LA PLUS GRANDE HISTOIRE JAMAIS CONTÉE

DES ORIGINES DE L'UNIVERS A LA VIE SUR TERRE

Belin

TABLE DES MATIÈRES

APRÈS LE TEMPS DE PLANCK…

10^{-43} seconde	Il y a 13,8 milliards d'années…	10|11
10^{-35} seconde	Juste après l'ère de Planck	12|13
1 microseconde	La transition quarks-hadrons	14|15
~3 minutes	La nucléosynthèse primordiale	16|17
380 000 ans	Et la lumière fut !	18|18
380 000 ans	L'émission du fond diffus cosmologique	20|21
Entre 380 000 ans et 150 millions d'années	Les âges sombres	22|23
Entre 100 et 200 millions d'années	Les feux d'artifice des premières étoiles	24|25
Entre 100 et 200 millions d'années	Des étoiles et des galaxies	26|27
200 millions d'années	À l'origine des premiers soleils	28|29
200 millions d'années	Sites de rencontre pour molécules	30|31
~300 millions d'années	La Voie lactée	32|33
2 milliards d'années	Galaxies cannibales	34|35

IL Y A…

4,61 milliards d'années	Un nuage dans la Voie lactée	36|37
4,60 milliards d'années	Les premiers alcools	38|39
4,60 milliards d'années	La formation du Soleil	40|41
4,60 milliards d'années	Première complexification moléculaire	42|43
4,57 milliards d'années	Paf la supernova !	44|45
4,5682 milliards d'années	La naissance du Système solaire	46|47
~4,568 milliards d'années	Poussières et moutons	48|49
4,567 milliards d'années	Planétésimaux, embryons et coeurs	50|51
4,566 milliards d'années	Planètes géantes	52|53
4,565 milliards d'années	Migration planétaire	54|55
4,565 milliards d'années	Grand Tack	56|57
4,564 milliards d'années	Disparition du disque de gaz	58|59
~4,5 milliards d'années	La Terre et les autres planètes telluriques	60|61
Entre 4,56 et 4,4 milliards d'années	Un océan de magma	62|63
~4,54 milliards d'années	Fer et silicates divorcent	64|65
Entre ~4,54 et 4,2 milliards d'années	Un bouclier magnétique invisible	66|67
~4,48 milliards d'années	Et la Lune fut	68|69
4,45 milliards d'années	Atmosphère ! Atmosphère !	70|71
Entre ~4,5 et 4,2 milliards d'années	Un coup de vernis	72|73
Entre 4,4 et 4,35 milliards d'années	Continents en vue	74|75
Entre 4,4 et 4,35 milliards d'années	Que d'eau ! Que d'eau !	76|77
Entre 4,4 et 3,865 milliards d'années	La formation de la matière organique	78|79
Entre 4 et 3,5 milliards d'années	Vers le vivant	80|81
~4,4 milliards d'années	L'asymétrie du vivant	82|83
~4,4 milliards d'années	Un monde ARN ?	84|85
Entre ~4,4 et 3,5 milliards d'années	Un ancêtre commun universel	86|87
Entre ~4,4 et 3,5 milliards d'années	Premières diversifications du vivant	88|89
Entre 4,1 et 3,9 milliards d'années	Grand Bombardement Tardif !	90|91
Entre ~4,1 et 3,5 milliards d'années	Le carbone au coeur de la vie microbienne	92|93
4,03 milliards d'années	Des reliques d'âge canonique	94|95
Entre 4 et 2,5 milliards d'années	Une Terre jeune et chaude	96|97
Entre 4 et 2,5 milliards d'années	Les jeunes continents	98|99
Depuis ~4 milliards d'années	C'est viral !	100|101
3,87 milliards d'années	Profondeurs abyssales archéennes	102|103
Entre 3,8 et 1,8 milliards d'années	Rubans rouges	104|105
Entre 3,8 et 2,2 milliards d'années	Hydrothermalisme intense	106|107
Entre 3,8 et 2,5 milliards d'années	Des océans chauds et salés	108|109
3,45 milliards d'années	Les plus anciens macrofossiles : les stromatolites	110|111

Entre 3,45 et 3,2 milliards d'années	LES PLUS ANCIENS MICROFOSSILES	112|113
Entre ~3,4 et 2,7 milliards d'années	ÇA SENT LE SOUFRE !	114|115
Entre ~3,4 et 2,7 milliards d'années	DES ÉCOSYSTÈMES DIVERSIFIÉS	116|117
3,2 milliards d'années	LUNE ET GRANDES MARÉES	118|119
Entre ~3 et 2,5 milliards d'années	LES CYANOBACTÉRIES ET LA PHOTOSYNTHÈSE OXYGÉNIQUE	120|121
2,8 milliards d'années	L'ÂGE D'OR DU MÉTHANE	122|123
~2,7 milliards d'années	LES TRACES D'UNE DIVERSITÉ MICROBIENNE	124|125
Entre 2,5 et 2,3 milliards d'années	ENFIN UNE TERRE MODERNE !	126|127
Entre 2,4 et 2,2 milliards d'années	UNE BOUFFÉE D'OXYGÈNE	128|129
2,3 milliards d'années	LA TERRE BOULE DE NEIGE	130|131
2 milliards d'années	L'ORIGINE DES EUCARYOTES	132|133
Entre ~2 et 1,5 milliard d'années	ON RESPIRE DE L'OXYGÈNE !	134|135
Depuis ~2 milliards d'années	LA DIVERSIFICATION DES EUCARYOTES	136|137
1,88 milliard d'années	DES MICROFOSSILES RICHES EN FER	138|139
~1,8 milliard d'années	IMPACTS	140|141
Entre 1,7 et 1,5 milliard d'années	PREMIERS FOSSILES EUCARYOTES	142|143
Entre ~1,6 et 1,2 milliard d'années	MISE AU VERT	144|145
Depuis ~1,5 milliard d'années	DES ALGUES DE TOUTES LES COULEURS	146|147
Depuis ~700 millions d'années	LE DÉVELOPPEMENT DES MICROBIOMES	148|149
~700 millions d'années	CELLULES, TISSUS, ORGANES…	150|151
Entre 635 et 541 millions d'années	LA FAUNE D'EDIACARA	152|153
Entre 540 et 500 millions d'années	L'EXPLOSION CAMBRIENNE	154|155
Entre 470 et 460 millions d'années	PREMIÈRE SORTIE DES EAUX	156|157
Entre 440 et 400 millions d'années	PREMIERS CERVEAUX	158|159
440 millions d'années	MÂCHOIRES	160|161
397 millions d'années	ON A MARCHÉ SUR LA TERRE	162|163
Entre 360 et 300 millions d'années	FORÊTS HOUILLÈRES ET PLANTES À GRAINE	164|165
300 millions d'années	PREMIERS AMNIOTES	166|167
200 millions d'années	PREMIERS MAMMIFÈRES	168|169
150 millions d'années	DINOSAURES À PLUMES	170|171
97 millions d'années	LA MER DE LA CRAIE	172|173
66 millions d'années	C'EST LA CRISE !	174|175
10 millions d'années	L'OUVERTURE DES MILIEUX	176|177
7 millions d'années	CEUX QUI MARCHENT DEBOUT	178|179
2,5 millions d'années	LE GENRE HUMAIN	180|181
300 000 ans	*HOMO SAPIENS*	182|183
14 000 ans	LES MEILLEURS AMIS DE L'HOMME	184|185
12 000 ans	LA FIN DE L'ÂGE DE GLACE	186|187

MAINTENANT ET DEMAIN

Actuellement	L'ÉVOLUTION HUMAINE EN MARCHE	188|189
Actuellement	ÇA CHAUFFE…	190|191
Actuellement	LA 6E EXTINCTION	192|193
D'ici… X milliers d'années ?	CHANGEMENT DE DÉCOR ?	194|195
D'ici… 1 million d'années	L'AVENIR DE LA VIE SUR TERRE	196|197
D'ici… 5 milliards d'années	L'AVENIR DE LA TERRE	198|199
D'ici… X milliards d'années	L'AVENIR DE L'UNIVERS	200|201

DES ÉTOILES AU VIVANT, LES MOTEURS DE L'ÉVOLUTION

GRAVITATION ET COSMOLOGIE 203
L'ÉVOLUTION DE LA PLANÈTE TERRE 205
L'ÉVOLUTION CHIMIQUE 207
L'ÉVOLUTION BIOLOGIQUE 209

PRÉSENTATION DES AUTEURS 212
TABLE DES MATIÈRES 214

Les feux d'artifice des premières étoiles

Les contrastes de densité augmentant, les concentrations de matière les plus fortes atteignent un seuil critique au-delà duquel l'effondrement gravitationnel va former les premières étoiles. Ces effondrements rares et locaux du jeune Univers permettent de retrouver des densités disparues depuis le temps de la nucléosynthèse primordiale. Ces îlots denses sont le siège d'une nouvelle étape dans l'évolution de l'Univers. Les intenses énergies associées aux surdensités permettront de refranchir les barrières d'énergie des forces nucléaires et d'entraîner la fusion des éléments primordiaux (hydrogène et hélium) en éléments plus lourds et plus stables libérant de grandes quantités d'énergie sous forme de rayonnement.

L'Univers se ré-illumine tel un arbre de Noël au milieu d'un hiver scandinave!

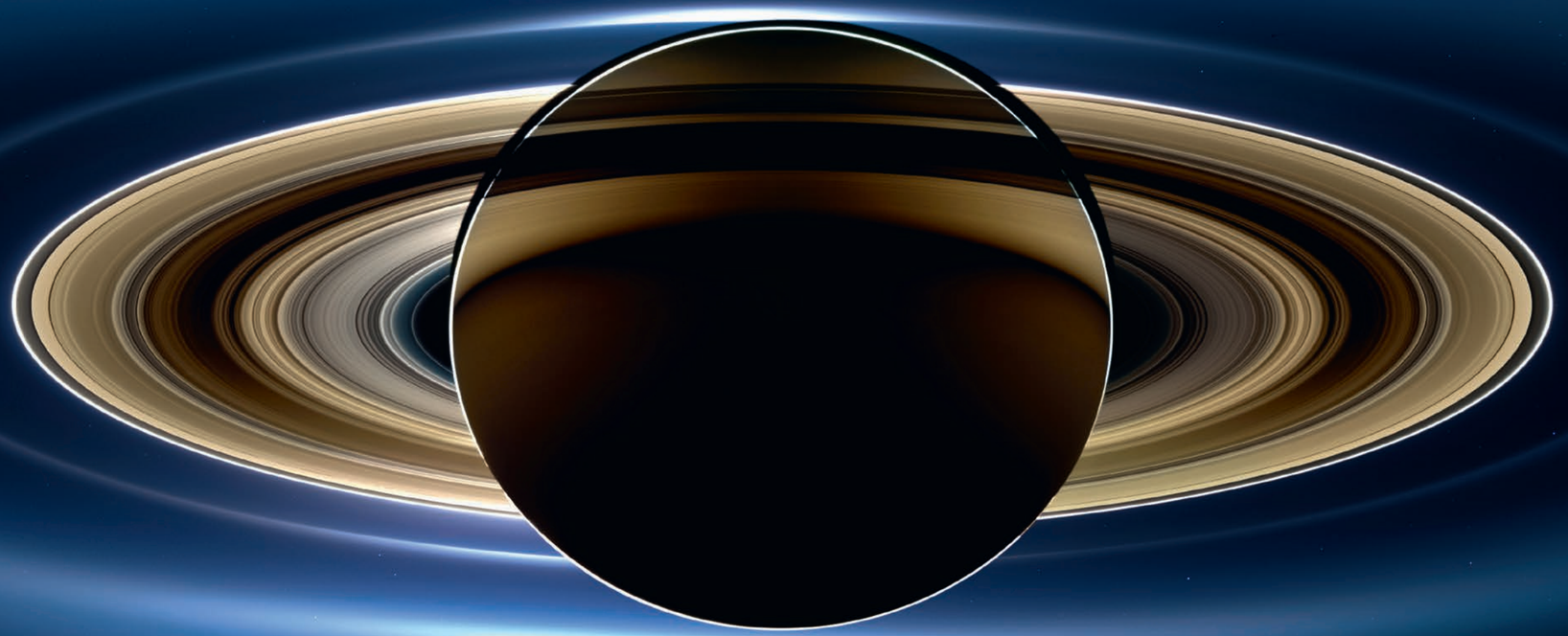
Dans les conditions régnant à la fin des âges sombres (température de fond d'une centaine de degrés), il n'est pas possible de former de petites étoiles comme le Soleil. Les toutes premières étoiles sont beaucoup plus massives : de vrais monstres de plusieurs centaines de fois la masse du Soleil. Dans leur cœur, elles synthétisent l'hélium à partir d'hydrogène, puis le carbone, l'azote et l'oxygène, formant des éléments de plus en plus lourds. Ces étoiles évoluent très rapidement, convertissant une grande partie de leur masse en éléments lourds. Elles explosent en supernovæ et ensemencent le milieu interstellaire en éléments lourds. Cette légère pollution de l'Univers jeune par des éléments lourds aura des conséquences multiples pour la suite de l'histoire...

Cette simulation informatique montre la formation de régions de haute densité (en jaune), environ 200 millions d'années après le Big Bang ; elles donneront naissance à une étoile binaire.

Planètes géantes

Durant le mécanisme de formation planétaire, certains corps solides présents dans le disque de gaz et de poussières atteignent environ 10 fois la masse de la Terre. Ils deviennent capables, par gravité, de retenir du gaz. Ce gaz se contracte, refroidit lentement autour du cœur solide, et la masse de l'enveloppe croît au fil des millions d'années. C'est ainsi que se sont formées Uranus, Neptune et de nombreuses exoplanètes. Les glaces (d'eau et d'autres molécules) étant les principaux constituants de leur cœur solide, on les appelle des géantes de glace. Mais si la masse de l'enveloppe dépasse celle du cœur, la structure devient instable. Elle s'effondre violemment, absorbant plusieurs centaines de masses terrestres de gaz du disque protoplanétaire. L'objet final étant alors constitué principalement de gaz, on parle de géante gazeuse. C'est le cas de Jupiter et Saturne.

Une telle géante creuse son sillon dans le disque protoplanétaire, et s'entoure de son propre disque de gaz et de poussières, à la manière d'une mini-étoile. Les chercheurs considèrent généralement qu'elle crée ainsi un mini-système planétaire avec ses satellites en rotation autour d'elle. Il est ainsi possible qu'une géante gazeuse inhospitalière possède plusieurs satellites dont la partie interne est solide (fer et silicates) et la surface possiblement couverte d'eau. C'est le cas de plusieurs satellites de Jupiter et Saturne (Europe, Ganymède, Encelade, etc.), où l'eau est sous forme de glace. Mais une planète géante située plus près de son étoile pourrait avoir des lunes recouvertes d'océans d'eau liquide, potentiellement habitables...



Saturne éclipsant le Soleil, vue par la sonde Cassini. Les anneaux diffusent la lumière du Soleil et sont bien visibles.

La lumière du soleil couchant, diffusée par les poussières de l'air, colore l'atmosphère terrestre (orange = troposphère ; crème = stratosphère ; bleu = haute atmosphère). Cliché pris depuis l'ISS le 25 mai 2010.

Atmosphère ! Atmosphère !

La très jeune Terre achève de se former. De petits corps planétaires riches en eau et autres volatils – il s'agit essentiellement de météorites – s'y accrètent. Notre planète est alors très chaude et couverte par un océan magmatique : les volatils (y compris l'eau) contenus dans le magma dégazent et s'échappent pour former une atmosphère. L'eau s'y retrouve sous forme de vapeur, mais elle se condense rapidement et retombe sur Terre, donnant naissance aux océans.

À l'instar de Vénus et de Mars, l'atmosphère terrestre primitive est composée d'environ 5 % d'azote (N_2) et de 95 % de dioxyde de carbone (CO_2) pour une pression de plus de 40 bars. Ce dernier gaz entretient un fort effet de serre, qui permet à la surface de la Terre de demeurer à des températures supérieures à 0 °C alors que le Soleil émet 30 % moins d'énergie qu'aujourd'hui. Très rapidement, une partie du CO_2 atmosphérique est dissoute dans l'océan. Il y altère les roches et se recombine, par exemple avec du calcium, pour former des calcaires. Ceux-ci, après s'être déposés au fond de l'océan, seront finalement recyclés dans le manteau par l'intermédiaire des zones de subduction.

Le bilan de ces réactions revient à extraire du CO_2 de l'atmosphère pour le recycler dans le manteau ! Quant à l'azote, c'est un gaz peu réactif dont la quantité dans l'atmosphère n'a pas varié ; mais sa proportion a augmenté du fait de la disparition progressive du CO_2…

Enfin une Terre moderne !

Un changement majeur dans l'évolution géologique de la Terre se produit aux environs de 2,5-2,3 milliards d'années (transition Archéen-Protérozoïque). Notre planète se refroidit et franchit un seuil thermique ; on assiste à la transition d'une tectonique globale archaïque à la tectonique des plaques moderne.

En effet, la chaleur interne de la Terre devient trop faible pour permettre les forts taux de fusion (>50%) du manteau nécessaires à la genèse des komatiites ; les taux de fusion plus faibles (~30 %) n'autorisent plus que la formation de basaltes. Alors qu'à l'Archéen la croûte continentale se formait par fusion des basaltes chauds et hydratés de la croûte océanique subductée, ceux-ci sont désormais trop froids pour pouvoir fondre ; ils se déshydratent et c'est la fusion du manteau sus-jacent qui est dès lors à l'origine de la croûte continentale.

En d'autres termes, des figures géologiques typiques de l'Archéen disparaissent (komatiites, TTG, tectonique verticale, intense hydrothermalisme, petites plaques lithosphériques, etc…), alors que de nouvelles figures compatibles avec une Terre interne plus froide, apparaissent (andésites, abondance des granites, métamorphisme haute pression-basse température, grandes plaques lithosphériques, etc…). La transition entre les lithologies archéennes et protérozoïques n'a pas eu lieu partout exactement au même moment ; au contraire, durant quelques centaines de millions d'années, des lithologies « archaïques » ont pu coexister avec leurs équivalents « modernes ». Parfois même, sont apparues de nouvelles roches, uniquement connues pendant cette période de transition. C'est le cas de granites particuliers connus sous le nom barbare de « sanukitoïdes ».

À partir de 2,5 Ga, avec le refroidissement de la Terre et la rigidification des plaques, l'érection de hautes montagnes peut donner naissance aux grands fleuves, tel que le Gange, dont on voit ici le delta.

Cellules, tissus, organes…

Il y a… ~700 millions d'années

Des nombreuses espèces de bactéries et d'archées forment des agrégats de cellules possédant des degrés d'organisation variables, pouvant conduire à une spécialisation morphologique ou métabolique ; c'est par exemple le cas des cyanobactéries ou des myxobactéries. Cependant, le nombre de catégories de cellules spécialisées demeure toujours très restreint. De même, de nombreux eucaryotes, au cours de leur cycle de vie, forment des agrégats cellulaires, comme les dictyostelidés (amibes sociales).

La multicellularité complexe, caractérisée par la présence de vrais tissus organisés, est exclusive des eucaryotes et beaucoup plus rare. Néanmoins, elle est apparue plusieurs fois au cours de l'évolution à partir d'ancêtres unicellulaires, et ce chez trois groupes emblématiques, les plantes, les animaux et les champignons, mais aussi chez les algues vertes, les algues rouges et les algues brunes (laminaires).

L'évolution de la multicellularité s'accompagne d'une reproduction sexuée avec des cycles de vie impliquant la différentiation de cellules somatiques et germinales et de phases haploïdes et diploïdes, mais aussi la spécialisation de protéines impliquées dans la reconnaissance cellulaire, l'adhésion, ou la régulation de l'expression génique indispensable pour la différentiation cellulaire. Les organismes multicellulaires apparaissent de manière massive à la fin du Précambrien, même si des fossiles multicellulaires assez complexes et beaucoup plus âgés montrent que certains de ces groupes, comme les algues rouges, ont une origine très ancienne (~1,6 à 1,2 milliard d'années).

Les animaux, comme cette salamandre maculée (*Ambystoma maculatum*), sont des eucaryotes multicellulaires dont les cellules forment de tissus spécialisés divers et complexes.

Le thylacine, ou loup de Tasmanie, est un mammifère marsupial carnivore considéré comme éteint depuis 1936.

La 6e extinction

La croissance très rapide de la population humaine a un impact très fort sur les écosystèmes, dont elle entraîne, entre autres, la disparition de nombreuses espèces.

Si de grands animaux, tels les mammouths, ont par le passé disparu en partie sous la pression de l'homme, le phénomène d'extinction est devenu aujourd'hui très massif. Même s'il est difficile à estimer de manière précise à cause de notre connaissance encore partielle de la biodiversité, le taux d'extinction d'espèces semble en accélération constante depuis la révolution industrielle et, surtout, depuis les années 1950. On parle de l'extinction de l'Anthropocène, ou « sixième extinction », en référence aux autres cinq grandes extinctions massives décelées à partir du registre fossile terrestre et, surtout, marin. En 2017, dans une étude très alarmante s'intéressant aux populations plutôt qu'aux espèces, et portant sur la moitié des 27 600 espèces de vertébrés connues, des chercheurs évoquent même un « anéantissement biologique ». 32 % des espèces seraient en déclin en termes de population et de répartition.

Les extinctions actuelles menacent tous les écosystèmes et groupes d'organismes, même si les données disponibles concernent surtout les animaux et les plantes. Les disparitions en cours sont liées aux activités humaines : destruction des habitats (déforestation, urbanisation, etc.), pollution, surexploitation des ressources, introduction d'espèces envahissantes qui déplacent les espèces natives… à quoi s'ajoutent les effets du réchauffement climatique, lui aussi dû à l'homme.

LA PLUS GRANDE HISTOIRE JAMAIS CONTÉE

DES ORIGINES DE L'UNIVERS
À LA VIE SUR TERRE

Voici la plus grande histoire jamais contée…
Elle commence voici 13,8 milliards d'années,
aux premiers instants de l'Univers, tels que la physique
et la cosmologie actuelles peuvent les reconstituer…
Elle nous fait découvrir la naissance des premières étoiles,
des premières galaxies, des premières planètes…
Elle nous emmène explorer la Terre primitive, assister
à l'apparition de l'eau, de l'atmosphère, des continents…
Elle nous invite à la naissance des premières formes du vivant,
à suivre leur diversification et leur complexification,
des tout premiers organismes jusqu'à l'avènement du genre *Homo*…
Elle nous transporte enfin dans le futur, celui de notre espèce,
de notre planète et de sa biodiversité, et de l'univers lui-même.
Cosmologie, astrophysique, planétologie, chimie, géologie, biologie,
paléontologie… Toutes les disciplines du savoir sont réunies
pour restituer dans ce beau livre ambitieux et original,
magnifiquement illustré, cette histoire passionnante
– la nôtre –, de façon accessible à tous, grâce à des textes
synthétiques rédigés par des spécialistes reconnus
de chaque domaine.

Un ouvrage sous la direction de **Muriel Gargaud**,
astrophysicienne, avec les collaborations de :
Sylvain Bontemps, astrophysicien
Aurélien Crida, planétologue
Grégoire Danger, chimiste
Emmanuelle J. Javaux, micropaléontologue
Marc Lachièze-Rey, cosmologue
Purificación López-García, biologiste
Hervé Martin, géologue
Jennyfer Miot, géomicrobiologiste
David Moreira, biologiste
Pascal Tassy, paléontologue

Belin

www.editions-belin.com

ISBN 978-410-01208-8

9 782410 012088

41001208

28 €