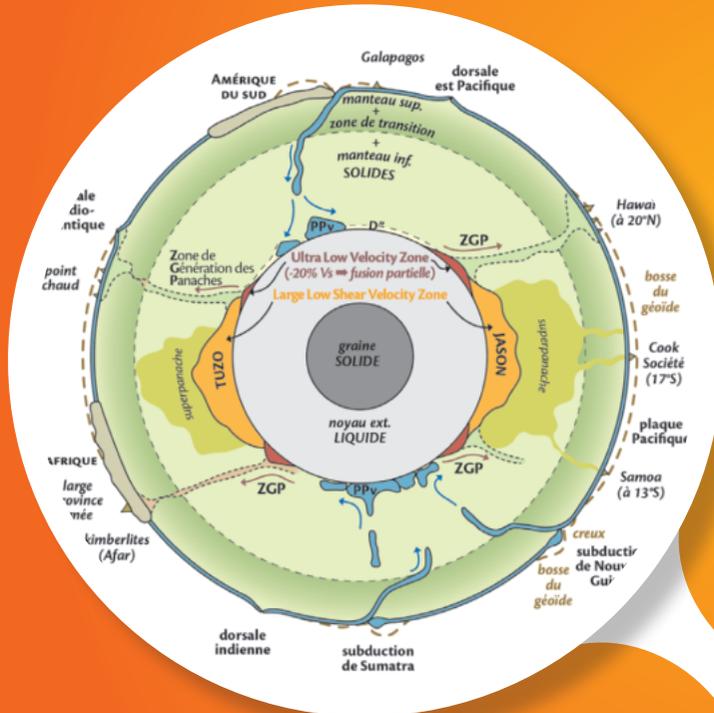


LICENCE  
PRÉPAS  
CAPES  
AGREG

# LA GÉOLOGIE

## EN 1200 VISUELS



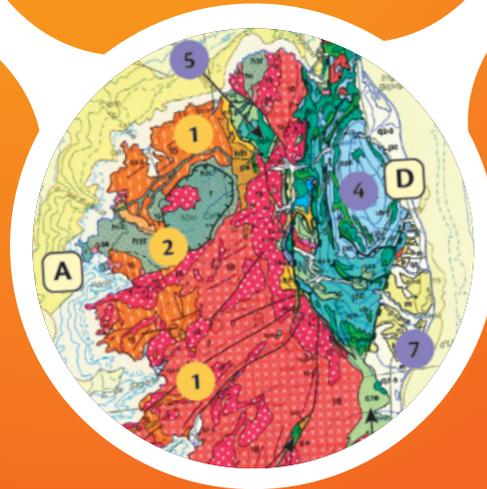
Sous la direction  
scientifique de  
Pierre Thomas

Valérie Boutin  
Laurent Geray

Jean-François Bonello

Aurélié Denis  
Aude de Quillacq  
Audrey Proust  
Marlène Vabre

Illustrations de  
Laurent Geray



TOUT LE COURS EN SCHÉMAS,  
PHOTOS ET CARTES



# **LA GÉOLOGIE**

## **EN 1200 VISUELS**



LICENCE  
PRÉPAS  
CAPES  
AGREG

# LA GÉOLOGIE

## EN 1200 VISUELS

**Valérie Boutin  
Laurent Geray**

**Jean-François Bonello  
Aurélie Denis  
Aude de Quillacq  
Audrey Proust  
Marlène Vabre**

**Illustrations de  
Laurent Geray**

**Sous la direction scientifique  
de Pierre Thomas**

**TOUT LE COURS, EN SCHÉMAS,  
PHOTOS ET CARTES**

Pour toute information sur notre fonds et nos nouveautés,  
consultez notre site web :

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)

© De Boeck Supérieur s.a., 2023  
Rue du Bosquet, 7 – 1348 Louvain-la-Neuve

Illustrations scientifiques : Laurent Geray  
Maquette et mise en page de l'intérieur : Laurent Geray

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :  
Bibliothèque nationale, Paris : septembre 2023  
Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2023/13647/129

ISBN 978-2-8073-3191-4

*Les auteurs remercient chaleureusement Ph. Agard, A. Augier, Q. Boesch, G. Chazot, P. Chèvremont, N. Coltice, C. Conion, B. de Quillacq, O. Dequincey, F. Gaudry, M. Jentzer, S. Labrosse, C. Langlois, M. Le Bars, T. Lorin, F. Magot, C. Masquelet, D. Mollex, H. Ohmoto, J.P. Perrillat, Y. Siméon, M. Tesson, pour leur aide et leurs photographies.*

*Ils souhaitent également exprimer toute leur reconnaissance au site Planet-Terre et à la Lithothèque de l'ENS Lyon pour développer toutes ces curiosités géologiques et proposer autant de ressources.*

*Ils tiennent enfin à remercier le BRGM et, en particulier Frédéric Simien, pour cette collaboration.*

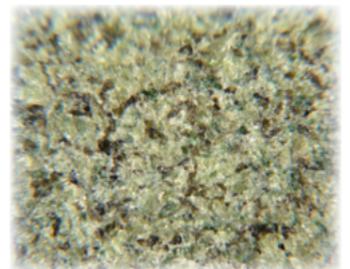
## PARTIE I - LA TERRE DANS L'UNIVERS

- 01 L'univers observable
- 02 Les étoiles et la nucléosynthèse
- 03 Les planètes et autres petits corps célestes de l'Univers
- 04 Les planètes du système solaire et leurs satellites
- 05 Géologie de Mars
- 06 La Terre : la planète bleue
- 07 Géologie de la Lune
- 08 Les possibilités de vie dans le système solaire et l'Univers



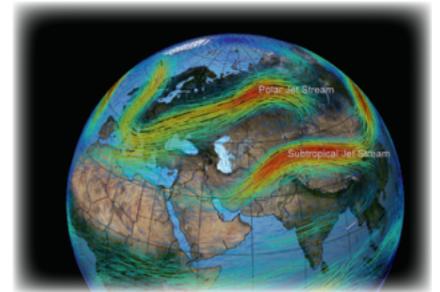
## PARTIE II - LA STRUCTURE DES ENVELOPPES TERRESTRES

- 09 Structure et composition de l'atmosphère
- 10 Structure et composition de l'océan
- 11 Le modèle PREM
- 12 Apport des météorites à la connaissance de la structure interne de la Terre
- 13 Les silicates
- 14 Pétrologie des enveloppes solides : les roches magmatiques
- 15 Pétrologie des enveloppes solides : les roches magmatiques
- 16 Pétrologie des enveloppes solides : les roches métamorphiques
- 17 Pétrologie des enveloppes solides : les roches métamorphiques
- 18 Pétrologie des enveloppes solides : les roches sédimentaires
- 19 Pétrologie des enveloppes solides : les roches sédimentaires
- 20 Pétrologie des enveloppes solides : les altérites et les roches « hydrothermales »
- 21 Pétrologie des enveloppes solides : le manteau supérieur
- 22 Minéralogie et structure du manteau profond
- 23 Le noyau terrestre



## PARTIE III - DYNAMIQUE DES ENVELOPPES TERRESTRES

- 24 Sources interne et externe de chaleur
- 25 Transfert de l'énergie
- 26 Circulation atmosphérique générale
- 27 Circulation océanique générale
- 28 Les oscillations climatiques
- 29 La tectonique des plaques : des faits au modèle
- 30 Les grands contextes de la tectonique des plaques : divergence
- 31 Les grands contextes de la tectonique des plaques : convergence
- 32 Les grands contextes de la tectonique des plaques : coulissage
- 33 La convection mantellique : les modèles
- 34 Les points chauds
- 35 Couplage convection et tectonique



## PARTIE IV - LES DÉFORMATIONS DE LA LITHOSPHERE

- 36 Déformation et contraintes
- 37 Déformation et contraintes : les presses triaxiales
- 38 Les déformations discontinues : les failles
- 39 Les déformations discontinues : fentes de tension et joints stylolithiques
- 40 Les déformations continues hétérogènes : les plis
- 41 Schistosités et linéations
- 42 Cisaillement pur et cisaillement simple
- 43 Les structures composites : les plis-failles
- 44 Les enveloppes rhéologiques
- 45 Validation du modèle rhéologique de la lithosphère
- 46 La sismogenèse



## PARTIE V - LE MÉTAMORPHISME

- 47 Les différents types de métamorphisme
- 48 Le métamorphisme de contact
- 49 Les transformations minéralogiques : les principes
- 50 Les transformations minéralogiques : les représentations graphiques
- 51 Les transformations minéralogiques : les séquences
- 52 Les faciès métamorphiques
- 53 Établissement des chemins PTt : les principes
- 54 Établissement des chemins PTt : enseignements complémentaires
- 55 Gradients métamorphiques et contextes géodynamiques
- 56 Les relations métamorphique - déformations



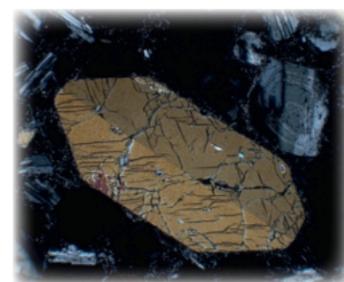
## PARTIE VI - LES PHÉNOMÈNES EXOGÈNES

- 57 Érosion et paysage
- 58 Les mécanismes de l'altération physique et de l'érosion
- 59 Les mécanismes de l'altération chimique et de l'érosion
- 60 L'altération d'une roche magmatique : exemple de l'altération du granite
- 61 Le modelé karstique
- 62 Transport des matériaux issus de l'altération
- 63 Les marges passives
- 64 Les bassins sédimentaires
- 65 Les dépôts détritiques
- 66 La sédimentation biogène carbonatée
- 67 La sédimentation biogène siliceuse
- 68 La sédimentation évaporitique
- 69 La diagenèse : principes généraux
- 70 Origine et devenir de la matière organique dans les dépôts sédimentaires



## PARTIE VII - LE MAGMATISME

- 71** Les modes d'expression du magmatisme
- 72** Les modes d'expression du magmatisme
- 73** La fusion des roches : les grands contextes
- 74** La fusion des roches : étude expérimentale
- 75** L'anatexie crustale
- 76** Fusion de la péridotite mantellique
- 77** Diversités des sources mantelliques
- 78** Extraction et ascension des magmas
- 79** Différenciation magmatique et séries magmatiques
- 80** Étude expérimentale de la cristallisation d'un magma
- 81** Cristallisation fractionnée : étude d'une province magmatique
- 82** Mélange et contaminations de magmas
- 83** Série tholéiitique
- 84** Série calcoalcaline
- 85** Séries alcaline et hyperalcaline
- 86** La diversité des granites
- 87** Magmatisme de l'Archéen et formation de la lithosphère continentale
- 88** Relations tectonique des plaques - magmatisme



## PARTIE VIII - LA GÉOLOGIE, UNE SCIENCE HISTORIQUE

- 89** La datation absolue
- 90** Les principes de datation relative par lithostratigraphie
- 91** Les principes de datation relative par biostratigraphie
- 92** Le découpage des temps géologiques
- 93** L'âge de la Terre
- 94** Une brève histoire de la Terre
- 95** Grandes lignes de l'évolution du vivant
- 96** Les crises biologiques phanérozoïques
- 97** Les grandes lignes de l'évolution de l'atmosphère
- 98** L'orogénèse varisque en France
- 99** Variations climatiques : les indices
- 100** Variations climatiques : les origines
- 101** Le cycle du carbone
- 102** La stratigraphie séquentielle
- 103** Reconstitution des paléoenvironnements glaciaires
- 104** Reconstitution des paléoenvironnements récifaux
- 105** Reconstitution des paléoenvironnements alluviaux



## PARTIE IX - RISQUES GÉOLOGIQUES

- 106** Les phénomènes naturels extrêmes
- 107** De l'aléa au risque
- 108** Le risque sismique
- 109** Le risque volcanique
- 110** Le changement climatique anthropique



## PARTIE X - RESSOURCES ET LEUR ENVIRONNEMENT

- 111** Matériaux et minerais
- 112** Géologie et constructions humaines
- 113** Les minerais et leurs gisements
- 114** Ressources énergétiques : pétrole, charbon, gaz
- 115** Ressources énergétiques : uranium et géothermie
- 116** L'hydrogéologie



## PARTIE XI - GÉOLOGIE DE LA FRANCE

- 117** Les grands ensembles de la France métropolitaine
- 118** Étude d'un massif ancien
- 119** Étude d'une chaîne récente : les Alpes
- 120** Étude d'une chaîne récente : les Pyrénées
- 121** Étude d'un bassin sédimentaire intracratonique : le Bassin de parisien
- 122** Étude d'un fossé d'effondrement : le fossé rhénan
- 123** Le volcanisme cénozoïque en France métropolitaine
- 124** La Corse
- 125** Les Antilles
- 126** La Réunion
- 127** La Nouvelle Calédonie
- 128** La Polynésie française
- 129** La Guyane
- 130** Saint-Pierre-et-Miquelon
- 131** Mayotte
- 132** Wallis-et-Futuna



## PARTIE XII - MÉTHODES GÉOLOGIQUES ET GÉOCHIMIQUES

- 133** Étude des mouvements à la surface de la Terre : le GPS
- 134** L'interférométrie radar
- 135** Utilisation des isotopes comme traceurs des processus géologiques
- 136** La tomographie sismique
- 137** La gravimétrie
- 138** L'isostasie
- 139** Sismique réflexion, sismique réfraction
- 140** Les diagraphies
- 141** Reconnaissance des minéraux à l'œil nu
- 142** Le microscope polarisant : principe
- 143** Reconnaissance des minéraux en microscopie
- 144** La spectroscopie Raman
- 145** Les fossiles caractéristiques en géologie





---

# PARTIE I

---

## *LA TERRE DANS L'UNIVERS*



# L'Univers observable

**UNIVERS OBSERVABLE** = sphère centrée sur la Terre et ayant pour limite l'horizon cosmologique.

De quoi est composé l'Univers observable ? Quelles sont les techniques permettant de l'appréhender ?

## I - L'Univers observable résulte du Big Bang

L'Univers observable dépend de la position de l'observateur

Du fait que la vitesse de la lumière est finie et que notre Univers a également un âge fini de 13,8 milliards d'années (*Ga*), la lumière des objets célestes situés au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas eu le temps de parvenir jusqu'à nous.

De plus, l'Univers est en expansion accélérée.

**Diamètre de l'Univers potentiellement observable :**  
93 milliards d'années-lumière

⚠ Une année-lumière vaut  
9 461 milliards de km.

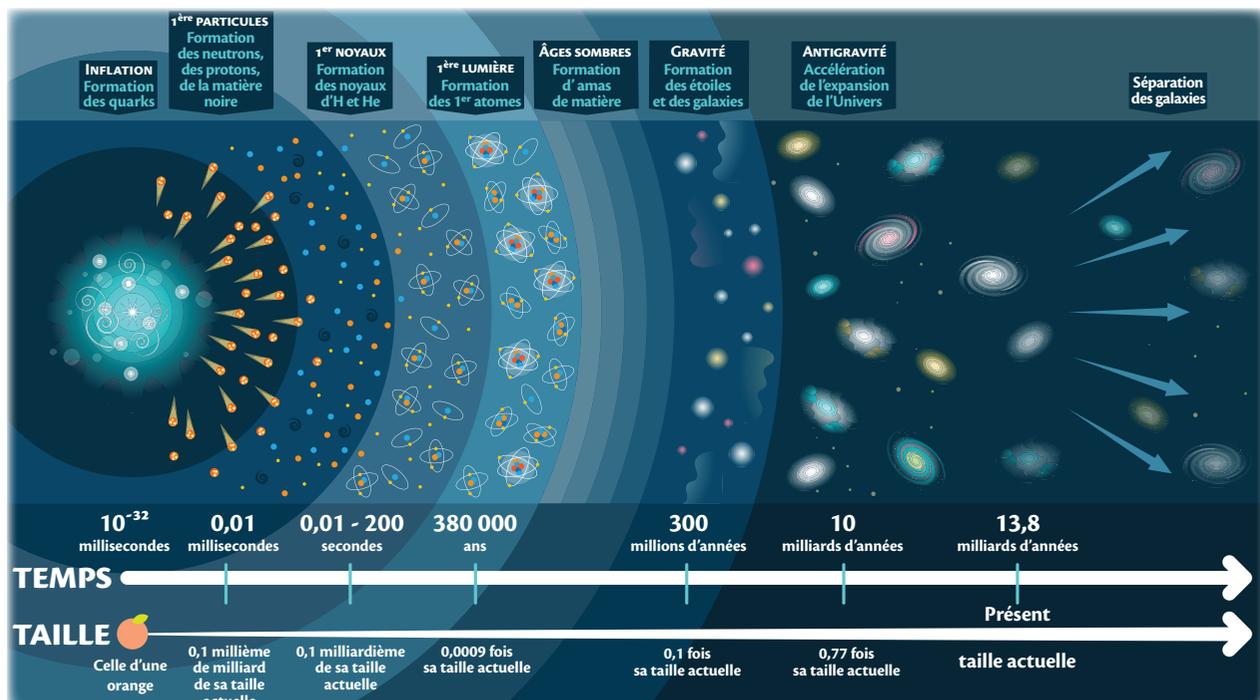


*Une représentation de l'Univers observable centré sur le Soleil, avec une échelle logarithmique*

**Observer des objets lointains, c'est observer le passé.** En effet, la lumière met un certain temps à nous parvenir. De plus, comme l'Univers est en expansion, le rayonnement électromagnétique venant de loin est étiré, c'est-à-dire décalé vers le rouge. De plus, cette expansion de l'Univers est accélérée. Actuellement, les calculs de taux d'expansion de l'Univers diffèrent suivant les observations et modèles utilisés, c'est donc un sujet activement étudié en cosmologie.

### Le modèle du Big Bang

Le **Big Bang** est un modèle cosmologique de genèse de l'Univers qui en reconstitue l'évolution sur 13,8 milliards d'années. Il postule que l'Univers a été plus dense et plus chaud par le passé et qu'il est potentiellement né d'une singularité. Le concept a été proposé par le chanoine et astrophysicien Georges Lemaître en 1927.

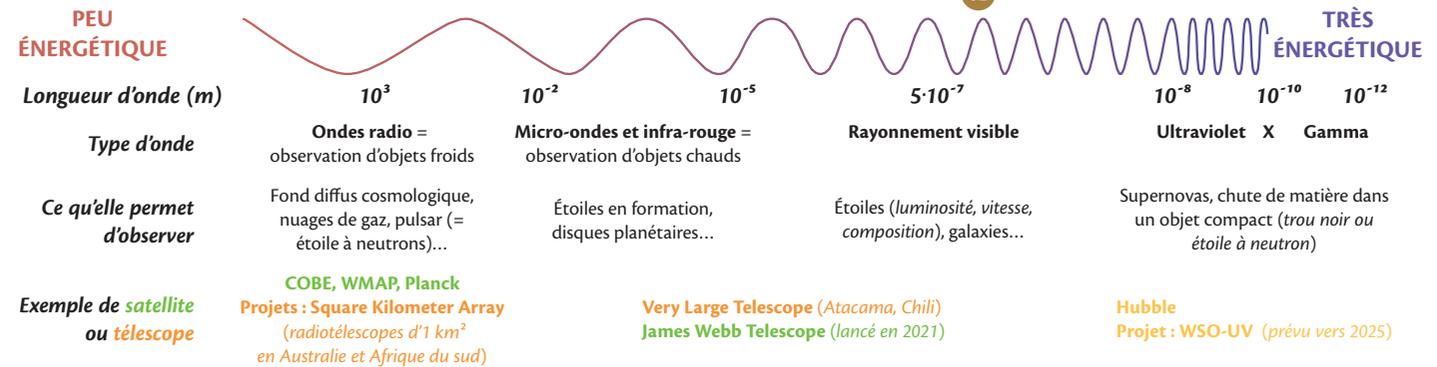


*Les principaux événements ayant suivi le « grand boum » ; ce modèle est très bien étayé et solide*

## II - Les observations et les modèles actuels de composition de l'Univers

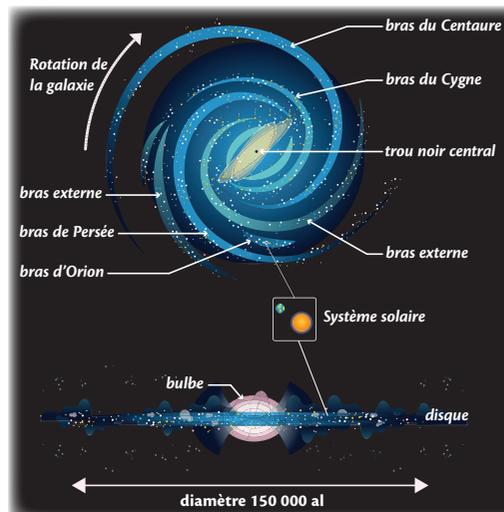
### ☛ Chaque longueur d'onde de rayonnement électromagnétique permet de voir un type d'objets particulier

On ne peut observer les objets qu'à distance, en utilisant une gamme particulière du spectre électromagnétique. 

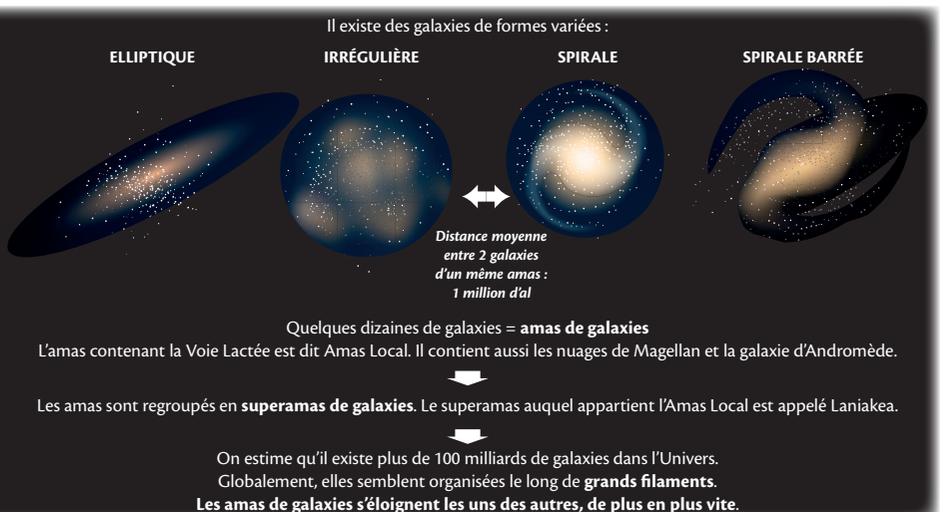


### ☛ Le modèle actuel d'organisation des galaxies et des échelles d'ordre supérieur

La Voie Lactée, une galaxie spiralée :  
vue par-dessus (haut) et par la tranche (bas)



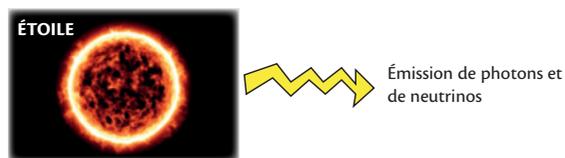
#### Les autres galaxies et leur agencement



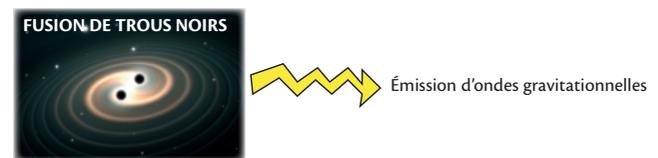
 Certaines galaxies ont des noyaux très actifs appelés **quasars** (= quasi stellar radio source), qui sont des trous noirs supermassifs. Le trou noir central de la Voie Lactée est, lui, de dimension modeste et peu actif.

### ☛ Les nouveaux vecteurs d'information en astrophysique

Les **neutrinos** sont des particules de très faible masse et interagissant très peu avec la matière ordinaire. Ils donnent des informations sur la nucléosynthèse et sur les supernovas. 

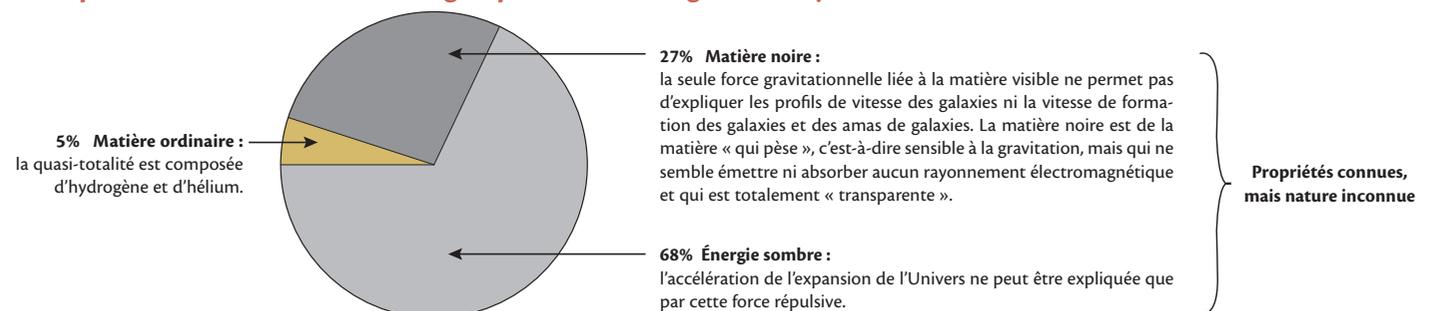


Les **ondes gravitationnelles**, détectées depuis 2015, sont liées à une déformation de l'espace-temps. Elles permettent de détecter des fusions de trous noirs ou d'étoiles à neutrons.



Neutrinos et ondes gravitationnelles permettent de préciser les propriétés de certains objets de l'Univers

### ☛ La quantification du contenu énergétique de l'Univers grâce à la synthèse des données



# Les étoiles et la nucléosynthèse

**ÉTOILE** = boule de gaz (H, He majoritairement) dont la masse est suffisante pour que s'amorcent des réactions thermonucléaires.

**NUCLÉOSYNTHÈSE** = mécanismes de formation des noyaux d'atomes.

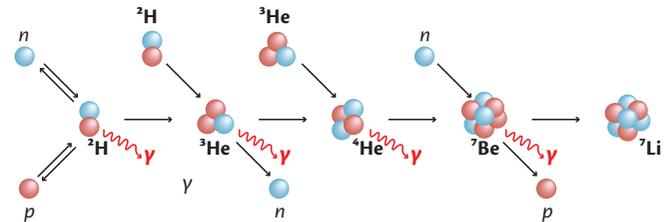
Comment les étoiles apparaissent-elles, évoluent-elles et meurent-elles ?

Comment sont formés les atomes constituant la matière visible de l'Univers ?

## I - La nucléosynthèse primordiale

Entre 10 s et 20 min après le **Big Bang**, des réactions nucléaires qualifiées de « **nucléosynthèse primordiale** » ont produit des noyaux de deutérium et d'hélium, qui se sont ajoutés au noyau d'hydrogène (*proton solitaire*), plus une faible proportion de lithium, de béryllium et de bore.

Avec la découverte du fond diffus cosmologique et la mesure de l'expansion de l'Univers, la description de la nucléosynthèse primordiale est un des piliers étayant le modèle du Big Bang. En particulier, les ratios et la distribution des isotopes de l'Hélium jouent un rôle important.



## II - La fusion d'hydrogène en hélium au sein d'une étoile de type solaire

Carte d'identité d'une étoile de type solaire :

→ **Catégorie** = naine jaune

→ **Diamètre solaire** (sera noté  $D$  par la suite)  $\approx$  100 fois le diamètre terrestre

→ **Masse** =  $2.10^{30}$  kg (99,8% de la masse du système solaire) ; masse volumique :  $1\,500\text{ kg/m}^3$

→ **Composition** : plasma (= sous l'effet de la chaleur, les noyaux atomiques et les électrons sont séparés) d'hydrogène et d'hélium.

→ **Production d'énergie** :  $6.10^{11}$  J par gramme d'H transformé en He ; Puissance :  $10^{26}$  W

### Les enveloppes internes du Soleil

#### 1 Noyau = cœur

Rayon = 210 000 km

$T = 15 \cdot 10^6$  K

⇒ Siège des réactions thermonucléaires

#### 2 Zone de radiation

Rayon = 490 000 km

$T = 2 \cdot 10^6$  K

⇒ Transfert d'énergie par rayonnement

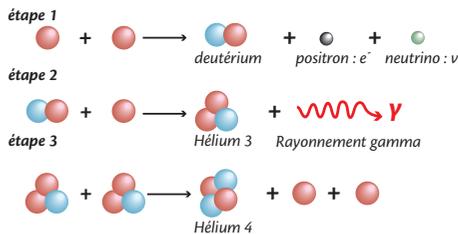
#### 3 Zone convective

Rayon = 700 000 km

$T =$  entre  $10^3$  et  $10^6$  K

⇒ Présence de taches sombres à sa surface

⇒ Cellules de convection à l'origine du **champ magnétique solaire**



Le Soleil, siège de réactions thermonucléaires, est organisé en couches concentriques.

### Les enveloppes externes du Soleil

#### 4 Photosphère

Quelques centaines de km d'épaisseur

$T = 6\,000$  K

Zone d'émission des photons

⇒ Présence de protubérances = jets de plasma

⇒ **Activité solaire cyclique** = période d'environ 11 ans

#### 5 Chromosphère

$T = 20\,000$  K

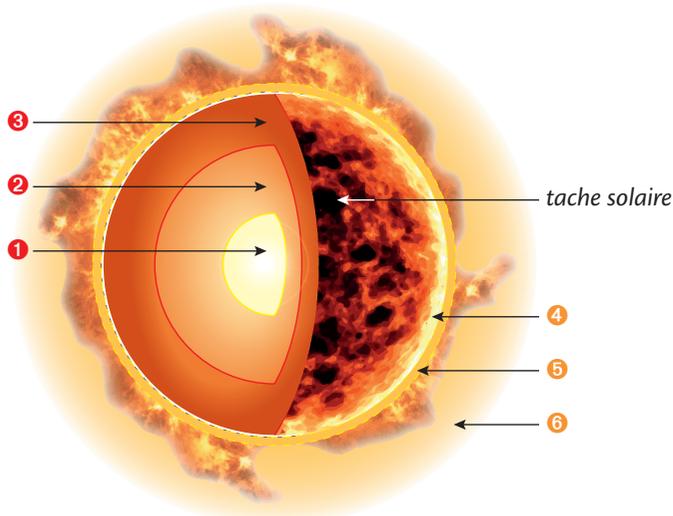
Épaisseur = 3 000 km

#### 6 Couronne solaire

Épaisseur = 10 fois le rayon solaire

$T = 2,5 \cdot 10^6$  K

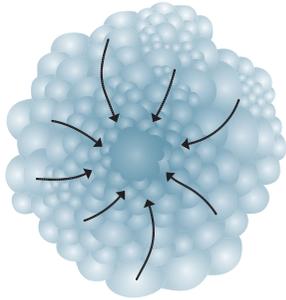
⇒ Plasma formé de protons et d'électrons dont les vitesses sont telles qu'ils s'échappent du Soleil, formant le **vent solaire**.



La base de la couronne solaire est visible à l'occasion d'une éclipse.

# III - Les réactions de nucléosynthèse au cours de la naissance, de la vie et de la mort d'une étoile

## La naissance d'une étoile



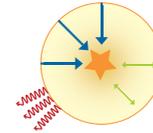
Des nuages formés essentiellement d'hydrogène et datant du Big Bang peuplent l'Univers. Leur répartition est inhomogène : la gravitation renforce les zones de surdensité et l'effondrement peut survenir.

L'effondrement d'un nuage de gaz donne une **étoile**, possiblement accompagnée d'un **cortège de planètes**. 04

## Les 4 types d'interactions participant à la stabilité de l'étoile

**Interaction gravitationnelle**  
La gravitation comprime l'étoile, donc la chauffe.

**Interaction forte**  
Au cœur de l'étoile, une température suffisante est atteinte pour déclencher les réactions thermonucléaires.



**Interaction électromagnétique**  
Comme l'étoile chauffe, elle rayonne : il y a libération de photons, ce qui dissipe de l'énergie.

**Interaction faible**  
Des protons sont convertis en neutrons au cours de la réaction de fusion.

Les mécanismes à l'œuvre dans l'initiation des réactions thermonucléaires

## Selon la masse de l'étoile, deux types de réactions de fusion possibles

### Étoile de faible masse (< 4 MS), type naine jaune (exemple : Soleil)

Chaîne de réactions de type « proton-proton ».



**Fusion de l'hydrogène en hélium 4**

Durée de vie de l'ordre du milliard à une dizaine de **milliards** d'années.

### Le vieillissement d'une étoile

La fusion produit des noyaux de plus en plus lourds, jusqu'à l'**atome d'oxygène**.

Lorsque tout l'hydrogène est épuisé : transformation en **étoile rouge**.



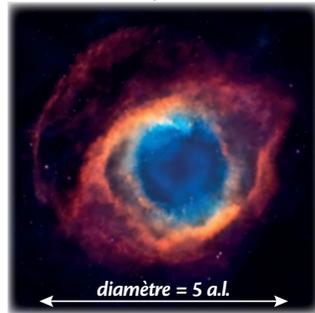
**Géante rouge**

Diamètre = 100 D  
(mais densité divisée par  $10^6$ )

### La fin de vie d'une étoile

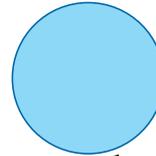
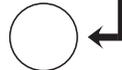
#### Nébuleuse planétaire =

Éjection des enveloppes périphériques riches en éléments C, N, O, Mg, S... (ici, la *nébuleuse de l'hélice*). Effondrement du cœur non expulsé, qui devient une **naine blanche**.



#### Naine blanche = résidu (masse < 1,44 MS)

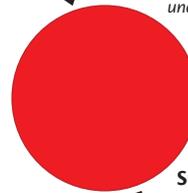
Effondrement associé à une répulsion de nature quantique. Pas de réaction thermonucléaire. Refroidissement. Diamètre = D/100 (mais densité multipliée par  $10^6$ ).



### Étoile de forte masse (> 4 MS), type géante bleue

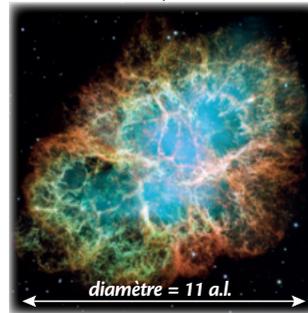
Chaîne de réactions de type « Carbone-Azote-Oxygène » (CNO) dans lequel le carbone joue comme un catalyseur qui accélère la fusion d'hydrogène en hélium. Ce cycle se produit à plus haute température que le cycle proton-proton, car les atomes qui fusionnent ont des masses beaucoup plus élevées que l'hydrogène.

Durée de vie de l'ordre d'une dizaine à une centaine de **millions** d'années.



**Supergéante rouge**

La fusion produit des noyaux de plus en plus lourds, jusqu'à l'**atome de fer** qui est très stable.



#### Supernova =

Étoile qui explose. Le cœur s'effondre et une onde de choc expulse les couches externes. Les éléments plus lourds que le fer sont essentiellement formés au sein des supernovas, par des réactions de fusion (ici, la *nébuleuse du crabe*).

Si résidu de masse comprise entre 1,44 et 3,2 MS : formation d'une **étoile à neutron**, un objet très petit et dense (diamètre d'environ 20 km et densité  $10^{15} \text{g/cm}^3$ )

Si résidu de masse supérieure à 3,2 MS : le résidu de supernova est un **trou noir** (objet si massif que rien ne s'en échappe, pas même la lumière). Le diamètre d'un trou noir n'a pas de signification ; tout au plus donne-t-on le diamètre de son horizon.

# IV - Bilan : l'origine des éléments

## L'origine des noyaux des atomes de la classification périodique

Élément le plus simple, formé quelques secondes après le Big Bang

Éléments formés dans les étoiles en fin de vie (géantes ou supergéantes rouges, supernovas...)

Éléments formés essentiellement par nucléosynthèse primordiale, un peu au sein des étoiles et un peu par spallation.

Éléments formés par spallation : un rayon cosmique brise un noyau d'atome lourd en particules plus légères																Éléments formés essentiellement par nucléosynthèse primordiale, un peu au sein des étoiles et un peu par spallation.																																																																																																																																																															
<table border="1"> <tr> <td>1</td><td>2</td><td colspan="10"></td><td>10</td><td>11</td> </tr> <tr> <td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td> </tr> <tr> <td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td> </tr> <tr> <td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td><td>31</td><td>32</td><td>33</td><td>34</td> </tr> <tr> <td>37</td><td>38</td><td>39</td><td>40</td><td>41</td><td>42</td><td>43</td><td>44</td><td>45</td><td>46</td><td>47</td><td>48</td><td>49</td><td>50</td><td>51</td><td>52</td> </tr> <tr> <td>55</td><td>56</td><td>57-71</td><td>72</td><td>73</td><td>74</td><td>75</td><td>76</td><td>77</td><td>78</td><td>79</td><td>80</td><td>81</td><td>82</td><td>83</td><td>84</td> </tr> <tr> <td>87</td><td>88</td><td>89-103</td><td>104</td><td>105</td><td>106</td><td>107</td><td>108</td><td>109</td><td>110</td><td>111</td><td>112</td><td>113</td><td>114</td><td>115</td><td>116</td> </tr> <tr> <td>89</td><td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td><td>104</td> </tr> <tr> <td>101</td><td>102</td><td>103</td><td>104</td><td>105</td><td>106</td><td>107</td><td>108</td><td>109</td><td>110</td><td>111</td><td>112</td><td>113</td><td>114</td><td>115</td><td>116</td> </tr> <tr> <td>103</td><td>104</td><td>105</td><td>106</td><td>107</td><td>108</td><td>109</td><td>110</td><td>111</td><td>112</td><td>113</td><td>114</td><td>115</td><td>116</td><td>117</td><td>118</td> </tr> </table>																		1	2											10	11	3	4	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	17	18	19	20	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
1	2											10	11																																																																																																																																																																		
3	4	5	6	7	8	9	12	13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																																																																																
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26																																																																																																																																																																
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34																																																																																																																																																																
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52																																																																																																																																																																
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84																																																																																																																																																																
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116																																																																																																																																																																
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104																																																																																																																																																																
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116																																																																																																																																																																
103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118																																																																																																																																																																



La fusion nucléaire est actuellement à l'étude, elle pourrait être utilisée comme source d'énergie dans les années à venir (exemple : Réacteur thermonucléaire expérimental international = ITER, situé à Cadarache dans les Bouches-du-Rhône).

Lanthanides *	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Actinides **	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103

Au-delà de l'élément Uranium (Z= 92) : éléments de synthèse, non détectés dans la nature

# Les planètes et autres petits corps célestes de l'Univers

**(EXO)PLANÈTE** = corps céleste en orbite autour d'une étoile, qui a une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique (forme sphérique ou ellipsoïde de révolution) et ayant éliminé (ou confiné en certains sites précis) tout corps se déplaçant dans le voisinage de son orbite.

**PETIT CORPS CÉLESTE** = ici, ce terme regroupe les planètes naines, comètes et astéroïdes.

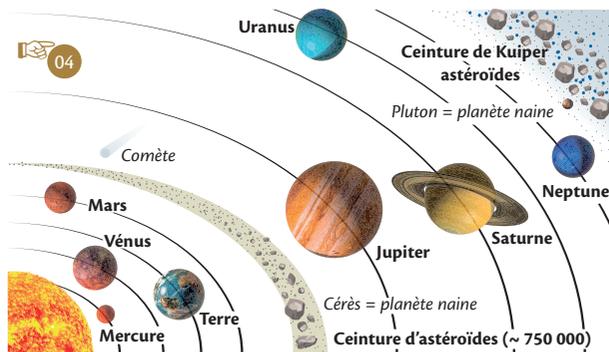
Quels sont les petits objets massifs que l'on détecte dans l'Univers ?

## I - Les planètes et autres petits corps célestes du système solaire

### L'organisation du système solaire

Tous les objets ci-dessous sont dans un même plan, à quelques degrés près : l'écliptique.

⚠ 1 unité astronomique (UA) = distance Terre-Soleil, soit 150 millions de km.

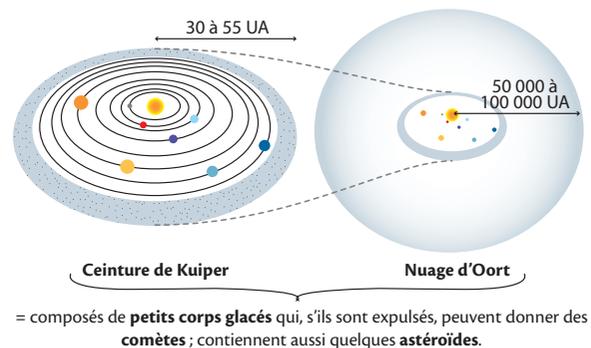


### Les limites du système solaire

Selon les conventions, la limite du système solaire est définie comme :

→ l'héliopause = limite du vent solaire, à 120 UA ;

→ le nuage d'Oort, qui a une forme de sphère centrée sur le Soleil.



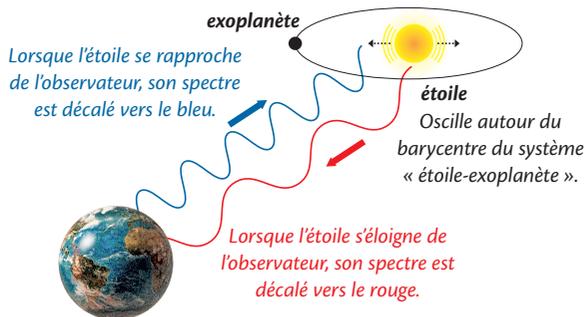
## II - Les exoplanètes

Une exoplanète est une planète située en dehors du système solaire, et donc liée gravitationnellement à une étoile autre que le Soleil. La détection des exoplanètes a débuté de manière indirecte dans les années 1990 et a été confirmée de manière plus directe en 2004.

Au 2 août 2022, on a découvert 5 126 exoplanètes dans 3 795 systèmes planétaires. Dans notre secteur de la Voie Lactée et avec les moyens de détection actuels, environ une étoile sur deux possède un système planétaire.

### Les méthodes de détection des exoplanètes

**Méthode des vitesses radiales** : on étudie l'effet Doppler résultant de la perturbation gravitationnelle de l'étoile par sa planète.



⚠ Des méthodes plus modernes, comme l'effet de lentille gravitationnelle ou l'imagerie directe par coronagraphie, sont actuellement à l'œuvre.

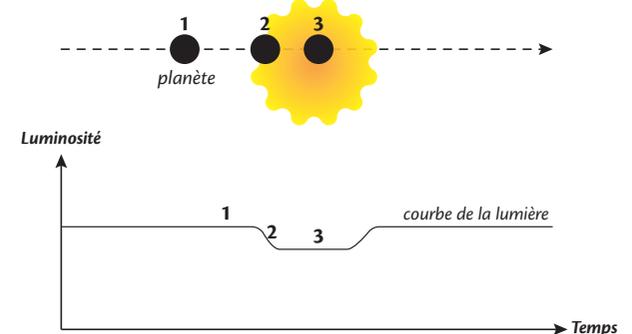
### La diversité des exoplanètes

Initialement, les méthodes utilisées induisaient un biais en faveur de la détection de « Jupiter chauds », des planètes géantes gazeuses très proches de leur étoile.

Les méthodes les plus modernes montrent une grande diversité de taille, distance à l'étoile, composition, période de révolution, etc.

**Méthode des transits** : on étudie la diminution de luminosité de l'étoile lorsque la planète passe devant.

Le satellite Kepler, lancé en 2009 par la NASA, détecte ainsi de nombreuses exoplanètes.



### III - Les comètes et les astéroïdes du système solaire

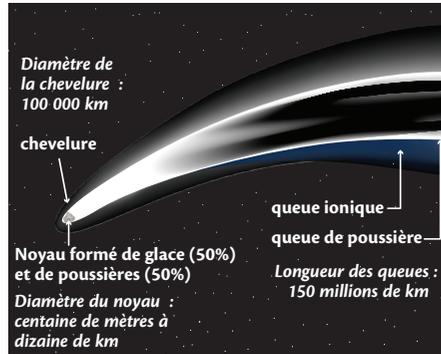
#### ✦ Les comètes, des « boules de glaces sales »

Une **comète** (ex : comète de Halley) est une **boule de glace** associée à des fragments rocheux et des poussières, qui est en rotation sur elle-même et en orbite autour du Soleil (*ellipse généralement très allongée*). Lorsque la comète passe à proximité du Soleil, les glaces se vaporisent en donnant un plasma et une traînée de poussière se détache aussi du noyau, formant ainsi une « chevelure » et deux « queues » à la comète. Les comètes du système solaire viennent principalement de la ceinture de Kuiper ou du nuage d'Oort.

**La comète C/2020 F3**  
(découverte par le télescope NEOWISE en 2020)



#### Un schéma de comète



**La sonde Rosetta s'apprêtant à lancer son atterrisseur Philae sur la comète « Tchouri » en 2014**

Il s'agit de la 1<sup>ère</sup> mission où un atterrisseur se pose sur le noyau de la comète « Tchouri » (67P/Tchourioumov-Guérassimenco) pour en étudier la composition et la structure.



#### ✦ Les astéroïdes, de petits corps rocheux

Un **astéroïde** est un petit corps rocheux ou métallique en orbite autour du Soleil, dont la taille va du centimètre à des centaines de kilomètres. Si l'astéroïde tombe sur une planète, c'est une **météorite**. Souvent, les petits astéroïdes se vaporisent en traversant l'atmosphère terrestre : ce sont les **étoiles filantes**. Environ 750 000 astéroïdes forment la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter.

#### Une étoile filante



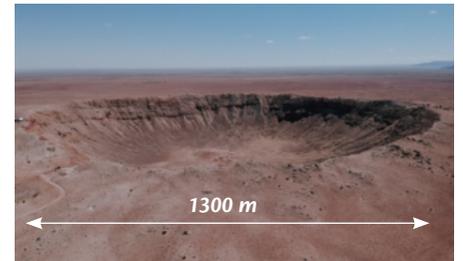
#### Une météorite de type chondrite

La plupart des astéroïdes, comme celui-ci, sont des reliques des blocs et planétésimaux impliqués dans la formation du système solaire. 



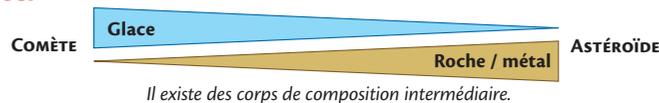
#### Meteor Crater, en Arizona

Les impacts météoritiques de grande ampleur peuvent être impliqués dans des crises biologiques majeures. Actuellement, les astéroïdes potentiellement dangereux sont étroitement surveillés.



En 2010, la sonde japonaise Hayabusa 1 a réussi à rapporter sur Terre quelques poussières prélevées sur l'astéroïde Itokawa. En 2020, la sonde Hayabusa 2 a ramené 5,4 g de l'astéroïde Ryugu.

#### ✦ Les objets plus difficiles à classer



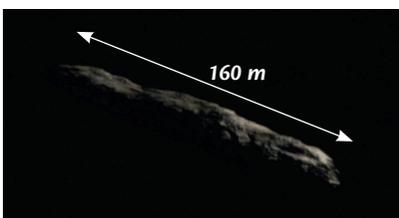
### IV - Les comètes et les astéroïdes extrasolaires

Des comètes ou astéroïdes peuvent orbiter autour d'une autre étoile que le Soleil (*exocomète/exoastéroïde*), ou encore se trouver dans le milieu interstellaire.

#### 11/Oumuamua

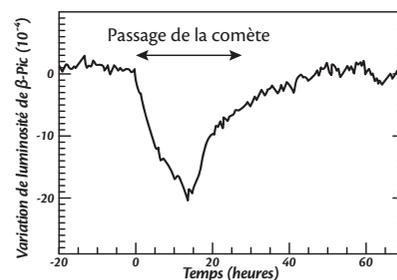
En 2017, l'astéroïde « 11/Oumuamua » est le premier objet interstellaire détecté en train de traverser notre système solaire.

En 2019, une comète interstellaire, 2I/Borisov, a été identifiée. La vitesse de ces deux objets était très élevée et leur forme inhabituelle a suscité de nombreuses interrogations.



#### Détection du passage d'une exocomète devant l'étoile β-Pictoris

Dès 1987, des exocomètes ont été identifiées par la méthode des transits.



# Les planètes du système solaire et leurs satellites

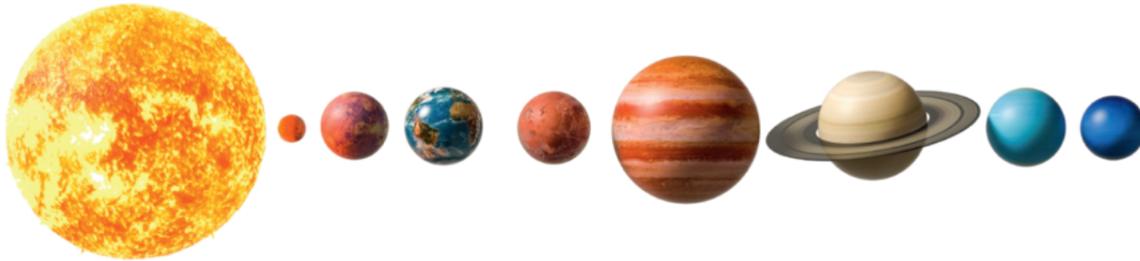
**PLANÈTE DU SYSTÈME SOLAIRE** = corps céleste en orbite autour du Soleil, qui a une masse suffisante pour être en équilibre hydrostatique (forme sphérique ou ellipsoïde de révolution) et ayant éliminé (ou confiné en certains sites précis) tout corps se déplaçant dans le voisinage de son orbite.

**SATELLITE** = corps céleste gravitant en orbite autour d'une planète, d'une planète naine ou d'un astéroïde.

Quelles sont les caractéristiques principales des planètes ? Comment se sont-elles formées ?

## I - Les caractéristiques des planètes du système solaire

Position des planètes par rapport au Soleil



En partant du Soleil, à gauche, Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune (échelles de distance et de taille non respectées). Les planètes tournent autour du soleil (**mouvement de révolution**) sur des **orbites elliptiques** pratiquement toutes situées dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation du Soleil : le **plan de l'écliptique**.

Caractéristiques physiques des planètes

	Mercure	Vénus	Terre	Mars	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
<b>Distance moyenne au Soleil</b> <i>(en millions de km et en unités astronomiques)</i>	57,9 0,387	108,2 0,723	149,6 1	227,9 1,524	778,3 5,203	1 427,0 9,539	2 871,0 19,191	4 497,1 30,061
<b>Période de révolution sidérale</b> <i>(en années terrestres)</i>	0,240	0,615	1,000	1,881	11,862	29,457	84,7	164,81
<b>Période de rotation sidérale</b>	58,646 j	243,01 j <i>(révolution rétrograde)</i>	23 h 56 min	24 h 37 min	9 h 50 min	10 h 40 min	17 h 14 min	16 h 3 min
<b>Diamètre équatorial</b> <i>(en km)</i>	4 878	12 104	12 796	6 794	142 894	120 536	51 118	50 538
<b>Masse</b> <i>(en masse terrestre)</i>	0,99	0,82	1	0,11	318	94	15	17
<b>Densité</b>	5,43	5,24	5,52	3,94	1,33	0,69	1,30	1,76
<b>Présence de satellites naturels confirmés</b>	0	0	1 (Lune)	2 (Phobos et Deimos)	79 (dont Io, Europe, Ganymède et Callisto)	77 (dont Titan, Encelade et Hypériorion)	27 (dont Ariel, Titania et Oberon)	14 (dont Triton)
<b>Présence d'anneaux</b>	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui
<b>BILAN</b>	<b>PLANÈTES TELLURIQUES, INTÉRIEURES</b>				<b>PLANÈTES GÉANTES, EXTÉRIEURES</b>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Composition de roches silicatées et de métaux, de densité relativement élevée.</li> <li>→ Croûte solide en surface.</li> <li>→ Pas d'anneaux et pratiquement pas de satellites.</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>→ Composition en H et He, proche de celle du Soleil, de faible densité.</li> <li>→ Présence d'un noyau rocheux au centre.</li> <li>→ Pas de surface solide.</li> <li>→ Entourées d'anneaux, nombreux satellites.</li> </ul>			



Les planètes possèdent toutes une structure en enveloppes concentriques.

Particularités de Pluton

Pluton n'est plus considérée comme une « vraie » planète depuis le 24 août 2006, mais elle est qualifiée de **planète naine**, c'est-à-dire que c'est un corps céleste en orbite autour du Soleil, en équilibre hydrostatique mais qui n'a pas éliminé tout corps se déplaçant à proximité.



Pluton possède quelques caractéristiques qui la rendent curieuse :

- Elle est **petite** (2376,6 km de diamètre).
- Elle est composée de **roches**, de **glaces** de méthane, d'azote et d'eau.
- Elle possède **6 satellites**, dont le plus gros et le plus connu est Charon (*visible sur l'image ci-contre*).
- Son **orbite** est sous la dépendance de Neptune (*Résonance orbitale : 2 : 3*).

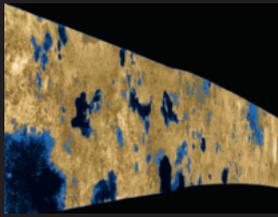
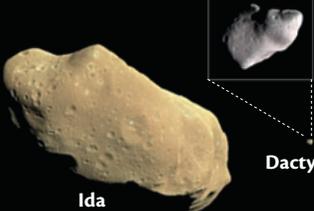
Planètes naines



Cinq planètes naines ont été référencées, toutes sont en orbite au-delà de Neptune, sauf Cérés qui se trouve entre Mars et Jupiter.

## II - Les satellites naturels des planètes

### La très grande diversité des satellites naturels

			
<p><b>La Lune, satellite de la Terre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Dépourvue d'atmosphère.</li> <li>→ Nombreux cratères d'impact.</li> </ul>	<p><b>Titan, satellite de Saturne</b></p> <p>Présence d'une atmosphère dense, d'un océan souterrain liquide sous une couche de glace d'au moins 100 km d'épaisseur, de lacs de méthane (visibles en noir sur la photo), de coulées volcaniques de glace (cryo-volcanisme).</p>	<p><b>Hyperion, satellite de Saturne</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Très cratérisé.</li> <li>→ Animé d'un mouvement de rotation chaotique.</li> <li>→ Diamètre : environ 250 km.</li> </ul>	<p><b>L'astéroïde Ida (56×24×21 km) et son petit satellite Dactyle (1,6×1,4×1,2 km)</b></p>

→ Les **gros satellites** (> 200 km de diamètre) sont relativement bien connus avec leur forme globalement sphérique, leur composition rocheuse avec des glaces diverses.

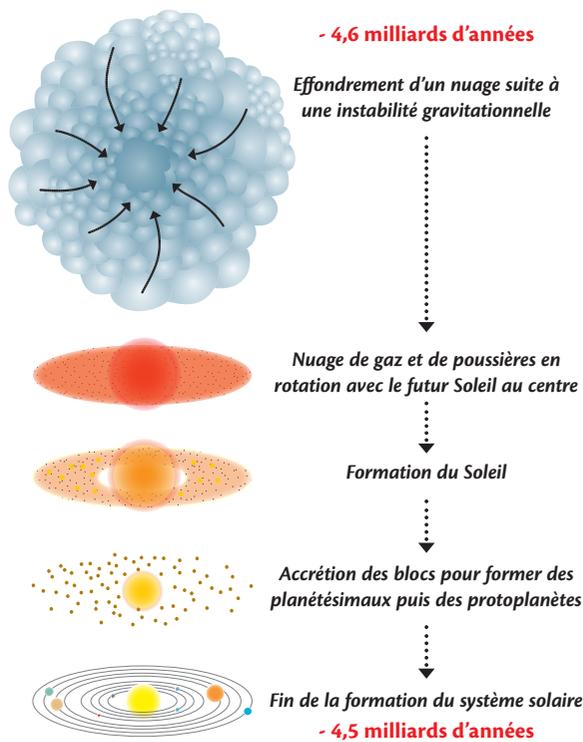
→ Les **petits satellites** ont une forme plutôt irrégulière.

Les principales sources de diversité concernent la taille, la composition, la présence ou non d'une atmosphère, d'une géodynamique interne et l'aspect de leur surface.

L'existence de certaines particularités des satellites fait qu'ils font l'objet de recherches actives en **exobiologie**.  08

## III - La formation des planètes et des satellites

### Modèle de la formation des planètes



Depuis plus de 50 ans, de nombreuses missions spatiales ont exploré le système solaire. Ces missions survolent, se posent voire prélèvent des échantillons de différents corps célestes (exemple du robot Curiosity, sur Mars).



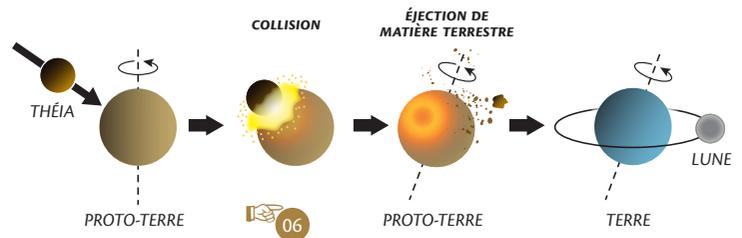
### La formation des satellites

Trois grandes causes expliquent la naissance des satellites naturels :

→ La **capture** (cas le plus fréquent pour les petits satellites) : un astéroïde est happé par le champ gravitationnel d'une planète.

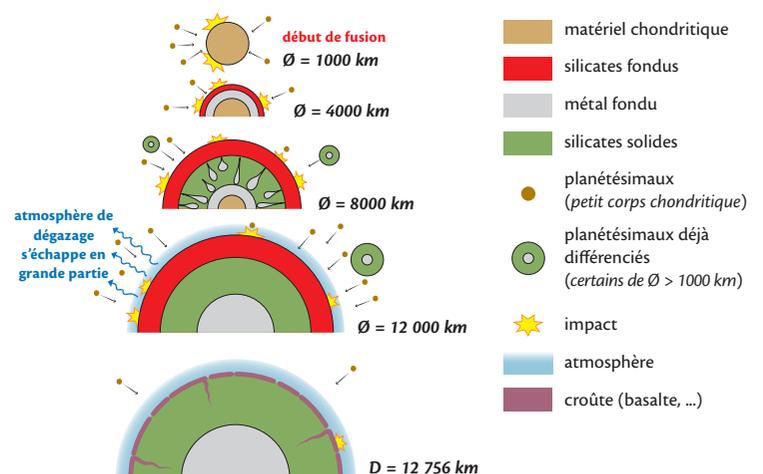
→ l'**accrétion** : des blocs de matière, de poussière s'agrègent et finissent par former un corps en orbite.

→ La **collision** : le plus rare, à l'origine de la Lune ou de Charon, un astéroïde de grande taille vient percuter une planète. La matière éjectée par le choc s'agglomère et reste en orbite.



### La formation de la structure concentrique des planètes

La formation d'une planète (de diamètre > 1 000 km) s'explique par **accrétion** et **différenciation contemporaines** : la chaleur dégagée par l'accrétion et la radioactivité à courte période fondre le corps en formation avec séparation fer/silicates. La surface reste fondue longtemps (océan magmatique) mais les silicates deviennent solides en profondeur à cause de la pression. Le fer liquide « percole » à travers ce proto-manteau pour engendrer le noyau. La quasi-totalité de l'atmosphère issue du dégazage/différenciation a presque totalement disparu.



**MARS** = quatrième planète du système solaire en partant du Soleil, visible à l'œil nu depuis la Terre.



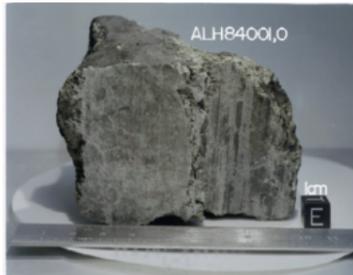
Que sait-on de la géologie de Mars ? Comment obtient-on ces informations ?

## I - La connaissance et l'exploration de Mars

### Quand Mars vient sur Terre !

Une **centaine de météorites** arrivant sur Terre (sur des dizaines de milliers) provient de Mars.

Cette météorite, **ALH 84 001**, datée de 4,5 Ga, a été éjectée de Mars par un impact gigantesque, il y a environ 16 Ma et est arrivée sur Terre, en Antarctique, il y a environ 13 000 ans. Ses minéraux carbonatés prouvent qu'elle a été en contact avec de l'eau liquide. Elle est célèbre car c'est à partir d'elle qu'une équipe de chercheurs a annoncé qu'elle présentait des traces de **vie martienne primitive**, traces réinterprétées de façon abiotique par la suite.



### Des missions d'exploration martienne

Depuis les années 1970, une **quarantaine de sondes et rovers** ont été envoyés pour explorer Mars. Actuellement, il y a 6 rovers à la surface de Mars, dont 3 actifs : **Sojourner, Spirit, Opportunity, Curiosity, Perseverance** (en photo ci-contre) et **Zhurong**, bientôt rejoints par **Rosalind Franklin** de l'ESA. Ces véhicules mobiles ont pour mission d'**explorer la géologie de Mars** et, pour Perseverance, de **collecter et stocker** des échantillons avant qu'une autre mission ne les ramène **sur Terre**.



## II - Les caractéristiques physiques de Mars

### Topographie globale de Mars : une importante dichotomie Nord/sud

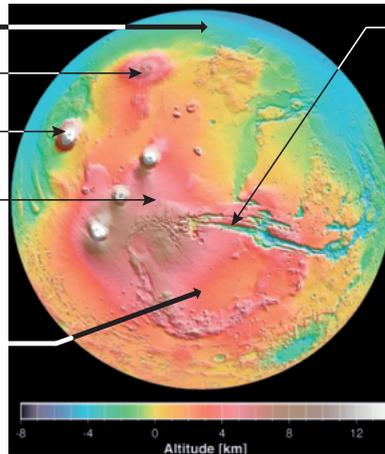
Plaines basses au Nord peu cratérisées

Alba Patera

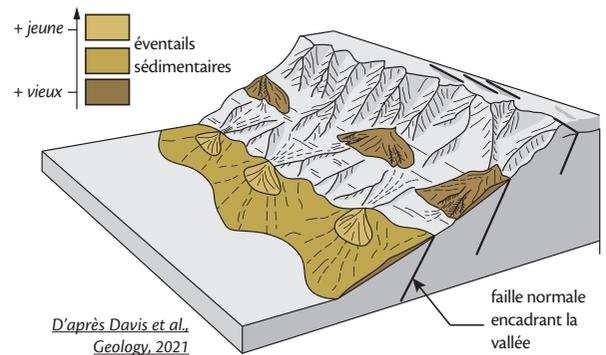
Olympus Mons

**Bombement de Tharsis**, avec 3 volcans visibles du N au S : *Ascraeus Mons, Pavonis Mons, Arsia Mons*

Hauts plateaux au Sud fortement cratérisés



**Valles Marineris**, immense réseau de canyons, dont la formation est associée au jeu de grandes failles normales



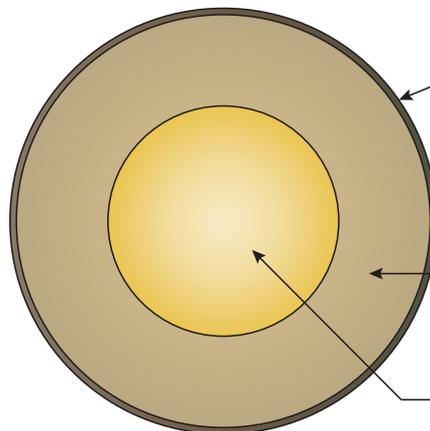
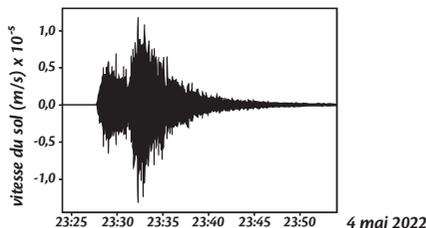
D'après Davis et al., *Geology*, 2021

La topographie de Mars est connue depuis 1999 grâce à l'altimètre laser MOLA de la sonde Mars Global Surveyor. La précision verticale est de moins de 5 mètres.

### Une structure interne en couches concentriques

**Diamètre** : 6 779 km  
**Distance au Soleil** : entre 1,381 et 1,666 UA  
**Densité** : 3,9  
**Température moyenne** : -63°C  
**Pression atmosphérique** : 6 mbar

Un **séisme d'une magnitude 5** a été enregistré sur Mars le 4 mai 2022 par Insight. Cela a permis de montrer que son **noyau est encore liquide** et que Mars a une **géodynamique interne active**.



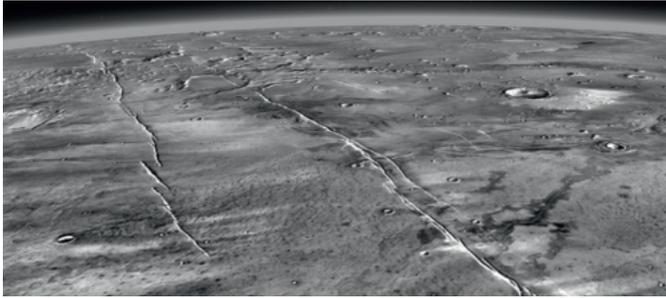
**CROÛTE**  
 - Épaisseur : entre 24 et 72 km  
 - Constitution : silicates  
 - Organisation : stratifiée en quatre couches depuis la surface  
 • le *duricrust*, couche indurée de quelques centimètres,  
 • le *régolithe*, strate superficielle d'environ 10 km formée de matériaux concassés par les impacts météoritiques,  
 • une *couche altérée* d'une dizaine de km  
 • une *croûte profonde* de nature cristalline.

**MANTEAU**  
 - Épaisseur : environ 1 530 km  
 - Constitution : péridotite  
 - Organisation : non stratifié  
 - Température moyenne : 1 500°C  
 - Source de chaleur : désintégration radioactive

**NOYAU**  
 - Rayon : 1 830 km (+/- 40 km)  
 - Constitution : fer, nickel, soufre  
 - Organisation : probablement en partie encore liquide

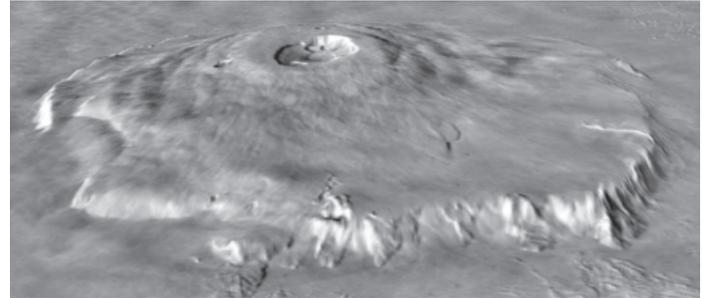
### III - La géodynamique interne de Mars

#### Une activité sismique



Les **fosses de Cerbère** sont une **région géologiquement active** de Mars, marquée par des **failles** d'où s'échappent des **coulées de lave** (en bas à droite de l'image) et sièges de **séismes** (en particulier celui du 4 mai 2022).

#### Un volcanisme à l'origine de géants



Les édifices volcaniques sont **nombreux** et **imposants** sur Mars. Par exemple, **Olympus Mons** (en photo ci-contre) est le plus grand volcan du système solaire, haut de 25 km et large de 620 km. Ils sont le siège d'**éruptions effusives**. Comme il n'y a **pas de tectonique des plaques** sur Mars, les coulées s'empilent les unes sur les autres et construisent ces édifices géants.

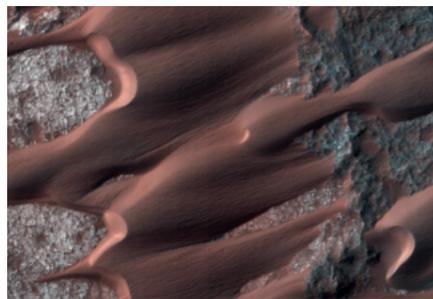
L'**épisode volcanique majeur** se situerait aux alentours de 3,5 Ga, mais des **épisodes volcaniques récents** (moins de 100 Ma) ont été identifiés.

### IV - La géodynamique externe de Mars

#### Une atmosphère ténue avec de violentes tempêtes



L'atmosphère martienne est composée à **95% de CO<sub>2</sub>**. Elle contient également **un peu de vapeur d'eau**, formant des nuages et **beaucoup de poussières en suspension**, responsables de sa **couleur rouge**.

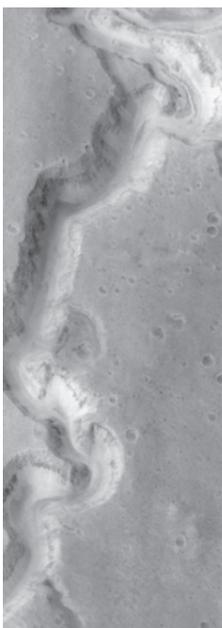


Mars subit des **vents violents** qui modèlent des **champs de dunes** (ci-dessus, au milieu) similaires à ceux que l'on peut observer dans les déserts terrestres.

Elle est également le siège de **tempêtes gigantesques** (ci-dessus à droite, photo prise le 29 août 2000, Cette tempête forme un vortex d'environ 900 km de diamètre) et des **tornades** (les « dust devils »).

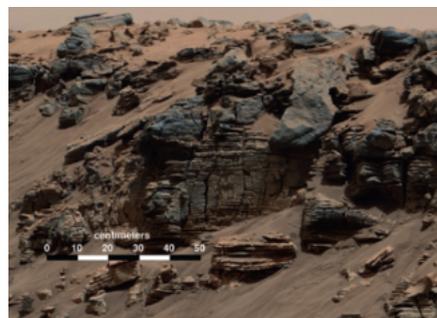


#### Présence d'eau liquide superficielle sur Mars jusque vers -3,5 à -3 Ga



Une des **preuves de l'existence d'eau liquide par le passé** sur Mars : **Nanedi Vallis**, large de 2,5 km, interprétée comme le lit d'un petit fleuve.

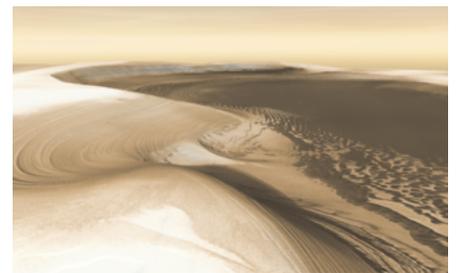
L'image recouvre une région de 9,8 x 18,5 km. La résolution spatiale est de 12 m.



Les autres preuves sont **les sols polygonaux**, **les réseaux de débâcle**, **les mers et les lacs**, **les minéraux hydratés** (comme les « myrtilles » martiennes, riches en hémateite et formées en présence d'eau), **des argiles** et de très **épaisses couches de sédiments** avec des grès, des conglomérats, du gypse...

La photo ci-dessus montre des roches sédimentaires finement stratifiées interprétées comme étant le résultat du dépôt dans un lac.

#### Présence d'eau sous forme de vapeur et de glace sur Mars jusque vers -3,5 à -3 Ga



Calotte glaciaire Nord

Depuis 3 Ga, la pression et la température ne permettent plus l'existence d'eau liquide en surface mais seulement sous forme de **vapeur** dans l'atmosphère, de **glace** aux pôles, de **givre saisonnier au sol** et dans le **sous-sol**.

# La Terre : la planète bleue

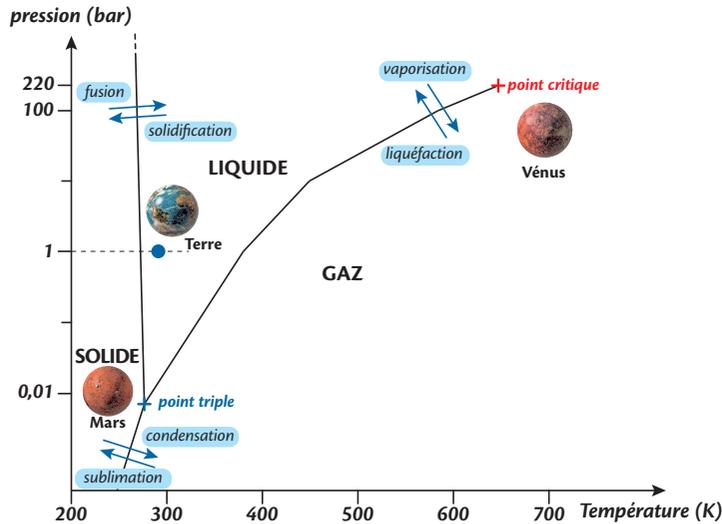
**PLANÈTE BLEUE** = la Terre est recouverte à 70% d'océan, ce qui lui donne sa couleur bleue.

Quels sont les réservoirs de l'eau sur Terre ? Quelles sont les origines de l'eau terrestre ?

## I - La présence d'eau sur la planète Terre

### Les trois états de l'eau sur Terre

La Terre est la **seule planète du système solaire** à posséder **actuellement** l'eau sous ses trois états à sa surface : liquide, gaz et solide.



### La Terre vue de l'espace

Cette photographie très classique de la Terre, appelée **Blue Marble**, a été prise le 7 décembre 1972 par l'équipage d'Apollo 17. Elle montre l'importance de la couverture océanique de la Terre qui lui donne, vue de l'espace, sa couleur bleue caractéristique. Une partie de cette eau est observable dans l'atmosphère au niveau des masses nuageuses constituées d'aérosols de microgouttelettes d'eau liquide ou solide.

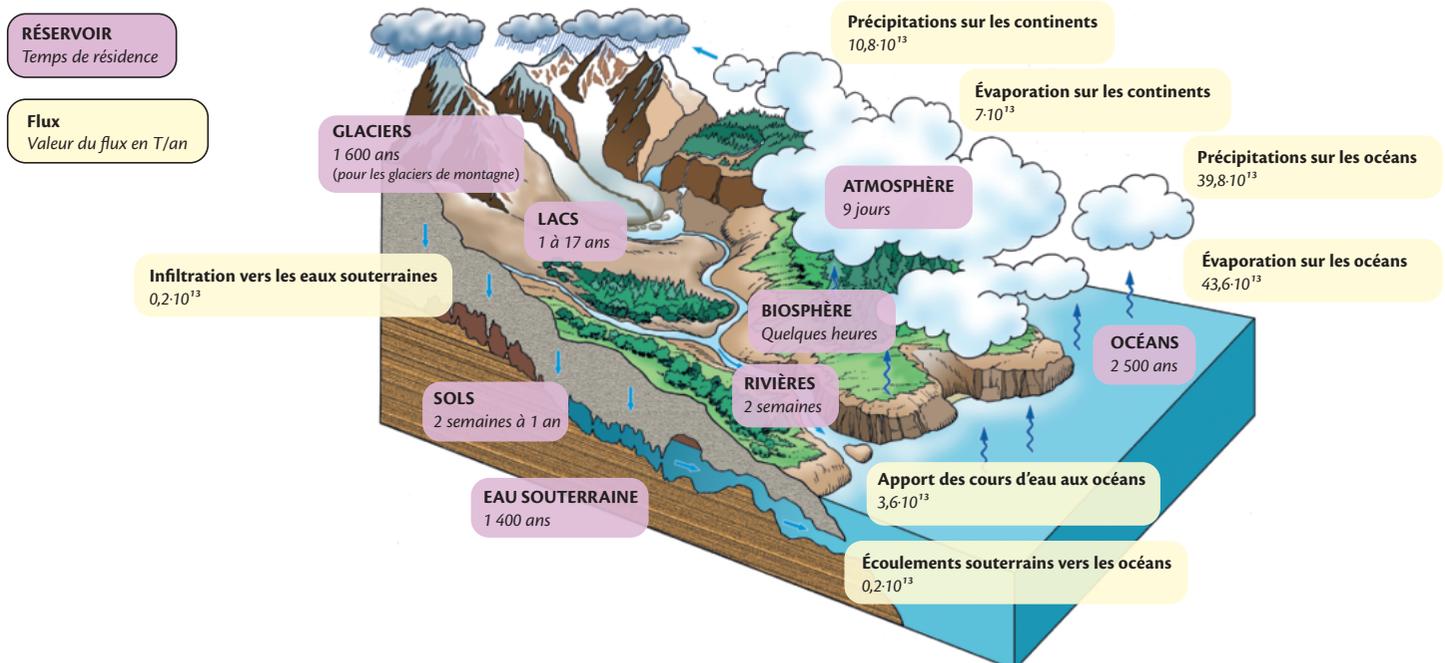


## II - Les réservoirs d'eau sur Terre

### ✦ Un réservoir d'eau superficiel très dynamique

#### Le cycle externe de l'eau

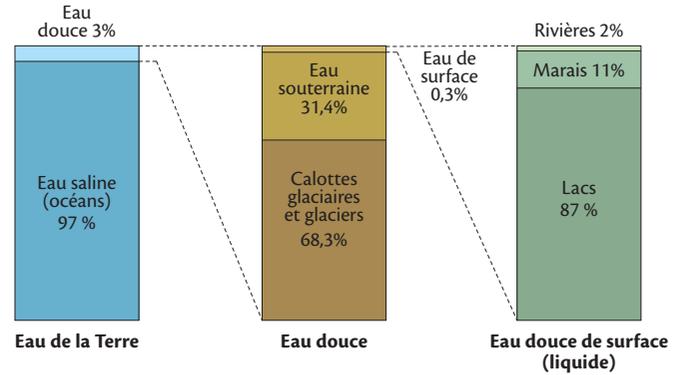
L'eau superficielle représente environ  $1,4 \cdot 10^{21}$  kg. Elle est **très mobile** et animée de nombreux flux. C'est le **cycle externe** de l'eau. Le moteur de ces flux est le **Soleil**. Les **temps moyens de résidence** dans les différents sous-réservoirs sont indiqués dans les cases violettes.



## Une ressource fragile

L'eau des océans ne représente que **0,02%** de la masse de la Terre.

L'eau douce, quant à elle, ne représente que **3%** de l'eau superficielle. Elle est de plus inégalement répartie à la surface de la planète, ce qui en fait un bien **renouvelable** mais **fragile**.



## ★ Un réservoir d'eau profond très important à l'origine d'un cycle interne de l'eau (en discussion)

La quantité d'eau enfouie au niveau des zones de subduction a été récemment ré-évaluée à la hausse. Par exemple, au niveau de la zone de subduction des Mariannes, Cai et al. (*Nature*, vol. 563, pp. 389-392, 2018) ont estimé que l'équivalent de  $3 \cdot 10^{12}$  T d'eau sont enfouies par million d'années, soit une estimation 4 fois plus importante que les précédentes. Andraut et Bolfan-Casanova (*Physics of the Earth and Planetary Interiors* 322 (2022) 106815) ont présenté récemment un modèle montrant que la quantité d'eau présente dans le manteau est de l'ordre de **1 à 4 fois la quantité d'eau présente dans les océans**.

④ magma silicaté très riche en eau remontant par instabilité gravitationnelle comme une « anti-pluie » dans le manteau supérieur

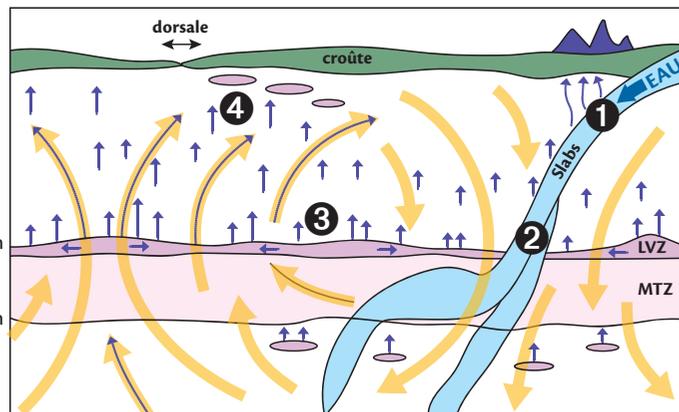
21

LVL = Low Velocity Layer  
(mise en évidence par des anomalies de vitesse sismique)

MTZ : Mantle Transition Zone

Manteau inférieur

! LVL ≠ LVZ



① Eau injectée dans le manteau au niveau des zones de subduction

② changement de minéralogie (olivine → ringwoodite) : apparition de minéraux hydroxylés (1,5% de leur poids en eau)

③ remontée et déstabilisation de ces minéraux par les mouvements de convection du manteau

→ mouvement de convection du manteau  
→ anti-pluie

## III - Les origines de l'eau sur Terre

### Une origine interne, réalimentée lors de la formation de la Lune

04

La Terre aurait contenu de l'eau dès son origine. Cette hypothèse est soutenue par l'analyse de météorites particulières, les **chondrites à enstatite**, de composition chimique proche de celle de la Terre, contenant jusqu'à **0,5% de leur poids en eau**. Les roches primitives de la Terre auraient contenu jusqu'à **3 fois le volume des océans**. Cette eau primitive a subi un **premier dégazage et a été libérée dans l'espace** du fait des conditions de température et de pression régnant sur Terre à cette époque.

L'impact de Théia, il y a 4,5 Ga, a probablement eu pour conséquence de re-dégazer le manteau contenant encore de l'eau et permettre la présence d'une eau superficielle liquide. Il est toutefois tout à fait possible que cette « nouvelle eau profonde » arrivant en surface ait été en grande partie perdue dans l'espace à cause de la très haute température superficielle post-impact de Théia.

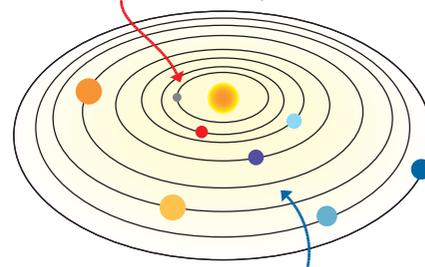


### Une origine externe plus tardive du système solaire externe

03

80 à 150 Ma après la formation/différenciation de la Terre, un intense bombardement par des **astéroïdes carbonés** et des **comètes** a apporté l'eau des océans. Cette hypothèse est soutenue par l'**analyse des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène**.

Les corps du système solaire interne devraient être rocheux et anhydres.



Les corps du système solaire externe devraient être principalement composés de glaces (principalement glace d' $H_2O$ ), glaces entourées d'hydrogène et d'hélium pour les corps les plus gros.

La part relative des deux contributions (interne et externe) et la part relative des comètes et des astéroïdes carbonés pour la contribution externe sont des sujets de **recherche active**.

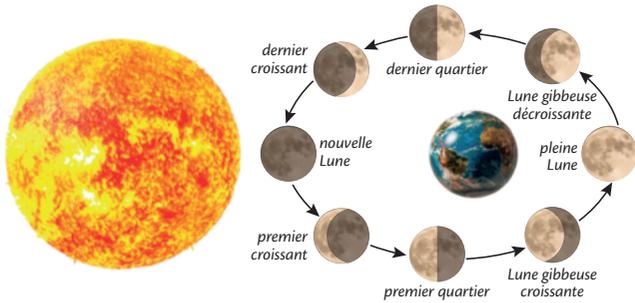
# Géologie de la Lune

**LUNE** = unique satellite naturel permanent de la Terre, 5<sup>ème</sup> plus grand satellite du système solaire.

De quoi est composée la surface lunaire ? Comment s'organise l'intérieur de la Lune ?

## I - Une carte d'identité de la Lune

Préhistoire, Antiquité : observation des phases lunaires



Quelques chiffres clés

Âge : 4,5 Ga (plus jeune que la Terre d'environ 50 Ma)  
 Rayon lunaire : 1737,4 km  
 Distance à la Terre : 384 400 km  
 Période de révolution : 27 jours et 7 heures  
 Période de rotation : la même que la période de révolution  
 → la Lune présente toujours la même face à la Terre  
 Masse volumique moyenne :  $3,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$   
 Gravité de surface :  $1,6 \text{ m/s}^2$   
 Température diurne :  $+120^\circ\text{C}$ , nocturne :  $-150^\circ\text{C}$   
 Pression atmosphérique :  $10^{-10} \text{ Pa}$  (très faible !)

Aspect historique de l'étude de la Lune

- Début XVII<sup>e</sup> siècle, Galilée observe la Lune à l'aide d'une lunette et réalise des dessins des cratères.
- 1959 : début de l'exploration spatiale (sonde soviétique Luna 3 survole la face cachée).
- 1961–1972 : programme Apollo de la NASA : vols habités, récolte de roches, pose d'instruments...
- Depuis : nombreuses sondes, robots et capteurs, identification de météorites lunaires...



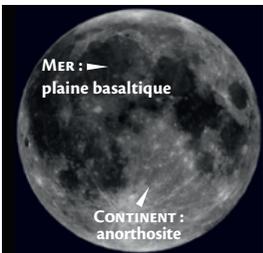
Nombreux cratères météoritiques permettant une datation des différents terrains :

- plus un terrain est cratérisé, plus il est ancien,
- les cratères peuvent se recouper,
- la datation absolue est possible par radiochronologie sur des échantillons.

## II - La surface de la Lune

Composition de la croûte lunaire : deux faces très différentes

Face visible de la Lune (FV)

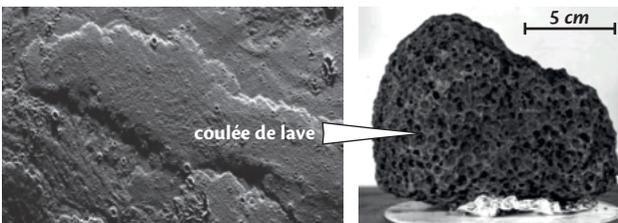


Face cachée de la Lune (FC)



Sur la face cachée de la Lune, la croûte très épaisse s'oppose à la remontée du magma basaltique plus dense, ce qui explique qu'on y trouve bien moins de mers lunaires que sur la face visible.

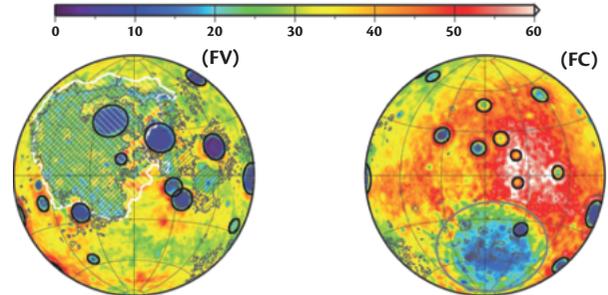
Mers lunaires basaltiques : des surfaces planes très cratérisées



Basalte riche en vacuoles = traces de gaz

Presque tous les basaltes lunaires ont des âges plus vieux que -2 à -3 Ga : en raison de sa petite taille, la Lune s'est refroidie rapidement. Le volcanisme lunaire est bien plus ancien que les volcanismes de Vénus, Mars et la Terre.

Épaisseur de la croûte lunaire (km)



La composition chimique en éléments traces de la croûte est différente entre la face cachée et la face visible de la Lune (exemple : teneur en thorium).

Continents formés de brèche anorthositique : des surfaces très cratérisées



Empreinte d'astronaute dans le régolithe, poussière recouvrant le sol lunaire, due à la pulvérisation du sol par de nombreux impacts météoritiques.

95% de feldspaths plagioclases (blancs)



rare petits pyroxènes (jaunes)

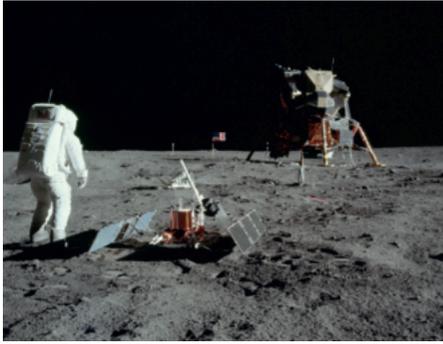
Échantillon d'anorthosite formant le sol des continents lunaires.



Souvent, les épanchements basaltiques des mers lunaires sont présentés comme une conséquence directe des impacts météoritiques. La datation montre que cela est totalement erroné : plusieurs centaines de millions d'années peuvent séparer les impacts météoritiques des épanchements de lave !

### III - La structure de la Lune

#### Mise en place de sismomètre par Buzz Aldrin (Apollo 11)

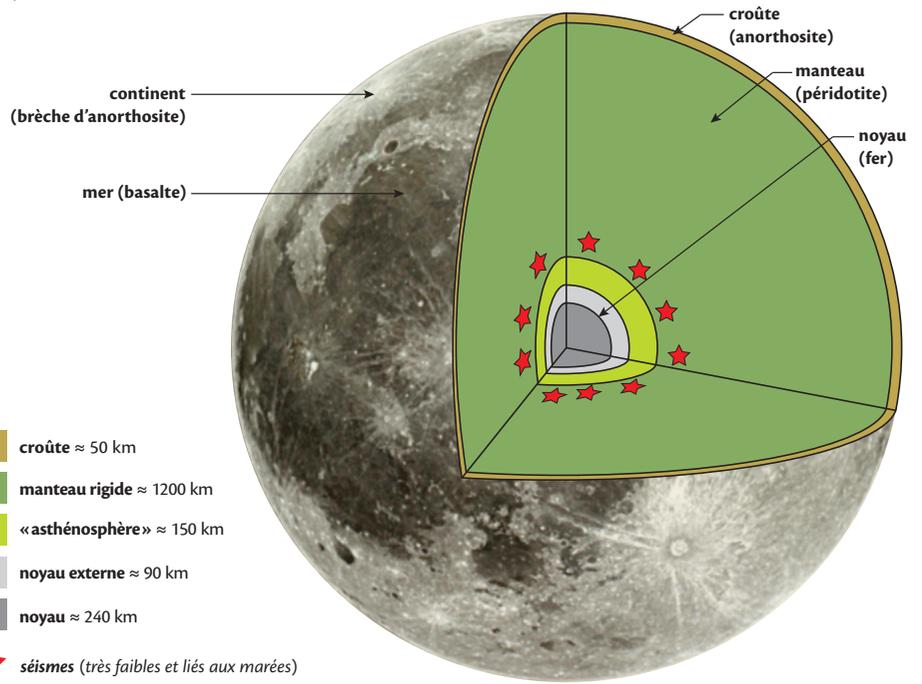


Ces enregistrements sismiques ont permis de déterminer la structure interne de la Lune.

#### L'intérieur de la Lune 04

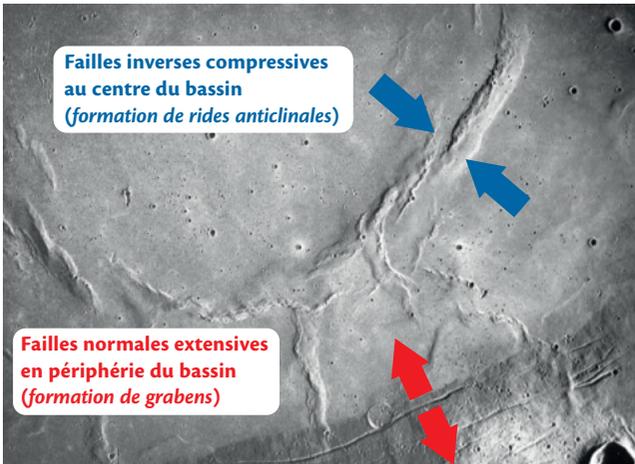
Le noyau ferreux de la Lune est petit, ce qui est à mettre en lien avec la formation de celle-ci : collision de la Terre (déjà en voie de différenciation) avec un corps de la taille de Mars appelé Théia. La collision emporte surtout du manteau terrestre et de Théia, et seulement une faible part de leur noyau ferreux.

- croûte** ≈ 50 km
- manteau rigide** ≈ 1200 km
- «asthénosphère»** ≈ 150 km
- noyau externe** ≈ 90 km
- noyau** ≈ 240 km
- séismes** (très faibles et liés aux marées)



### IV - La tectonique lunaire

#### Des failles au niveau du bassin Serenitatis



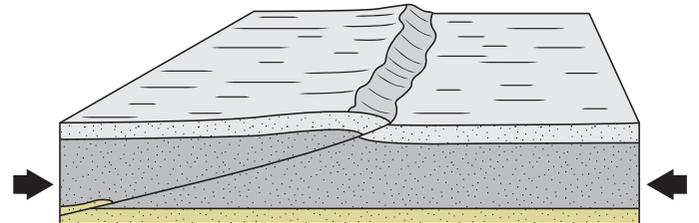
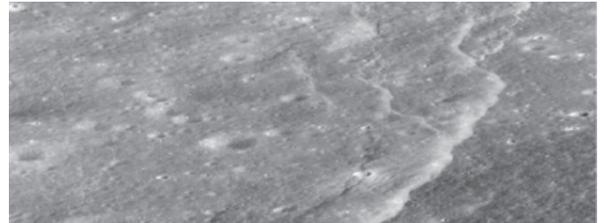
**Failles inverses compressives au centre du bassin**  
(formation de rides anticlinales)

**Failles normales extensives en périphérie du bassin**  
(formation de grabens)

Le bassin s'est affaissé sous le poids du basalte et ses bords se sont soulevés. Il y a donc compression d'intrados dans le bassin, et extension d'extrados en périphérie.

La tectonique lunaire est beaucoup plus faible que sur Mars ou la Terre. Cette très faible tectonique n'est que la conséquence de mouvements verticaux (réajustement isostatique) ou d'une très légère contraction thermique. Il n'y a pas d'évidence de dynamique horizontale due à des mouvements dans le manteau, contrairement à ce qu'on observe chez Mars ou la Terre.

#### Des failles chevauchantes récentes un peu partout sur la Lune



Cette **faille chevauchante** est liée à un raccourcissement  
→ La Lune « rétrécit », elle se contracte en se refroidissant.

### V - L'eau sur la Lune



#### De l'eau mise en évidence dans certains cratères au niveau des Pôles

Cratères du Pôle Sud de la Lune, dont les fonds ne voient jamais la lumière du Soleil et sont soumis à des températures très basses. Des composés hydrogénés ( $H_2O$  très probable) y ont été détectés depuis des sondes en orbite.

Le 3<sup>ème</sup> étage d'une fusée s'y écrase ce qui forme un panache de poussière, panache étudié spectralement par la sonde LCROSS qui suivait ce 3<sup>ème</sup> étage. Ce panache contient 95% de poussière et 5% de vapeur d'eau.

# Les possibilités de vie dans le système solaire et l'Univers

**HABITABILITÉ (D'UNE PLANÈTE OU D'UN SATELLITE)** = mesure de la capacité d'un corps astronomique à développer et accueillir la vie.

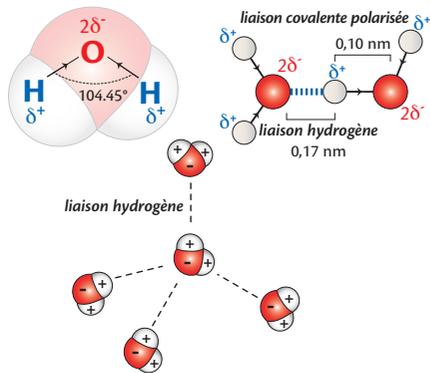
Quelles sont les conditions d'habitabilité d'une (exo)planète ou d'un (exo)satellite ?

## I - La détermination des conditions d'habitabilité

Comme on ne connaît pas de forme de vie non terrestre, la notion d'habitabilité est limitée par la comparaison aux conditions biologiques terrestres et demeure très spéculative.

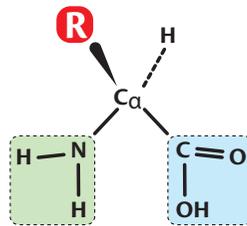
### ✦ Les briques de base du vivant

#### De l'eau, de préférence liquide



L'eau est le solvant du vivant, elle peut dissoudre des molécules minérales et organiques et autorise l'apparition de suspensions, de colloïdes...

#### Des molécules carbonées complexes



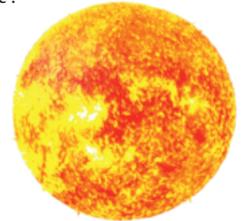
Ci-contre, un acide aminé : certains ont été détectés dans le milieu interstellaire et sur des météorites ainsi que sur la comète Tchouri !  03

Un élément léger et tétravalent semble indispensable à la constitution de matière vivante (le silicium, plus lourd, ne semble pas un aussi bon candidat). Il faut également des environnements propices à la formation de molécules carbonées complexes.

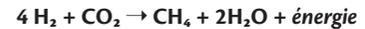
#### Une source d'énergie

Les sources connues sur Terre :

→ L'énergie lumineuse, notamment dans le cas de la **photosynthèse** ; cette source d'énergie contraint fortement la zone habitable autour de l'étoile.



→ Des **réactions chimiques rédox**, dans le cas de la **chimolithotrophie**. Exemple :



Or, il y a synthèse d' $\text{H}_2$  si de l'eau est au contact de silicates contenant du  $\text{Fe}^{2+}$ .

**La prise en compte de la chimolithotrophie élargit considérablement la fenêtre d'habitabilité.**

### ✦ Une zone à délimiter autour d'une étoile 04

#### Les zones d'habitabilité superficielle autour d'une étoile

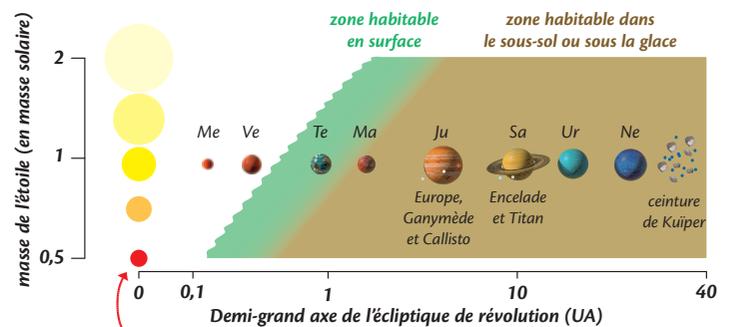
**VERT** : zone où l'eau peut être liquide en surface. Cette zone ne concerne que la Terre, Mars et la Lune.

 Les ondulations signifient que la limite est fortement modulée par un éventuel effet de serre de l'atmosphère de la planète ou du satellite.

**MARRON** : zone où l'eau liquide pourrait persister en profondeur, à condition que de l'énergie chimique soit disponible pour soutenir un métabolisme chimolithotrophe. Il y a de l'énergie disponible dès que de l'eau (*chaude*) est au contact avec des silicates ferreux (*olivine, pyroxène*) car cela génère de l' $\text{H}_2$ , source de réactions redox potentielles.

#### La masse de l'étoile conditionne :

- la durée de vie de l'étoile, qui doit être suffisamment longue pour autoriser le développement de la vie ;
- sa température de surface qui détermine entre autres sa luminosité (*nécessaire en cas de métabolisme photosynthétique*).



On ignore si les naines rouges (masse < 0,4 MS) sont susceptibles d'abriter des planètes ou satellites habitables. C'est une question importante, étant donné que 80% des étoiles de notre galaxie sont de ce type.

#### Des exemples d'autres paramètres à prendre en compte

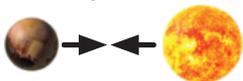
##### Les paramètres orbitaux de la planète

Deux exemples de situations peu favorables :

→ **orbite très excentrique** : grandes variations de température

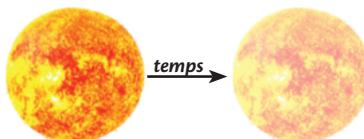


→ **rotation synchrone** : c'est toujours la même face de la planète qui regarde l'étoile, cette face est brûlante et l'autre glacée.



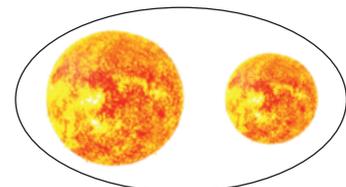
##### Les variations de luminosité de l'étoile

Elles ne doivent pas être trop importantes.



##### L'existence de nombreux systèmes doubles

Leur zone habitable superficielle est difficile à décrire.

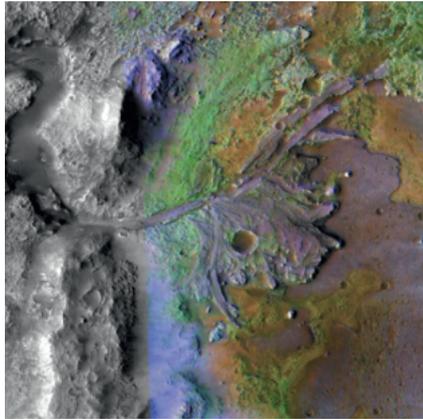


Comme les étoiles se modifient au cours de leur vie, la zone habitable en surface autour d'une étoile se déplace au fil du temps, tendant à s'éloigner de l'étoile.

## II - Les possibilités de vie dans le système solaire

### ★ La vie sur Mars

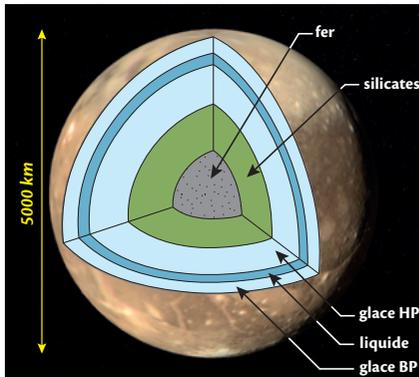
#### De l'eau liquide sur Mars dans le passé



Ancienne vallée martienne terminée par un delta. La couleur verte sur-ajoutée à la photo indique la présence d'argile. Or, pour faire de l'argile, il faut une interaction de longue durée entre de l'eau liquide et des silicates.

### ★ La vie sur divers satellites

#### Ganymède et Callisto

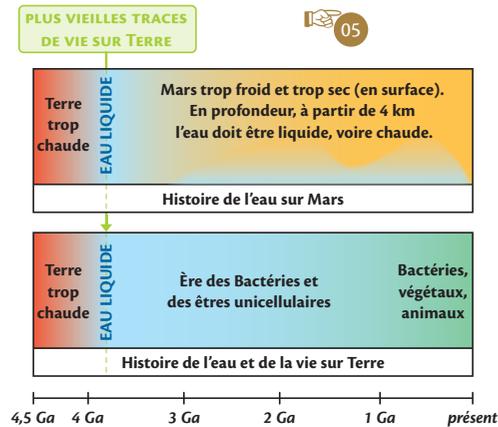


Ganymède et Callisto sont des satellites de Jupiter. Ils sont constitués d'environ 50% de fer + silicates et de 50% d'eau, cette eau contenant de l'ammoniac et du méthane. Ici, modèle de Ganymède.

Présence d'une couche d'eau liquide en profondeur mais pas en contact avec des silicates...

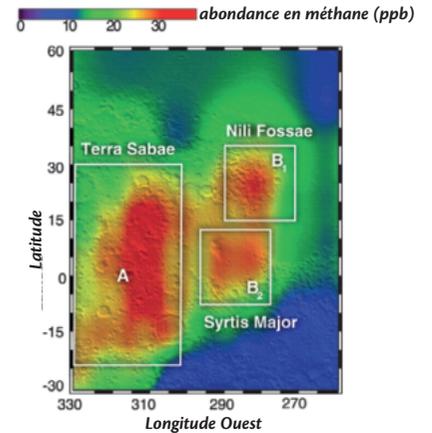
**!** Titan, satellite de Saturne, possède à sa surface des lacs de méthane liquide à  $-180^{\circ}\text{C}$ . On pourrait y envisager des formes de vie totalement différentes, avec le méthane remplaçant l'eau comme solvant...

#### Histoire comparée de la Terre et de Mars



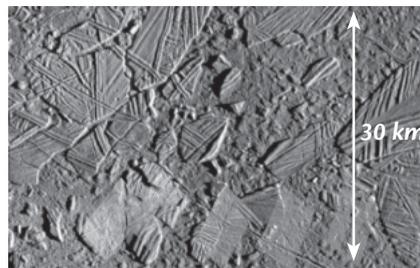
Actuellement, Mars héberge de la glace en profondeur avec potentiellement des poches d'eau liquide.

#### Un exemple d'indice à l'étude



Des dégagements de méthane ont été détectés dans l'atmosphère martienne. Or, sur Terre, ce gaz a fréquemment une origine biologique. Ci-dessus : cartographie des 3 régions correspondant aux dégagements de méthane sur Mars.

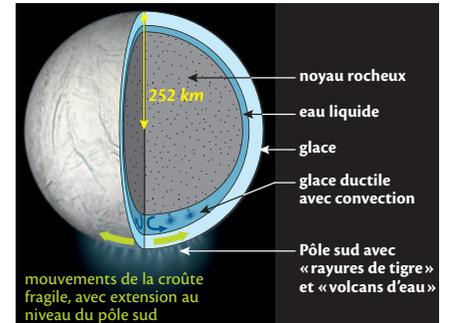
#### Europe



Europe est un satellite de Jupiter. Études de surface, modèles d'évolution interne... permettent de proposer qu'Europe est constitué d'un noyau de fer et d'un manteau silicaté recouvert d'une couche d'eau liquide d'une centaine de km d'épaisseur elle-même recouverte d'une couche de glace d'une dizaine de km. Ici, des radeaux de banquise visibles à sa surface.

Présence d'une couche d'eau liquide en profondeur, en contact avec des silicates

#### Encelade, un candidat très prometteur



Encelade est un satellite de Saturne. Il y aurait probablement un océan d'eau liquide sous une banquise de glace. Cet océan serait présent partout mais plus épais au pôle Sud, qui émet des geysers. Des molécules organiques complexes y ont été détectées. Ici, schéma structural de l'intérieur d'Encelade.

## III - Les possibilités de vie dans les exoplanètes et exosatellites

### Le satellite Kepler

Le Laboratoire d'habitabilité planétaire (PHL) de l'Université de Porto Rico publie une liste des systèmes planétaires potentiellement habitables en surface, en utilisant un « indice d'habitabilité planétaire » qui prend en compte différents paramètres. En utilisant les données du satellite Kepler, une cinquantaine d'exoplanètes ont été identifiées comme habitables en surface, mais les estimations suggèrent qu'elles se compteraient par millions.



En 2019, deux études indépendantes combinant des données des télescopes spatiaux Kepler, Spitzer et Hubble, ont conclu à la présence de quantités importantes de vapeur d'eau dans l'atmosphère de la planète K2-18 b, située à 124 a.l. de la Terre. C'est une première pour une planète de la zone d'habitabilité superficielle.



---

# **PARTIE II**

---

## *LA STRUCTURE DES ENVELOPPES TERRESTRES*



# Structure et composition de l'atmosphère

**ATMOSPHÈRE** = enveloppe gazeuse entourant la Terre composée d'un mélange appelé air.

Quelles sont les propriétés de l'atmosphère ? Quels rôles joue l'ozone ?

## I - La structuration verticale de l'atmosphère et sa composition

### Les principales couches de l'atmosphère et leurs caractéristiques

#### ➔ EXOSPHERE :

- Couche à la transition entre atmosphère et espace libre.
- Principaux constituants : Hydrogène et Hélium s'échappant de la gravité terrestre.

#### ➔ THERMOSPHERE :

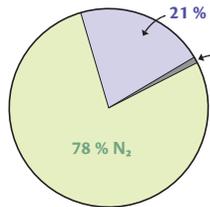
- Couche caractérisée par une augmentation de la température avec l'altitude due à l'énergie libérée des chocs entre les molécules.
- Réflexion des ondes radios.

#### ➔ MÉSOsphère :

- Couche peu connue caractérisée par une diminution de la température avec l'altitude et où sont **détruits les météores** par échauffement contre les rares particules d'air qu'ils rencontrent.

#### ➔ STRATOSPHERE :

- Couche calme et stable (*car air froid et dense en bas*).
- Zone de formation et de destruction de l'ozone sous l'action des UV :
  - $O_2 = O + O$  (dissociation du dioxygène)
  - $O_2 + O = O_3$  (formation de l'ozone)
  - $O_3 + O = 2O_2$  (destruction de l'ozone)
- Maximum de l'ozone vers 25 km (*concentration de l'ordre de 1 pour 100 000 molécules*).
- 99,9% de l'atmosphère situés en dessous de 42 km.



21 % O<sub>2</sub> (issu de la photosynthèse)

1 % de gaz rares :

Argon 0,9 %

CO<sub>2</sub> 400 ppm

CH<sub>4</sub> (Archées méthanogènes)

+ H<sub>2</sub>O : teneur variable renouvelée en moins de 10 jours (cycle de l'eau entre atmosphère et hydrosphère)

$$RH = \frac{P_{H_2O}}{P_{vapsaturante}} \quad (\text{dépend de la température})$$

#### ➔ Tropopause :

- Zone d'inversion du profil de température : limite entre troposphère convective et stratosphère stratifiée.

#### ➔ TROPOSPHERE :

- Couche située autour de la Terre contenant 80 % de la masse de l'atmosphère et l'essentiel des nuages.
- **Instable thermiquement** donc **convective** du fait d'une diminution régulière de la température avec l'altitude (0,65 °C/100 m), siège d'une grande turbulence.

#### ➔ Couche-limite atmosphérique :

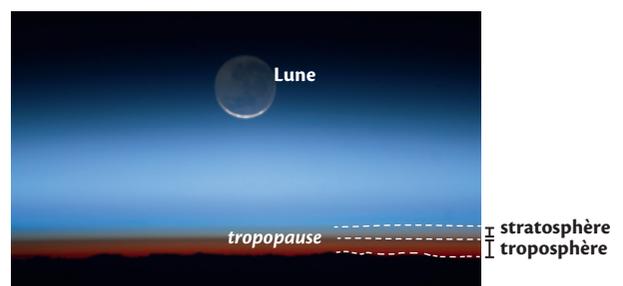
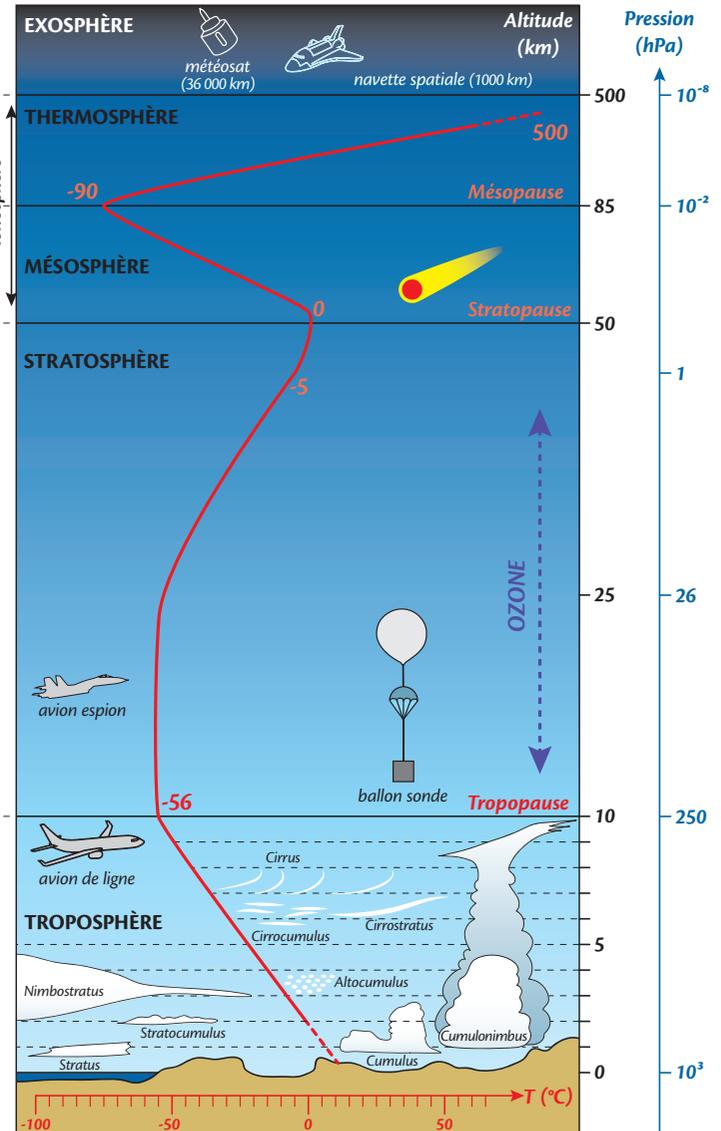
- Sous l'influence directe du sol, siège d'**isothermies** ou d'**inversions de température**.

### Observation de la tropopause

#### ➔ Image prise depuis l'ISS le 31 juillet 2011 :

Les différentes couches (la troposphère en orangé, la stratosphère en gris et le reste de l'atmosphère dans les teintes bleues) se distinguent par leur composition gazeuse, chaque particule et gaz se comportant comme un prisme.

Par temps clair et en journée, le ciel apparaît bleu car les longueurs d'ondes les plus courtes (comme le bleu) sont plus facilement diffusées par l'atmosphère que les longues (comme le rouge). A l'inverse, au coucher du Soleil, les longueurs d'ondes les plus courtes finissent par être arrêtées par la traversée de l'atmosphère (plus épaisse quand le Soleil est bas sur l'horizon) et il ne reste que les longueurs d'ondes rouges et oranges.



## UN CONCEPT INNOVANT !

Cet ouvrage, organisé en **145 fiches**, couvre tous les domaines de la géologie et offre un panorama complet de la discipline avec plus de **1200 photos, schémas et extraits de cartes géologiques**.

Les fiches s'appuient à la fois sur les **bases historiques**, des **exemples concrets** et toutes les **connaissances modernes**.

Les auteurs proposent ici une **approche nouvelle, visuelle et concise, idéale pour l'apprentissage et la mémorisation** du cours et pour la préparation des concours.

### Chaque fiche traite d'un sujet précis et propose :

- la définition des mots-clés
- une problématique
- un plan hiérarchisé pour que l'étudiant ait une vision complète, pédagogique et rapide des notions à connaître
- de nombreux schémas, photos ou extraits de cartes géologiques

### LE LIVRE COMPTE 12 GRANDES PARTIES :

- La Terre dans l'Univers
- La structure des enveloppes terrestres
- La dynamique des enveloppes terrestres
- Les déformations de la lithosphère
- Le métamorphisme
- Les phénomènes exogènes
- Le magmatisme
- La géologie, une science historique
- Les risques géologiques
- Les ressources et leur environnement
- La géologie de la France (métropolitaine et DROM-COM)
- Les méthodes géologiques et géochimiques

### PUBLIC

- > Étudiants de Licence de SV-STU
- > Étudiants en classes préparatoires BCPST
- > Candidats aux concours de l'enseignement (CAPES, Agrégation)

### PIERRE THOMAS

professeur émérite à l'École Normale Supérieure de Lyon, géologue de formation, a supervisé l'écriture de ce livre.

Une équipe d'auteurs, tous agrégés de SV-STU, professeurs de classes préparatoires BCPST et membres de jurys de concours ; ils sont au plus près des exigences des examens, des concours et des oraux.

DANS LA MÊME  
COLLECTION



36 €

ISBN : 978-2-8073-3191-4



9 782807 331914

[www.deboecksuperieur.com](http://www.deboecksuperieur.com)