planètes, etc.**

**7: accélération de l’expansion de l’univers**

**8: apparition de la Vie il y a 3.8 milliards d’années (sur Terre)**

**L’Univers est constitué de rayonnement et de matière…**

**3 – Les premiers pas des galaxies**

**Sous l’effet des 4 forces fondamentales qui régissent l’univers, les produits du big bang vont s’organiser en des structures toujours plus complexes, à partir des hétérogénéités de densité. Ainsi, quelques centaines de millions d’années seulement après le big bang se forment les toutes premières galaxies.**

La séquence de Hubble (1936) est une classification morphologique des galaxies les plus ‘classiques’. *La galaxie géante ‘ESO 325-G004’, située dans l’amas ‘Abell S0740’, est une galaxie elliptique (Image Hubble).* *La galaxie ‘NGC 5866’, située dans la constellation du Dragon, est une galaxie lenticulaire (Image Hubble).*  La galaxie ‘M101’, située dans la constellation de la Grande Ourse, est une galaxie spirale normale (Image Hubble). La galaxie ‘NGC 7742’, située dans la constellation de Pégase est une galaxie spirale normale (Image Hubble). *La galaxie du sombrero (‘M104’) est une galaxie spirale normale bien connue de la constellation de la Vierge (Image Hubble).*  *La galaxie ‘NGC 1300’, située dans la constellation de* *l’Éridan, est une galaxie spirale barrée (Image Hubble).* *La galaxie ‘NGC 1569’, située dans la constellation de la* *Girafe, est une galaxie naine irrégulière (Image Hubble).*

**4 – Naissance, vie et mort des étoiles**

***Évolution d’une étoile de masse comparable à notre soleil.***

**A – Qu’est ce qu’une étoile ?**

**Par exemple, notre soleil, c’est:**

* ***1.392.000 km de diamètre,***
* ***presque 2 x 1030 kg,***
* ***plus de 98% de H et He,***
* ***15 millions de degrés au cœur***
* ***près de 6.000* °*C en surface***
* ***une magnitude absolue de 4,83***

**Pour faire simple, une étoile est une énorme boule de gaz très chaude qui émet sa propre lumière… Une étoile, c’est aussi le résultat d’un équilibre entre les forces de gravitation,** **- la pression de radiation- la pression cinétique Une étoile tire son énergie de réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son cœur, l’hydrogène en hélium.**

**- Pression cinétique d’un gaz parfait: P = 2/3 (Energie interne / Volume).**

**B – Naissance et nucléosynthèse**

**Les étoiles naissent au sein d’immenses nuages de gaz et de poussières nommés nébuleuses. A causes d’instabilités gravitationnelles, le nuage se contracte, se condense et se met à tourner sur lui-même. A partir d’une certaine masse critique de gaz (> 0,7 Mo), un effondrement gravitationnel se produit et la température augmente tellement que des réactions nucléaires de fusion s’amorcent: une étoile est née…**

*La nébuleuse Gabriela Mistral (‘NGC 3324’), située dans la constellation de la Carène est une pouponnière d’étoiles (Image Hubble).La nébuleuse géante ‘NGC 3603’,située dans la constellation de la Carène , et ses myriades de jeunes étoiles. (Image Hubble). La nébuleuse de la Rosette (‘NGC 2244’), située dans la* *constellation de la Licorne, et ses étoiles (Image Spitzer).*

**Une étoile tire son énergie de réactions de fusion nucléaire qui transforment, en son cœur, l’hydrogène en hélium. Elle brille tant que sa réserve d’hydrogène n’est pas épuisée…**

**La chaîne proton-proton a une cinétique lente**

**C – Classification des étoiles**

**La température est dans le spectre…**Le diagramme de Hertzprung-Russell (1910)

**D – Des destins variés…**

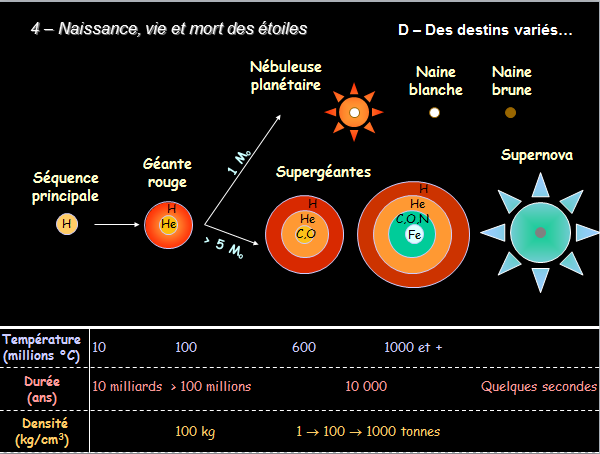
**Il restera un milliard d'années dans ce stade de géante rouge, puis deviendra rapidement une nébuleuse planétaire, dont il ne restera ensuite qu’une naine blanche…**

**La masse des étoiles conditionne leur destin…**

***Masse + importante P & T + élevées Fusion + rapide Vie + courte***

***Masse + faible P & T – élevées Fusion + lente, Vie + longue***

***Ce genre d’étoile meurt quand la naine blanche s’éteint progressivement et devient un cadavre invisible d’étoile (naine brune)…***

******

|  |  |
| --- | --- |
| ***Température***  ***(en million de degrés)*** | ***10 600 1000 et+*** |
| ***Durée (ans)*** | ***10 milliards à 100 millions 10000 quelques***  ***secondes*** |
| ***Densité***  ***(kg/cm3)*** | ***100kg 1 → 100 → 1000 tonnes*** |

***Une supernova peut devenir soit une étoile a neutrons soit un trou noir.***

***Étoile à neutrons :***

* ***≈ 1,4 Mo,***
* ***≈ 10 km de diamètre,***
* ***densité très élevée (109 tonnes / cm3),***
* ***composée essentiellement de neutrons,***
* ***champ magnétique très intense,***
* ***vitesse de rotation très élevée (millisecondes),***
* ***isolée ou binaire, pouvant être un pulsar ou non***

***Trou noir :***

* ***champ gravitationnel démesurément intense,***
* ***matière et rayonnement en sont prisonniers, non observable mais détecté indirectement***

***La vie d’une grosse étoile (15 Mo)- Ce genre d’étoile meurt en supernova et enrichit le gaz interstellaire en éléments lourds.***

**5 – Planètes en construction**

**• Naissance de notre système solaire.**

**Un nuage de gaz et de poussières interstellaires se met à graviter sous l’effet d’une onde de choc provenant probablement de l’explosion d’une étoile massive voisine.**

***La vitesse de rotation du nuage (nébuleuse protosolaire) augmente au furet à mesure de sa contraction en un disque. Au centre, la matière devient plus dense et plus chaude puis un embryon d’étoile s’allume (protosoleil).***

***Le réacteur nucléaire solaire est en route. Les poussières du nuage vont alors progressivement s‘agglutiner en planétésimaux.***

***Par collisions successives, ceux-ci vont s’accrêtés pour former des embryons de planètes (protoplanètes).***

***Près du soleil, l’accrétion des corps les plus denses forme les planètes rocheuses internes. Plus loin, les éléments plus légers forment les planètes gazeuses externes.***

***Le système solaire est maintenant formé, les collisions (bombardement météoritique) seront de plus en plus rares, mais de plus en plus spectaculaires…***

*Assemblée générale de l’Union Astronomique Internationale le 24 Août 2006 à Prague.*

***3 types d’objets gravitent autour du soleil dans notre système solaire:***

***- Les planètes (****Planets****) et leurs satellites,***

***- Les planètes naines (****Dwarf Planets****),***

***- Les petits corps du système solaire*** *(Small Solar System Bodies****).***

***III – Notre ‘nouveau’ système solaire***

***1 – Introduction***

***Le système solaire, du Soleil à la ceinture de Kuiper…→ 30 - 50 UA.***

***Le système solaire, de la ceinture de Kuiper au nuage de Oort…→ 10.000 - 100.000 UA.***

***2 – Le Soleil***

*Diamètre moyen: 1.392.000 km*

*Période de rotation: [ 25-35 ] jours terrestres*

*Masse: 2 x 1030 kg ↔ 330.000 MT → 99,8% de la masse du système solaire*

*Volume: 1.304.000 VT Densité moyenne: 1,4*

*Gravité (surface): 28 Composition: H (71%), He (27%), autres (2%)*

*T° (noyau): 15.500.000 °C T° (surface): 5.500 °C*

***• Quelle structure ?***

***1 - Noyau (centrale de production d’énergie, où H → He par fusion nucléaire)***

***2 - Zone radiative (le flux de radiations produit dans le noyau y véhicule l’énergie vers l’extérieur)***

***3 - Zone de convection (transfert convectif de l’énergie vers la surface)***

***4 – Photosphère (enveloppe visible du Soleil, avec tâches solaires et granulations)***

***D’un point de vue magnétique, le Soleil est très actif:***

***- éruptions solaires (magnétiques)***

***- protubérances (expulsion de nuages de gaz ionisé)***

***- boucles coronales (jets de plasma suivant le champ magnétique***

***Heureusement, la Terre possède un bouclier efficace: son champ magnétique (magnétosphère), qui dévie les particules chargées en provenance du Soleil.***  ***Certaines particules chargées du vent solaire pénètrent malgré tout la haute atmosphère (ionosphère) au niveau des pôles, ce qui se manifeste par des aurores polaires (boréales ou australes).***

***3 – Les planètes***

*Depuis le 24-08-2006, le ‘nouveau’ système solaire comporte 8 planètes.*

***Selon la définition de l’UAI (2006), une planète est un corps céleste qui:***

***- est en orbite autour du Soleil,***

***- possède une masse suffisante pour que la gravité l’emporte sur les forces***

***de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique***

***(sous une forme presque sphérique),***

***- a éliminé tout corps susceptible de se déplacer sur une orbite proche.***

**A – Mercure**

*Masse: 3,30 x 1023 kg Diamètre: 4.880 km*

*Distance moyenne au Soleil: 0,39 UA Période de révolution: 88 jours terrestres*

*Période de rotation: 59 jours terrestres T° (surface): de –180 à 430°C*

*Gravité à la surface: 0,38 Nombre de satellites: 0*

**B – Venus**

*Masse: 4,9 x 1024 kg Diamètre: 12.104 km*

*Distance moyenne au Soleil: 0,72 UA Période de révolution: 224,7 jours terrestres*

*Période de rotation: 243 jours terrestres T° (surface): 480°C (assez constant)*

*Gravité à la surface: 0,38 Nombre de satellites: 0*

**C – Terre**

*Masse: 5,9 x 1024 kg Diamètre: 12.756 km*

*Distance moyenne au Soleil: 1 UA Période de révolution: 365 jours*

*Période de rotation: 1 jours T° (surface): de –89 à 58°C (15°C en moyenne)*

*Gravité à la surface: 1 Nombre de satellites: 1 (Lune)*

***D – Mars***

*Masse: 5,9 x 1024 kg Diamètre: 12.756 km*

*Distance moyenne au Soleil: 1 UA Période de révolution: 365 jours*

*Période de rotation: 1 jours T° (surface): de –89 à 58°C (15°C en moyenne)*

*Gravité à la surface: 1 Nombre de satellites: 1 (Lune)*

**E – Jupiter**

*Masse: 1,9 x 1027 kg Diamètre: 143.000 km*

*Distance moyenne au Soleil: 5,2 UA Période de révolution: 11 ans 320 jours terrestres*

*Période de rotation: 9 heures 56 minutes T°: de –145°C (surface) à 24.000°C (centre)*

*Gravité à la surface (nuages): 2,64 Nombre de satellites: 63 (au moins)*

***Ses principaux satellites présentent des surfaces variées…Io, Europa, Callisto, Ganymède***

**F – Saturne**

*Masse: 5,7 x 1026 kg Diamètre: 120.000 km*

*Distance moyenne au Soleil: 9,6 UA Période de révolution: 29 ans 165 jours terrestres*

*Période de rotation: 10 heures 47 minutes T°: de –110°C (surface) à 12.000°C (centre)*

*Gravité à la surface (nuages): 0,92 Nombre de satellites: 60 (au moins)*

**G – Uranus**

*Masse: 8,7 x 1025 kg Diamètre: 51.000 km*

*Distance moyenne au Soleil: 19,2 UA Période de révolution: 84 ans 27 jours terrestres*

*Période de rotation: 17 heures 14 minutes T°: de –210°C (surface) à 3.000°C (centre)*

*Gravité à la surface (nuages): 0,86 Nombre de satellites: 29 (au moins)*

**H – Neptune**

*Masse: 1,02 x 1026 kg Diamètre: 48.600 km*

*Distance moyenne au Soleil: 30 UA Période de révolution: 165 années terrestres*

*Période de rotation: 16 heures 6 minutes T°: de –210°C (surface) à 3.000°C (centre)*

*Gravité à la surface (nuages): 1,2 Nombre de satellites: 13 (au moins)*

**4 – Les planètes naines**

***Selon la définition de l’UAI (2006), une planète naine est un corps céleste qui:***

***- est en orbite autour du Soleil,***

***- possède une masse suffisante pour que la gravité l’emporte sur les forces***

***de cohésion du corps solide et le maintienne en équilibre hydrostatique( sous une forme presque sphérique),***

***- n’a pas éliminé les corps susceptibles de se déplacer sur une orbite proche,***

***- n’est pas un satellite.***

***A – Cérès***

***Masse: 9,5 x 1020 kg → 1/3 de la masse de la ceinture d’astéroïdes***

***Diamètre: 950 km→ l’objet le plus gros de la ceinture d’astéroïdes***

***Distance moyenne au Soleil: 2,77 UA***

***Période de révolution: 4,6 années terrestres***

***Composition: 75% de roches recouvertes par 25% de glace d’H2O Peut-être un océan d’eau liquide et une atmosphère (?)***

*Définition: 24-08-2006 (assemblée générale UAI à Prague)*

***- Parmi les roches présente sur Cérès : des carbonates (dolomite, sidérite) et des argiles (riches en fer).***

***- Cérès pourrait héberger un océan d'eau liquide et une atmosphère, ce qui en fait une piste d’exploration pour la recherche de vie dans le système solaire.***

*- La sonde d’exploration ‘Dawn’, partie de Terre en 2007 à destination de l’astéroïde Vesta et de la planète naine Cérès y arrivera en 2015.*

***B – Les plutoïdes***

***a – Les plutinos: Pluton***

***• Les plutinos sont des objets de la ceinture de Kuiper dont l’orbite est calée (en résonance) avec celle de Neptune. Ils effectuent deux tours du Soleil quand Neptune en fait trois.***

*Masse: 1,27 x 1022 kg Diamètre: 2.306 km*

*Distance moyenne au Soleil: 40 UA Période de révolution: 248 années terrestres*

*Composition: 70% de roche et 30% de glace d’H2O Satellites: 3 (Charon, Nix, Hydra)*

*Définition: 24-08-2006 (assemblée générale UAI à Prague)*

***b – Les cubewanos: Makemake & Haumea***

***• Les cubewanos sont des corps plus classiques de la ceinture de Kuiper, à l’orbite relativement circulaire.***

*Masse: 4,2 x 1021 kg Hauméa*

*Diamètre: entre 1.960 et 2.500 km*

*Distance moyenne au Soleil: 43 UA Période de révolution: 285 années terrestres*

*Période de rotation: < 4 heures, d’où une forme ovale…*

*Composition: roche recouverte de glace Satellites: 2*

*Définition: 11-06-2008 (réunion comité exécutif UAI à Oslo)*

*Masse: 4 x 1021 kg (estimation) Makemake*

*Diamètre: 1.200 à 1.900 km Distance moyenne au Soleil: 45 UA Période de révolution: 308 années terrestres*

*Composition: roche et glace*

***→ Posséderait une*** *atmosphère (CH4)*

*Définition: 11-06-2008 (réunion comité exécutif UAI à Oslo)*

***c – Les objets épars: Éris***

***Les objets épars sont des corps plus éloignés que les cubewanos dans la ceinture de Kuiper, possédant des orbites plus elliptiques.***

*Masse: 1,67 x 1022 kg Diamètre: 2.400 km*

*Distance moyenne au Soleil: 67 UA Période de révolution: 557 années terrestres*

*Composition: roche et glace Satellite: 1 (Dysnomia)*

*Définition: 24-08-2006 (assemblée générale UAI à Prague)*

***d – Les objets détachés: bientôt Sedna ?***

***Les objets détachés sont des corps encore plus éloignés, dont l’orbite est située en-dehors de la zone d’influence de Neptune.***

*Masse: 1,6 x 1021 kg Diamètre: 1.200 à 1.700 km*

*Distance moyenne au Soleil: 505 UA Période de révolution: 11.374 années terrestr Composition: roche et glace* (?*)*

***Candidate pour obtenir le statut de planète naine (affaire à suivre…)***

***5 – Les petits corps du système solaire***

***Selon la définition de l’UAI (2006), un petit corps du système solaire:***

***- est en orbite autour du Soleil,***

***- n’est ni une planète, ni une planète naine, ni un satellite.***

***Ce sont par exemple:***

***- des objets trans-neptuniens de la ceinture de Kuiper et du nuage de Oort***

***- les comètes***

***- les astéroïdes et météoroïdes***

***A – Les objets trans-neptuniens***

***Ce sont en grande partie des objets appartenant à la ceinture de Kuiper. Certains comme Sedna sont candidats pour devenir des planètes naines***

***B – Les comètes***

***Les comètes sont des petits corps glacés de quelques kms, en provenance des confins du système solaire (nuage de Oort) et qui orbitent autour du Soleil de manière très elliptique.***

***• Plus de 2.000 comètes ont été répertoriées à ce jour.***

***En se rapprochant du Soleil (< 500 millions de km), la glace est sublimée en gaz, et les poussières sont dispersées par les vents solaires dans la direction opposées, ce qui dessine une chevelure lumineuse (< 100 millions de km) dans le sillage de la comète.***

***C – Les astéroïdes***

***430.000 répertoriés 15.000 nommés***

***• Un astéroïde est un objet céleste:***

***- qui possède une orbite faiblement elliptique autour du Soleil,***

***- dont les dimensions varient de 50 mètres à plusieurs kilomètres***

***• Ils sont regroupés en plusieurs familles:***

***- Ceinture principale (entre Mars et Jupiter)***

***- Ceinture de Kuiper (au-delà de Neptune)***

***- Troyens (orbite de Jupiter)***

***- Centaures (entre Jupiter et Neptune)***

***- Géocroiseurs (croisent l’orbite de la Terre)***

***Vestiges de la formation du système solaire, ce sont les résidus de ‘planétoïdes avorté’ lors de l’accrétion du disque proto-planétaire.***

***D – Les objets géocroiseurs***

***• Ce sont tous les objets dont la trajectoire est susceptible de croiser l’orbite terrestre:***

***→ Comètes,***

***→ Astéroïdes (> 50 m),***

***→ météoroïdes (< 50 m).***

*On les désigne également ‘NEO’ (Near Earth Objects)*

***• La Terre est bombardée de matière cosmique:***

***→ > 100 tonnes / jour,***

***→ ≈ 300.000 météorites / an.***

*Illustration: Carte des structures d’impact confirmées à la surface de la Terre et sur les fonds océaniques en 2006 (> 200).*

***La taille des cercles est fonction du diamètre des cratères et la couleur dépend de l’âge.***

*Les étoiles blanches correspondent à des explosions aériennes de bolides au XXième siècle (Tunguska en 1908 et Brésil en 1930).*

***LA METEORITE:***

*- diamètre: 45 m - poids: 300.000 tonnes*

*- composition: fer + nickel - vitesse: 43.000 km/h*

*(Melosh & Collins, 2005) - nom: ‘Canyon Diablo*

***LE CRATERE:***

*- âge: 50.000 ans - diamètre: 1,2 km*

*- profondeur: 180 m - énergie: 150 x Hiroshima*

*Le 30 Juin 1908, l’astéroïde géocroiseur ‘Ogdy’ explose au-dessus de la Sibérie, dans la région de la rivière Toungouska. Les dégâts sont considérables:*

*- forêt détruite dans un rayon > 20 km*

*- 80 millions d'arbres abattus*

*- des incendies pendant des semaines*

*- onde de choc sur plus de 100 km*

*- déflagration audible jusqu’à 1500 km.*

*Il y a 160 millions d’années, une collision entre deux astéroïdes crée la famille d’astéroïdes Baptistina. 52 et 95 millions d’années plus tard, deux d’entre eux percutent la lune (cratère Tycho) et la Terre (Chicxulub, Golfe du Mexique).*  *Il en résulte un cratère de diamètre > 200 km dans la péninsule du Yucatán (Chicxulub)…*  *Cet événement est associé à une période de crise majeure de la biosphère, et au dépôt mondial d’une couche enrichie en iridium…*

**Fe**

**Ni**

***Corps indifférencié corps différencié***

***• Météorite mixte***

***• Météorite ferreuse***

***Jupiter joue le rôle d’un aimant à astéroïdes et à comètes, ce qui réduit considérablement le risque d’impact sur Terre. La Terre n’est pas la seule être bombardée… les sattelites aussi le sont.***

***6 – Les planètes extrasolaires (exoplanètes)***

***Selon la définition provisoire proposée par l’UAI (UAI, 2003), une exoplanète est:***

***- un objet ayant une masse en-dessous de la limite de fusion du deutérium***

***(13 MJupiter pour des objets ayant la métallicité du Soleil),***

***- qui orbite une étoile ou les restes d'une étoile (autre que le Soleil),***

***- dont la masse et/ou la taille est supérieure à celle considérée comme limite pour une planète du système solaire.***

***On en découvre environ deux par semaine: → le 31-01-2011, on en dénombrait 519***

*Les observations directes sont très difficiles (objets lointains et forte luminosité relative des étoiles-hôtes).* *On les détecte le plus souvent par des méthodes indirectes :*

*Méthode des vitesses radiales (spectrographie)ou encore Méthode des transits planétaires*

***• Quelles différences avec notre système solaire ?***

***Certaines gravitent autour d’étoiles mortes ou en fin de vie (naines blanches & pulsars).***

***Beaucoup sont des planètes de gaz très massives et très proches de leur étoile (‘Jupiters chauds’).***

***La plupart ont des orbites très allongées (elles sont quasi circulaires autour du Soleil).***

***Notre système solaire ressemble plus à une exception qu’à la règle générale…***

***Pourrait-on y vivre ? La ‘zone habitable’ est définie par une T° compatible avec la présence d’eau liquide (de 0 à 100 °C, avec un optimum à 300 K), et dépend de la masse de l’étoile***

***7 – La vie dans le système solaire***

***LES INGREDIENTS***

***- des éléments chimiques comme C,H,O,N (on trouve des molécules organiques, plus ou moins complexes dans certaines météorites)***

***- du phosphore (architecture et carburant du vivant)***

***- de l’eau liquide (zone d’habitabilité)***

***- la présence d’une magnétosphère (bouclier magnétique)***

***- un système solaire stabilisé (orbites stables, pas trop de collisions)***

***- du temps (si on ramène les 13,7 milliards d’années d’évolution de l’Univers à une année, le système solaire apparaît fin août, et la Vie en septembre)***

***La Vie est caractérisée par l’ARN, l’ADN et les acides aminés (protéines).***

***Certaines chondrites carbonées, considérées comme les plus âgées des météorites (≈ 4,6 x 109 années), ont livré des formes complexes de molécules organiques pré-biotiques:***

***- acides aminés,***

***- hydrocarbures aliphatiques,***

***- hydrocarbures aromatiques,***

***- fullerènes.***

*La météorite martienne ‘ALH 84001’ contient des indices de vie, notamment des structures de type bactérien.*

***La Vie est peut-être universelle à l’échelle de l’Univers.*** ***Elle pourrait même avoir été ensemencée sur la Terre par des géocroiseurs (panspermie).***

***• Où la rechercher ?*** *→ Sur Mars ?*

* *structures de type bactérien dans une météorite martienne de 3,7 x 109 ans (‘ALH 84001’)*
* *mêmes structures dans deux autres météorites SNC (de 720 et 150 x 106 ans)*
* *découvertes récentes d’H2O et de CH4*
* *hématite grise = signature d’H20 liquide ayant perduré longtemps → océan ancien ?*
* *T° plus élevées dans le passé et présence d’une atmosphère aujourd’hui presque disparue*
* *activité volcanique (presque éteinte maintenant)*
* *écoulements de liquides en surface (observés actuellement)*

*→ La vie a pu exister dans le passé, avant la perte de son atmosphère et de son hydrosphère.*

* *sur Titan ? (satellite de Saturne)*

*Atmosphère d’azote*

*Vents violents et saisons*

*Croûte peu épaisse de glace d’H2O + NH3*

*T° (max.): - 180 °C en surface*

*Écoulements de liquides organiques (CH4, C2H6)*

*Activité cryo-volcanique*

*Matière organique prébiotique complexe (acides aminés ?)*

* *Un bon laboratoire prébiotique mais certainement pas de vie.*
* *sur Europe ? (satellite de Jupiter)*

*Carapace épaisse de glace d’H20 (des kms)*

*Surface jeune et renouvelée (tectonique)*

*Échauffement par de forts effets de marée*

*Cœur de roche et activité volcanique*

*Fusion partielle de glace → océan H20 liquide sous la glace ?*

*Émanations d’oxygène*

* *→ Peut-être une vie microbienne ?*
* *sur Encelade ? (satellite de Saturne)*

*T° plus élevée au pôle sud*

*Atmosphère de vapeur d’H2O (pôle sud)*

*Activité cryo-volcanique suspectée*

*Eau liquide sous la surface ?*

*Molécules organiques simples*

→ *Peut-être de la vie au pôle sud ?*

⇒ *La Vie existe peut-être dans le système solaire ailleurs que sur la Terre, et si çà n’est pas le cas, elle pourrait malgré tout être retrouvée à l’état fossile, encore faut-il chercher au bon endroit…*